

文章编号 1004-924X(2018)07-1784-10

基于物方定位一致性约束的 光学航空影像多视铅垂线轨迹匹配

张 卡^{1,2,3*}, 盛业华^{1,2,3}, 付素霞^{1,2}, 袁家明^{1,2}, 陈 辉^{1,2}

- (1. 南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023;
2. 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 江苏 南京 210023;
3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023)

摘要:针对传统铅垂线轨迹匹配方法在进行地面基元匹配时存在只能得到一个高程值且匹配结果缺乏准确性验证的缺点,本文提出了一种新的基于物方定位一致性约束的光学航空影像多视铅垂线轨迹匹配方法。该算法对传统铅垂线轨迹匹配方法进行了针对性的改进,首先,改善了物方地面基元的像方多视匹配过程,其次,利用地面基元已有的物方平面坐标作为物方定位一致性约束条件,增加了多视匹配结果的准确性检验过程,从而得到可验证的地面元匹配结果。使用实际航空多视影像对本文算法与传统铅垂线轨迹方法进行了对比实验,实验结果显示本文方法在可靠性、准确性和算法效率等定量指标方面,比传统铅垂线轨迹方法分别高出 26%、40% 和 4 倍,证明其能得到更加可靠与有效的地面元匹配结果。

关键词:光学航空影像;铅垂线轨迹匹配;物方地面元;物方定位一致性;准确性验证

中图分类号: TB853. 29 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20182607. 1784

Multi-view VLL matching algorithm for optical aerial images based on constraint of object space positioning consistency

ZHANG Ka^{1,2,3*}, SHENG Ye-hua^{1,2,3}, FU Su-xia^{1,2}, YUAN Jia-ming^{1,2}, CHEN Hui^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Nanjing Normal University), Ministry of Education, Nanjing 210023, China;
2. State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution (Jiangsu Province), Nanjing 210023, China;
3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangka81@126.com

Abstract: The use of the traditional Vertical Line Locus (TVLL) matching method for the multi-view

收稿日期: 2017-11-23; **修订日期:** 2018-02-03.

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK20151547); 国家自然科学基金资助项目 (No. 41631175); 国家重点研发计划资助项目 (No. 2017YFB0503500, No. 2017YFB0503504); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (No. 164320H116); 江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修计划资助项目; 南京师范大学青蓝工程资助项目; 南京师范大学 2017 年度校级教改研究课题资助项目

image matching of ground primitives results in the following shortcomings: obtaining one elevation value and the lack of accuracy validation of the matching results. Considering the above shortcomings, this paper proposes a new multi-view VLL matching algorithm for optical aerial images based on the constraint of object space positioning consistency. The proposed algorithm brings about specific improvements to the TVLL method. First, it improves the image space multi-view matching process of the object space ground primitive. Second, it uses the known object space plane coordinates of the ground primitive as the constraint of the object space positioning consistency, and improves the accuracy validation process of the multi-view matching results. Thus, it can obtain verifiable matching results of the ground primitive. The proposed algorithm was compared with the TVLL method using actual aerial images. The experimental results show that the quantitative indexes of reliability, accuracy, and computing efficiency for the proposed method are 26%, 40%, and 4 times higher than those for the TVLL method. Therefore, the proposed method successfully overcomes the drawbacks of the TVLL method, and obtains a more reliable and effective matching of ground primitives.

Key words: optical aerial image; Vertical Line Locus(VLL) matching; object-space ground primitive; object space positioning consistency; accuracy validation

1 引言

影像匹配一直是数字摄影测量与计算机视觉领域的热点研究问题,其目的是自动寻找同一地物在两幅或多幅影像上的同名像点^[1]。作为从影像进行空间信息自动提取的一个关键技术环节,影像匹配在自动空中三角测量^[2]、三维信息采集^[3]、三维场景重建^[4]、多源数据融合^[5]及机器人视觉导航^[6]等应用中具有重要的作用。

根据影像匹配过程中匹配基元选择的不同,影像匹配方法可分为像方基元匹配和地面元匹配两类。像方基元匹配是以影像上的像元或特征(点特征、线特征、面特征)为待匹配基元,利用像方信息(灰度或特征向量等)进行匹配准则的定义与计算,在像方侧完成同名像点的搜索确定。像方基元匹配方法总体上可分为局部影像匹配方法和全局影像匹配方法两类。另外,对于局部^[7-9]或全局匹配方法^[10-11]得到的视差,通常还要进行视差优化处理,以滤除错误视差、填补视差空洞等^[12]。而地面元影像匹配是以已知物方平面坐标(X, Y)的地面点作为待匹配基元,影像匹配的目的在于确定地面基元的物方高程 Z 。由于地面元影像匹配方法能直接确定地物的空间三维坐标,其也被称作基于物方的影像匹配方法,在数字表面模型生成、数字线划图绘制等地理信息产品生产过程中具有重要的应用^[13-14]。

