

无人机影像区域网平差精度研究

敬小东¹ 鲁恒^{2,3*} 许辉熙¹ 张镭漓^{2,3}

¹四川建筑职业技术学院测绘工程系, 四川 德阳 618000

²四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065

³四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065

摘要 轻型无人机以其机动灵活的特点,能够适应地形复杂、多云雾地区的飞行任务。但是由于其镜头小,获取的影像具有像幅小、数量多、基线短、重叠度不规则等特点,使得在进行区域网平差时和传统的航空影像有所不同。为解决无人机影像区域网平差工作量大、精度不高的问题,对获取的无人机影像进行了常规光束法区域网平差试验,利用无人机机载POS数据进行POS辅助光束法区域网平差,针对无人机获取的原始POS数据精度不高的问题,通过在区域网内布设少量控制点,建立POS数据改正模型,从而获取POS数据误差改正参数,对原始POS数据进行改正。提出了一种利用改正后POS数据辅助区域网平差的方法,并对三种方法的精度进行了评定。研究表明,常规方法的精度要优于直接利用原始POS数据的方法,利用改正后POS数据的方法在精度上接近常规方法,同时提高了区域网平差的效率。

关键词 无人机影像;POS数据;区域网平差;精度分析

中图分类号 P231.5 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.061001

Study on the Precision of Block Adjustment Based on Unmanned Aerial Vehicle Imagery Data

Jing Xiaodong¹ Lu Heng^{2,3} Xu Huixi¹ Zhang Leili^{2,3}

¹Geomatics Engineering Department Sichuan College of Architectural Technology, Deyang, Sichuan 618000, China

²State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

³College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract With the characteristic of flexibility, unmanned aerial vehicles (UAV) can adapt to the flight mission of complex terrain in cloudy area. But because the lens are short and the obtained image with the characteristics of small size, large number, short baseline and irregular overlapping degree, this method is different from the one processing traditional aviation image. In order to solve the precision of block adjustment which is not high and the heavy workload of image processing based on UAV image. We took several methods, first of all, the image data acquired by UAV are processed using the conventional block adjustment method, and then the POS-supported block adjustment method is used based on the original POS data. For the problem of low accuracy of the original POS data obtained by UAV, POS data correction model is established and POS data error correction parameter are acquired by layout a small amount of the control points in regional network, and a POS-supported block adjustment method is proposed based on the corrected POS data. Experimental results show that the precision of the conventional method is superior to the method of using original POS data directly, the precision of the corrected POS data method is close to the conventional method, at the same time, the efficiency of the block adjustment is improved.

收稿日期: 2013-12-04; 收到修改稿日期: 2014-01-07; 网络出版日期: 2014-05-20

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAJ05A13)、中央高校基本科研业务费(2013SCU11006)、德阳市重点科技支撑计划项目(2013ZZ074-05)

作者简介: 敬小东(1984—),男,讲师,主要从事测绘与“3S”技术应用等方面的研究。E-mail:306663183@qq.com

*通信联系人。E-mail: luheng@scu.edu.cn

Key words unmanned aerial vehicle image; position and orientation system data; block adjustment; precision analysis
 OCIS codes 100.2960; 100.3020; 100.4145

1 引言

轻型无人机具有机动灵活、成本低、操作维护简单等特点,适合在建筑物密集的城区和地形复杂的丘陵、多云雾地区应用。轻型无人机搭载的高精度数码成像设备,具备面积覆盖、垂直或倾斜成像的技术能力,获取影像的空间分辨率达到厘米级,适于 1:10000 或更大比例尺遥感应用的需求^[1-4]。但是其获取的影像存在像幅小、数量多、基线短、重叠度不规则且倾角过大等问题,因此对其获取影像的处理方法和常规的遥感图像有一定的区别^[5]。摄影测量区域网平差至少需要两种观测值:控制点的地面坐标和加密点的像平面坐标。其中,相邻影像间的连接点精度决定区域网的几何强度,屏幕量测的控制点精度直接决定了平差结果的质量^[6]。POS(Position and Orientation System)系统即 GPS(Global Positioning System)/INS(Inertial Navigation System)组合导航系统,利用该系统可以获取摄影曝光时刻数码相机的空间位置和姿态,该数据可以直接用作航空影像定向的外方位元素^[7-9]。POS 利用轻型无人机上搭载的双频动态 GPS 接收机,采用载波相位动态 GPS 定位技术测定摄站的空间位置,利用惯性测量装置测定相机的姿态角。无人机影像有其自身特点,使得在进行区域网平差时工作量较大、精度不高,还很难实现利用原始 POS 数据直接地理定位。针对此问题,本文利用获取的无人机影像数据通过常规光束法区域网平差、POS 数据辅助光束法区域网平差、改正后 POS 数据辅助光束法区域网平差试验,通过对比其精度和效率,分析总结了各自的优缺点,最后就如何提高 POS 法精度提出了一些建议。

2 研究方法

光束法区域网平差是一种以像点坐标为观测值、单张影像光束为平差单元的摄影测量加密方法。其理论基础为像点-投影中心-物点位于一条直线的中心投影共线条件方程。利用像点坐标计算相应的地面点坐标,首先应建立像点在不同的空间直角坐标系之间的坐标变换关系。当已知若干像点和物点时,可用它来解算拍摄时像片的方位;当已知立体像对两张像片的方位元素时,可用它来解算物点坐标;当已知像片方位和物点坐标时,可用它来计算像点坐标。

$$\begin{cases} x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

式中 x, y 为以像主点为原点的像平面坐标; f 为像片主距; X, Y, Z 为物点的地面坐标; X_s, Y_s, Z_s 为外方位线元素; $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ 为外方位角元素表示的方向余弦。

普通的数码相机并不是专门为摄影测量而设计的,它没有准确地测定内方位元素,且透镜的排列也没有进行严格的校正,所以拍摄得到的数字图像存在着光学畸变。因此,在进行区域网空中三角测量前,需要先进行像点坐标畸变差改正。在焦距固定的情况下,镜头畸变属于系统误差,它对每幅图像所产生的影响是相同的。引入畸变差后的共线方程为:

$$\begin{cases} x - x_0 + \Delta x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)} \\ y - y_0 + \Delta y = -f \frac{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (2)$$

常规区域网平差方法是以像点坐标为观测值,地面点坐标和影像外方位元素为待定参数。如果一个待定点跨了 n 张像片,则可以列出 $2n$ 个误差方程,将所有待定点的误差方程组成法方程,解出每个待定点的地面坐标。由于无人机搭载了 POS 系统,利用该系统可以获取摄影曝光时刻数码相机的空间位置和姿态,该数据可以直接用作航空影像定向的外方位元素^[10-11],因此可以将 POS 数据纳入到区域网平差解算过程中。但是,由于无人机航拍受外界影响较大,同时受载荷的限制不能搭载高精度 GPS,因此机载原始 POS 数据通

常含有大量粗差,直接将原始POS数据纳入到区域网平差中可能会产生较大误差,若能对原始POS数据进行改正,并将改正后POS数据纳入到区域网平差中能提高解算精度,POS数据改正具体思路如下:由目前的平差软件获取影像精确的外方位元素,将精确的外方位元素与机载原始POS所获取的外方位元素进行比较,从而得到POS数据误差的改正参数。这种方法避免了复杂的光束法区