现有地面元影像匹配方法主要是在传统铅垂线轨迹法(Vertical Line Locus, VLL)基础上发展而来的,如单立体 VLL 法^[15]、多视 VLL 法^[16-18]等。这些方法主要采用如下的匹配过程:首先,根据地面待匹配基元所在区域的大概高程范围,以物方高程为搜索基准,从最小高程值出发,每次高程增加搜索步距 ΔZ ,在物方空间确定搜索点的物方三维坐标(X, Y, Z_i)($i=0, 1, 2, \dots, n, n$ 为搜索次数);然后,将物方搜索点投影到各匹配影像上得到一组像方待匹配像素,再利用像方基元匹配方法计算各组像点之间的相似度,并选择最大相似度对应的 Z_i 作为地面基元的高程值。从上述的传统多视影像铅垂线轨迹匹配方法的过程来看,其有如下3个缺点:(1)很难精确地设定搜索步距 ΔZ 的取值大小,无法保证搜索点一定经过实际的地物点。当 ΔZ 取值过大,会漏掉正确的候选点, ΔZ 取值过小,又会大幅增加匹配过程的计算时间;(2)在每一个地面基元处只能得到一个高程值,这对于同一个平面位置有多个高程值的竖直地物来说(例如房屋立面和电线杆等),显然得不到能反映实际地物在高程方向变化情况的真实结果;(3)对返回高程值的准确性缺少一个检验过程,无法保证匹配测度最大值一定对应正确的同名像点和真正的高程值。

因此,本文针对传统多视影像铅垂线轨迹法的不足,提出了一种新的基于物方定位一致性约束的地面元多视 VLL 匹配算法。本文对传统 VLL 方

法进行改进,首先,改善了物方地面基元的像方多视匹配过程,其次,利用地面基元已有的物方平面坐标作为物方定位一致性约束条件,增加了多视匹配结果的准确性检验过程,从而有效地解决了传统铅垂线轨迹匹配方法的 3 个缺陷。利用实际航空影像进行了对比实验,结果证明相比于传统方法,本文方法能得到更加可靠的地面元匹配结果。

2 基于物方定位一致性约束的地面元多视 VLL 匹配

2.1 总体思路

本文从候选点的搜索匹配和匹配结果的准确性检验这两个方面,对传统多视铅垂线轨迹法^[17]进行改进,提出了一种基于物方定位一致性约束

的新型多视铅垂线轨迹匹配方法(New Vertical Line Locus, NVLL)。本文方法的技术流程如图 1 所示,总体思路为:(1)根据物方地面基元的概略高程范围,利用影像的几何成像模型,确定地面基元在基准影像上的多个像方候选待匹配像点;(2)逐个取出每个待匹配像点,利用基于物方约束的多视影像匹配方法,进行像方基元的多视影像匹配;(3)对于步骤(2)得到的多视匹配结果,利用多视前方交会,计算像方匹配结果对应的地物点物方三维坐标,并将其与地面基元的已知物方平面坐标进行物方坐标的一致性验证,满足一致性验证的匹配结果作为地面基元的一组像方与物方结果;(4)重复步骤(2)与(3),直至地面基元的所有像方待匹配像点都完成多视影像匹配与物方坐标一致性检验这两个处理过程。

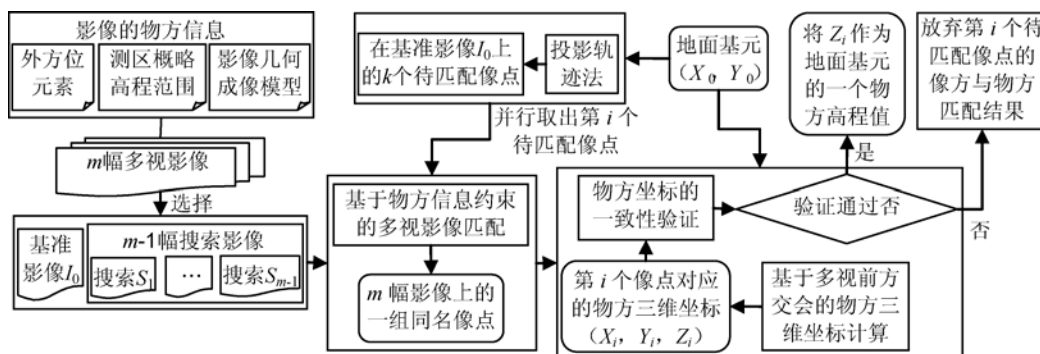


图 1 本文方法的流程图

Fig. 1 Flow chat of proposed approach

2.2 计算流程

对于已知物方平面坐标 (X_g, Y_g) 的地面基元 G , 及已知内外方位参数的 $m (m \geq 2)$ 幅影像 I_0, I_1, \dots, I_{m-1} (摄影中心分别为 C_0, C_1, \dots, C_{m-1}), 本文 NVLL 方法求解点 G 高程的具体步骤为:

(1) 在 m 幅影像中, 以一定的准则(人工指定或影像摄影中心离地面基元的平面距离最小), 选择 1 幅作为基准影像 I_0 , 余下 $m-1$ 幅为搜索影像 S_1, S_2, \dots, S_{m-1} 。

(2) 确定地面基元在基准影像上的多个像方候选待匹配像点。根据一定的先验知识, 确定点

G 的近似最低高程 Z_{\min} 与最大高程 Z_{\max} (此高程范围不需要很精确, 只需能包含地面基元的正确高程), 再利用式(1)所示的几何成像模型, 将点 $G_{\max}(X_g, Y_g, Z_{\max}), G_{\min}(X_g, Y_g, Z_{\min})$ 投影到基准影像上, 得到像点 $g_{\max}(r_1, c_1), g_{\min}(r_2, c_2)$, 则投影轨迹线 $g_{\max} g_{\min}$ 上的所有像点都是地面基元 G 在像方的候选待匹配像点。

$$(r, c) = F(X, Y, Z), \quad (1)$$

其中: (r, c) 为像点的像方行列坐标, (X, Y, Z) 为地物点的物方三维坐标。对于中心透视投影的航空影像, F 为共线条件方程, 其具体表达形式请参看摄影测量方面的相关文献[19]。

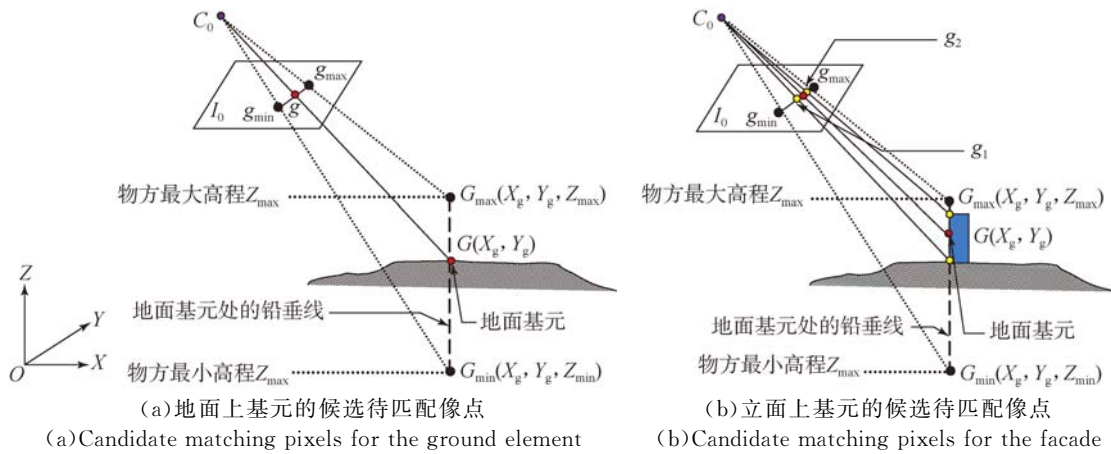


图 2 确定地面基元在像方的待匹配像点的示意图

Fig. 2 Sketch of confirming candidate matching pixels in image space for the ground element

根据基准影像上投影轨迹线的两个端点 g_{\max}, g_{\min} 的像方行列坐标,可以确定 $g_{\max} g_{\min}$ 的直线方程: $y = \kappa x + \gamma$,从而得到地面基元 G 在基准影像上所有 N 个候选待匹配像点的像方坐标 $(x_i, y_i), i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。斜率 κ 、截距 γ 及候选待匹配像点个数 N 的求解方法为:

当 $\text{abs}(c_2 - c_1) \geq \text{abs}(r_2 - r_1)$ 时,

$$\kappa = (r_2 - r_1) / (c_2 - c_1), \gamma = r_1 - \kappa \times c_1,$$

x_i 表示列号,其取值范围为 $[\min(c_1, c_2), \max(c_1, c_2)]$, y_i 表示行号, $N = \text{int}(c_2 - c_1 + 1)$ 。

当 $\text{abs}(c_2 - c_1) < \text{abs}(r_2 - r_1)$ 时,

$$\kappa = (c_2 - c_1) / (r_2 - r_1), \gamma = c_1 - \kappa \times r_1,$$

x_i 表示行号,其取值范围为 $[\min(r_1, r_2), \max(r_1, r_2)]$, y_i 表示列号, $N = \text{int}(r_2 - r_1 + 1)$ 。函数 int 表示取整数,函数 $\max()$ 和 $\min()$ 分别表示求解两个变量中的最小值和最大值, $\text{abs}()$ 表示求解绝对值。

在无遮挡的情况下,地面基元 G 在基准影像上的像点一定位于线段 $g_{\max} g_{\min}$ 上(如图 2 所示)。如果基元 G 位于地面上(图 2(a)),则线段 $g_{\max} g_{\min}$ 上只有一个候选点 g 为地面基元在像方的真正待匹配像点。如果基元 G 位于地物的立面上(图 2(b)),则线段 $g_{\max} g_{\min}$ 上的区间 $[g_1, g_2]$ 内的所有候选点都为地物立面的真正像点,即一个地面基元在像方有多个真正待匹配点。

(3) 候选待匹配像点的多视影像匹配。对于地面基元 G 在基准影像上 I_0 的第 i 个候选待匹配像点 $a_i(r_i, c_i)$,采用基于物方约束的多视影像匹配方法^[4],确定像点 a_i 在 $m-1$ 幅搜索影像 S_1 ,

S_2, \dots, S_{m-1} 上的同名像点 $b_i^1(r_i^1, c_i^1), b_i^2(r_i^2, c_i^2), \dots, b_i^{m-1}(r_i^{m-1}, c_i^{m-1})$ 。再根据此 m 个同名像点,利用基于多视前方交会的三维坐标计算原理^[4],可列出求解点 a_i 对应物方三维坐标 (X_i, Y_i, Z_i) 近似值改正数 (dX, dY, dZ) 的误差方程矩阵:

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{X} - \mathbf{L},$$

方程中的各矩阵变量的含义如下:

$$\mathbf{V}_{2m \times 1} = [V_r^1, V_c^1, V_r^2, V_c^2, \dots, V_r^m, V_c^m]^T,$$

$$\mathbf{X}_{3 \times 1} = [dX, dY, dZ]^T,$$

$$\mathbf{L}_{2m \times 1} = [r_1 - F_r^0, c_1 - F_c^0, \dots, r_m - F_r^0, c_m - F_c^0]^T,$$

$$\mathbf{B}_{2m \times 3} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_r^1}{\partial X} & \frac{\partial F_r^1}{\partial Y} & \frac{\partial F_r^1}{\partial Z} \\ \frac{\partial F_c^1}{\partial X} & \frac{\partial F_c^1}{\partial Y} & \frac{\partial F_c^1}{\partial Z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_r^m}{\partial X} & \frac{\partial F_r^m}{\partial Y} & \frac{\partial F_r^m}{\partial Z} \\ \frac{\partial F_c^m}{\partial X} & \frac{\partial F_c^m}{\partial Y} & \frac{\partial F_c^m}{\partial Z} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: F_r, F_c 是式(1)的几何成像模型函数 F 中关于像方坐标 (r, c) 的两个子函数, V_r, V_c 为第 k 幅影像上同名像点像方坐标的残差, $F_r^0, F_c^0, \frac{\partial F_r^k}{\partial X}, \frac{\partial F_r^k}{\partial Y}, \frac{\partial F_r^k}{\partial Z}, \frac{\partial F_c^k}{\partial X}, \frac{\partial F_c^k}{\partial Y}, \frac{\partial F_c^k}{\partial Z}$ 是基于第 k 幅影像的内外方位元素和几何成像模型,分别计算的地物点物方坐标的初始值 X^0, Y^0, Z^0 在第 k 幅影像上的近似像方坐标,及几何成像模型的两个子函数关于物方三维坐标的偏导数。 F_r, F_c 及误差方程中各个偏导数的具体表达式请查阅摄影测量方面的相关教材^[19]。根据误差方程矩阵,利用最小

幅为基准影像,其余两幅为搜索影像),由量测型数码航摄仪 UltraCam 相机在同一天拍摄,航拍高度为 3 600 m 左右,影像间的航向重叠度为 60%。影像的内方位元素如下:相机焦距 0.5 mm,像元尺寸 0.006 mm,像主点位置: $x=0$, $y=0.12$ mm。影像的像方尺寸为 $17\,310 \times 11\,310$ pixel,空间分辨率为 0.3 m,外方位元素已由数字摄影测量系统解算出来,影像覆盖区域的最小、最大高程范围是 $[-28, 188]$ (单位:m)。



图4 实验用的光学航空多视影像

Fig. 4 Experimental optical aerial multi-view images

在 Windows 10 环境下,采用 Visual C#.NET 2010 程序设计语言,对本文的新型多视铅垂线轨迹方法(NVLL)和传统的铅垂线轨迹方法(TVLL)进行了编程实现,并利用实验数据进行验证。算法验证的计算机配置为:Win10 64 位操作系统,Intel Core i5 2.5 GHz 处理器,内存 4 G。对比实验如下:

(1)从航空影像中,人机交互地量测了 10 个物方地面基元(略去量测点的 Z 坐标,形成平面坐标已知的物方地面基元;其中,5 个位于地面上的基元称为地面点,5 个位于建筑物立面上的基元称为立面点)。再分别利用 TVLL 和 NVLL 进行这些地面基元的多视影像匹配,获取这些地面基元对应的像方同名像点和物方三维坐标;NVLL 计算过程中的物方坐标一致性验证阈值 T 的设置情况如下:对于地面点,为 1 倍影像空间分辨率;对于立面点,为 2 倍影像空间分辨率。TVLL 计算过程中的物方高程搜索步距 ΔZ 设置为 0.001 m。最后,从算法运行时间、算法返回的地面基元对应的像点个数、算法返回的同名像点及其多视前方交会坐标与地面基元的实际值之间的差值等方面,定量评价 TVLL 和 NVLL 的实际匹配效果(两种方法的定量对比实验结果见表 1,其中, Dmd 表示地面点, Lmd 表示立面点)。TVLL

和 NVLL 这两种方法获取的地面基元的像方同名像点结果见图 5(彩图见期刊电子版),图中只给出了部分地面基元的像方匹配结果,其中,影像上的黄色十字丝的中心点表示地面基元的实际像点,红色叉形符号的中心点表示地面元匹配方法返回的像方结果。

(2)稠密地面基元的多视影像匹配的对比实验:首先,人机交互地从多视影像中量测 3 个或 4 个位于地面上的地面基元,再以影像的地面空间分辨率为分割尺度,将这几个地面基元对应的物方平面最大外接矩形区域进行规则格网划分,从而形成稠密的地面基元(两块局部航空影像中获取的稠密基元个数分别为 857 584 与 283 100)。其次,分别利用 TVLL 和 NVLL 进行所有地面基元的多视影像匹配,获取对应的稠密物方三维点云。最后,根据三维点云与实际地面场景之间的可视化效果差异,定性评价 TVLL 和 NVLL 的稠密匹配效果。NVLL 计算过程中的坐标一致性阈值 T 为 2 倍空间分辨率;TVLL 计算过程中的高程搜索步距 ΔZ 为 0.001 m。

表 1 中,物方铅垂线的实际像点个数是指经过物方地面基元的空间铅垂线在基准影像上的实际像点个数,这是根据地面基元在基准影像上的像点位置,人机交互统计出来(对于地面点,其物方铅垂线只对应一个像点;对于立面点,其物方铅垂线对应多个像点)。Min-ErrorR、Min-ErrorC 表示地面元匹配方法返回的各个像点的行列坐标 (r_i, c_i) 与地面元在基准影像上实际像点的行列坐标 (r_g, c_g) 之间的互差的最小值: $\text{Min-ErrorR} = \text{Min}\{r_i - r_g\}$, $\text{Min-ErrorC} = \text{Min}\{c_i - c_g\}$, $i \in \{1, \dots, n\}$, n 是地面元匹配方法返回的像方点个数(TVLL 只能返回一个结果,其 $n=1$;而 NVLL 可返回 1 个或多个结果,其 $n \geq 1$)。Min-ErrorP 表示地面元匹配方法返回的各个物方点与已知地面元之间的平面位置互差的最小值: $\text{Min-ErrorP} = \text{Min}\{\sqrt{(X_i - X_g)^2 + (Y_i - Y_g)^2}\}$ 。Min-ErrorH 表示地面元匹配方法返回的各个物方点的高程值与地面元实际高程值之间互差的最小值 $\text{Min-ErrorH} = \text{Min}\{Z_i - Z_g\}$ 。之所以只统计各类差异的最小值指标,是因为:实验中的地面基元是事先量测出来的,其在物方和像方分别只有一个实际位置;TVLL 方法只能返回一个像方和物方结果;即使地面基元处的空间铅垂线位于地物立面上时,其在像方的投影轨迹也不一定是水平

线或竖直线;而且,由于影像方位参数是有一定误差的,地物立面铅垂线上的各个同名像点经多视前方交会得到的物方平面坐标也不可能完全一

样。因此,只有各类差异的最小值才具有对比性,其能真实反映地面元匹配方法的返回结果是否严格经过了地面元的实际物方与像方位置。

表 1 TVLL 和 NVLL 在地面基元的多视影像匹配实验中的定量对比结果

Tab.1 Quantitative comparison results of TVLL and NVLL in the experiment of multi-view image matching for ground element

物方基元编号	物方铅垂线的实际像点数/个	基准影像上的候选待匹配点数/个	算法返回的像点个数/个		算法返回的像方结果与地面基元的实际像点之间的差异				算法返回的物方结果与地面基元的实际坐标之间的差异				运行时间/s	
			NVLL	TVLL	Min-ErrorR/pixel		Min-ErrorC/pixel		Min-ErrorP/pixel		Min-ErrorH/pixel			
					NVLL	TVLL	NVLL	TVLL	NVLL	TVLL	NVLL	TVLL	NVLL	TVLL
Lmd-1	65	461	51	1	0	-207	0	-16	0	0.217	0	96.451	9.2	34.9
Lmd-2	73	477	27	1	0	3	0	0	0	0.207	0	-1.918	9.3	35.0
Lmd-3	15	291	10	1	0	13	0	-2	0	0.178	0	-10.115	5.5	34.1
Lmd-4	57	489	21	1	0	62	0	3	0	0.220	0	-28.329	9.4	34.4
Lmd-5	38	461	20	1	0	0	0	-1	0	0.278	0	-0.447	9.2	35.4
Dmd-1	1	457	1	1	0	-2	0	-1	0	0.363	0	0.492	8.9	36.2
Dmd-2	1	339	1	1	0	-2	0	0	0	0.315	0	0.476	6.8	33.0
Dmd-3	1	345	1	1	0	-1	0	-1	0	0.231	0	0.099	6.9	34.6
Dmd-4	1	243	1	1	0	-1	0	-1	0	0.233	0	0.053	4.7	34.8
Dmd-5	1	81	1	1	0	-1	0	0	0	0.269	0	-0.534	1.6	36.0

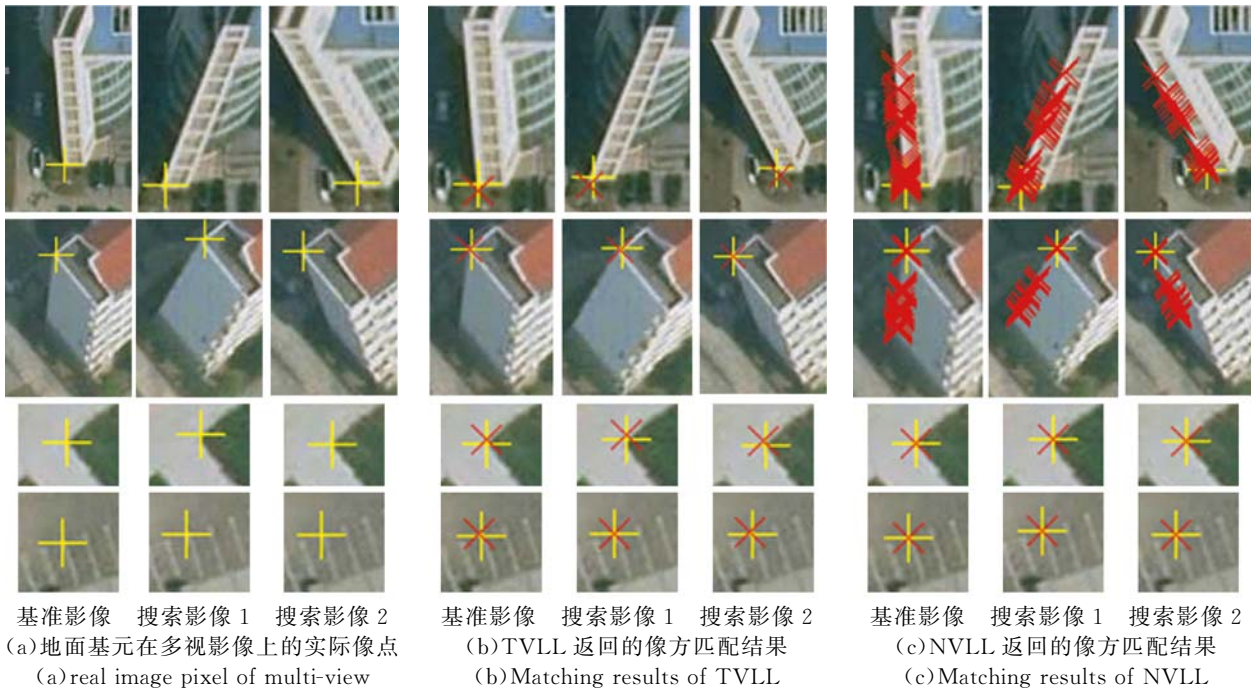


图 5 TVLL 和 NVLL 在地面基元的多视影像匹配实验中的像方结果对比

Fig.5 Comparative image-space results of TVLL and NVLL in the experiment of multi-view image matching for ground element

本文利用表 1 中的数据,按如下方式计算每种地面元匹配方法的可靠性、准确性和算法效率

等定量评价指标:利用“算法返回的像点个数”除以“物方铅垂线的实际像点数”作为算法的可靠性

指标;当 $(\text{Min-ErrorR} \leq 2 \ \& \ \text{Min-ErrorC} \leq 2) \ \& \ (\text{Min-ErrorP} \leq 2 \ \text{倍影像空间分辨率} \ \& \ \text{Min-ErrorH} \leq 2 \ \text{倍影像空间分辨率})$ 时,则认为方法的地面元匹配结果正确;否则,方法结果有误。因此,根据表1中的数据,可计算出本文 NVLL 方法和 TVLL 方法的平均可靠性指标分别是 77.16% 和 51.40%、平均准确性指标分别是 100% 和 60%、平均算法效率分别是 7.15" 和 34.84"。

从表1的地面基元的匹配实验结果中可以看出:无论是在像方,还是在物方,本文的 NVLL 方法的返回结果中都有一个点与实际值严格贴合;而 TVLL 方法的返回结果却无法与实际值保持一致。在算法的可靠性、准确性和算法效率等定量指标方面,NVLL 方法要比 TVLL 方法分别高出 26%、40% 和 4 倍。而且,对于位于立面上的物方基元,其本身就属于一个平面坐标对应多个高程值的情况,TVLL 方法却只能返回一个高程值,这根本不符合该物方基元处的实际高程分布状况。虽然,NVLL 方法也无法返回该物方基元对应的所有高程值,但其返回结果已能比较真实地反映了该物方基元处的实际高程分布状况。

NVLL 方法比 TVLL 方法更高效的原因在于:TVLL 方法的计算效率与测区的高程范围 $[Z_{\min}, Z_{\max}]$ 和高程搜索步距 ΔZ 有关,而 NVLL

方法的计算效率则和地面基元投影在基准影像上的候选待匹配像点个数有关。例如,本文实验中的航空影像数据,其高程范围为 $[-28, 188]$ (单位:m), ΔZ 为 0.001 m,则 TVLL 方法至少需要计算 $(188 - (-28)) / 0.001 = 216\ 000$ 个点对之间的匹配测度,而 NVLL 方法最多只需计算 489 个待匹配点的匹配过程。虽然 NVLL 方法中每个待匹配点仍对应多个候选同名像点,但总的计算次数仍大大少于 TVLL 方法的计算次数。而且,在 NVLL 方法的计算过程中,各个待匹配点的匹配过程是独立的,这非常易于算法的并行实现,从而得到更高的计算效率。

稠密地面基元的多视匹配结果见图6,图6(a)是稠密地面基元在基准影像上对应的局部影像,图6(b)是 TVLL 和 NVLL 两种方法生成的物方三维点云的对比结果。从图6的实验结果更加明显地看出:NVLL 方法比 TVLL 方法能更加真实地获取地物的三维点云。例如,在图6的几个椭圆形符号区域之内是建筑物,但 TVLL 方法返回的物方三维点云在这些区域失真严重,几乎看不出建筑物的效果;而本文的 NVLL 方法返回的物方三维点云却较好地呈现出建筑物的实际形状。对于图6中矩形符号区域之内的地面上地物,NVLL 方法也比 TVLL 方法具有更高的保真度。

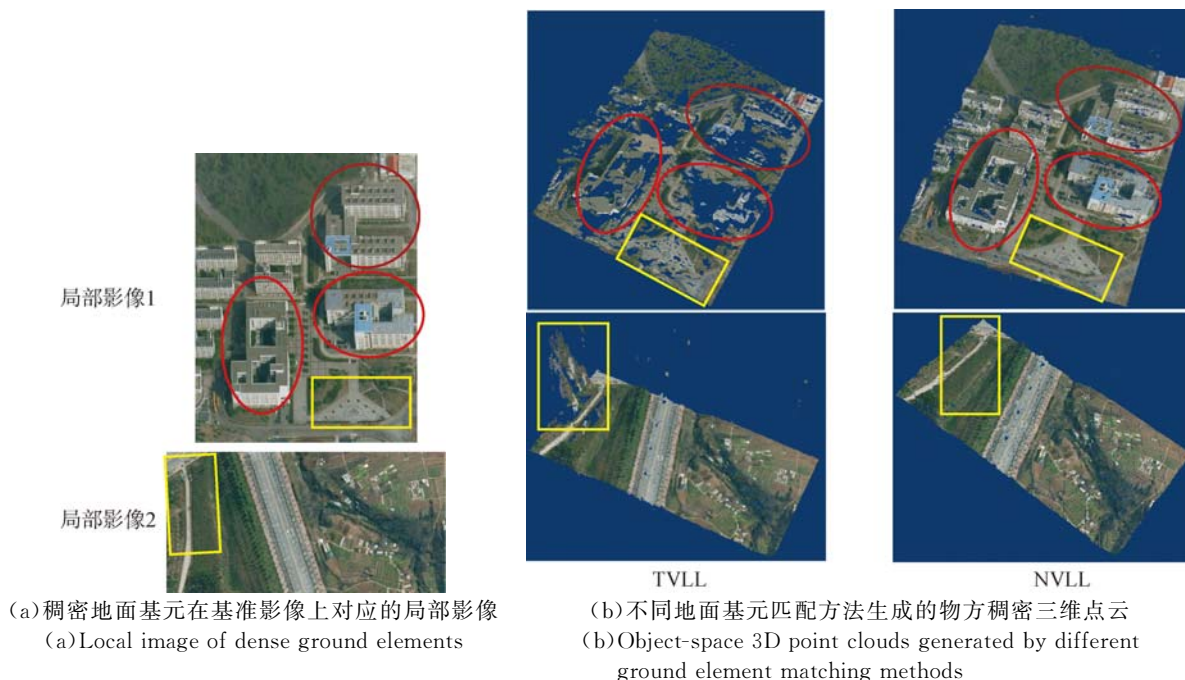


图6 稠密地面基元匹配实验中的不同地面基元匹配方法生成的物方三维点云结果对比

Fig. 6 Comparison results of object-space 3D point clouds generated by different ground element matching methods in the experiment of dense ground elements matching

因此,从以上实验结果可知,对于如下两种类型的地面基元:位于地面上的地面基元(一个平面坐标对应一个高程值)和位于地物的立面上的地面基元(一个平面坐标对应多个高程值,如,房屋的立面,电线杆,等),相比于 TVLL 方法,本文 NVLL 方法可以得到更加符合地面基元处实际地物分布情况的高程结果。这主要是因为 NVLL 方法中增加了物方坐标一致性验证过程,其可有效地滤除物方铅垂线上的虚假候选待匹配点对物方基元匹配结果的影响。而在 TVLL 方法中,仅依据相似性测度的大小只能从物方铅垂线上的各个高程搜索点中留下一个点作为最终的返回结果,但这个最终高程结果的准确与否无法检验,其在各幅影像上的像点可能根本就不是同名像点。

4 结 论

本文针对传统 VLL 方法的不足,进行了针对性的改进,提出了一种具有准确性验证过程且

可返回多个高程值的新型多视影像铅垂线轨迹匹配方法 NVLL。本文方法具有如下的特点:融合使用了地面基元的物方信息和多视影像的像方信息进行匹配计算,保证了匹配的时间效率和候选像点的有效性。对处理结果增加了物方坐标的一致性验证,可有效地消除误匹配结果的影响,提高地面元的多视影像匹配结果的可靠性。方法中多个待匹配像点的匹配计算是并行过程,便于多台计算机的并行处理,利于大范围区域内稠密地面基元的高效快速处理。

利用实际航空多视影像对本文算法进行了实验检验,结果表明本文所提出的 NVLL 算法有效弥补了传统 VLL 方法的不足,能得到更加符合物方基元处实际地物分布情况的高程值;且比传统方法具有更高的可靠性、准确性与计算效率。本文算法作为对数字摄影测量影像匹配方法的扩展,可为区域或全球数字表面模型的自动构建等应用提供可行的算法工具,在基于摄影测量的空间三维信息采集领域具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] GRUEN A. Development and status of image matching in photogrammetry [J]. *The Photogrammetric Record*, 2012, 27(137):36-57.
- [2] LI G Y, TANG X M, GAO X M, et al.. ZY-3 block adjustment supported by glas laser altimetry data [J]. *The Photogrammetric Record*, 2016, 31(153):88-107.
- [3] ZHANG K, SHENG Y H, LV H Y. Extraction of road traffic sign information based on vehicle-borne mobile photogrammetric system [J]. *The Photogrammetric Record*, 2015, 30(150):187-210.
- [4] 张卡,盛业华,孟微波,等. 基于多视影像匹配的三维彩色点云自动生成[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(7):1840-1849.
ZHANG K, SHENG Y H, MENG W B, et al.. Automatic generating three dimensional colored point clouds based on multi-view image matching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7):1840-1849. (in Chinese)
- [5] GERKE M, XIAO J. Fusion of airborne laser scanning point clouds and images for supervised and unsupervised scene classification [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2014, 87:78-92.
- [6] 雷金周,曾令斌,叶南. 工业机器人单目视觉对准技术研究 [J]. *光学 精密工程*, 2018, 26(3):733-741.
LEI J ZH, ZENG L B, YE N. Research on industrial robot alignment technique with monocular vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(3):733-741. (in Chinese)
- [7] 张卡,盛业华,叶春. 基于数字视差模型和改进 SIFT 特征的数字近景立体影像匹配[J]. *测绘学报*, 2010, 39(6):624-630.
ZHANG K, SHENG Y H, YE CH. Digital close-range stereo image matching based on digital parallax model and improved SIFT feature [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(6):624-630. (in Chinese)
- [8] 韦春桃,张祖勋,张剑清,等. 分层 Fourier-Melin 变换相位相关的影像匹配初始视差的自动获取方法[J]. *武汉大学学报. 信息科学版*, 2015, 40(4):452-456.
WEI CH T, ZHANG Z X, ZHANG J Q, et al.. A method for automatically determining parallax of image matching based on layered Fourier-Melin phase correlation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 21(7):1840-1849. (in Chinese)
- [9] 赵岩,陈月,王世刚. 结合投影误差校正的快速

- SIFT 图像拼接[J]. 光学精密工程, 2017, 25(6): 1645-1651.
- ZHAO Y, CHEN Y, WANG SH G. Corrected fast SIFT image stitching method by combining projection error [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6): 1645-1651. (in Chinese)
- [10] HU T, GUO B X, WU H Y, *et al.*. Dense corresponding pixel matching between aerial epipolar images using an RGB-belief propagation algorithm [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(6):1036-1040.
- [11] YANG Y, LIU Q, LIU H, *et al.*. Dense depth image synthesis via energy minimization for three-dimensional video [J]. *Signal Processing*, 2015, 112:199-208.
- [12] 张永军, 王博, 黄旭, 等. 影像匹配粗差的局部矢量面元剔除方法[J]. 测绘学报, 2014, 43(7):717-723.
- ZHANG Y J, WANG B, HUANG X, *et al.*. Eliminating of image matching gross errors based on local vector field [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(7):717-723. (in Chinese)
- [13] 朱遵尚, 苑云, 李由, 等. 嫦娥一号月面成像的高精度匹配及月貌三维重建[J]. 光学学报, 2014, 34(2):0211002_1-0211002_9.
- ZHU Z SH, YUAN Y, LI Y, *et al.*. High precision matching and 3D surface reconstruction of Chang' E 1 lunar images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2):0211002_1-0211002_9. (in Chinese)
- [14] ZHANG Y J, WANG B, ZHANG Z X, *et al.*. Fully automatic generation of geoinformation products with Chinese ZY-3 satellite imagery[J]. *The Photogrammetric Record*, 2014, 29(148):383-401.
- [15] 郑顺义, 张祖勋, 张剑清. 基于物方影像匹配和概率松弛的断面自动提取[J]. 测绘信息与工程, 2004, 29(2):26-27.
- ZHENG SH Y, ZHANG Z X, ZHANG J Q. Automatic profile extraction based on object space image matching and probability relaxation algorithm [J]. *Journal of Geomatics*, 2004, 29(2):26-27. (in Chinese)
- [16] ZHANG L, GRUEN A. Multi-image matching for DSM generation from IKONOS imagery [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 60(3):195-211.
- [17] 纪松, 范大昭, 张永生, 等. 多视匹配 MVLL 算法及其在 ADS40 线阵影像中的运用[J]. 武汉大学学报. 信息科学版, 2009, 34(1):28-31.
- JI S, FAN D ZH, ZHANG Y SH, *et al.*. MVLL multi-image matching model and its application in ADS40 linear array images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1):28-31. (in Chinese)
- [18] 王竞雪, 朱庆, 王伟奎. 多匹配基元集成的多视影像密集匹配方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(5):691-698.
- WANG J X, ZHU Q, WANG W X. A dense matching algorithm of multi-view image based on the integrated multiple matching primitives [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(5):691-698. (in Chinese)
- [19] 王佩军, 徐亚明. 摄影测量学(第二版)[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010:60.
- WANG P J, XU Y M. *Photogrammetry (2 edition)* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010: 608. (in Chinese)

作者简介:



张卡(1981—),男,安徽五河人,博士,副教授,硕士生导师,2002年、2005年于中国矿业大学分别获得学士、硕士学位,2008年于南京师范大学获得博士学位,主要从事数字摄影测量与图像信息提取等方面的研究。E-mail: zhangka81@126.com



盛业华(1965—),男,安徽庐江人,博士,教授,博士生导师,1986年、1989年和1997年于中国矿业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事3D GIS数据模型、基于图像的3D数据采集、3D模型构建等方面的研究。E-mail: shengyehua@njnu.edu.cn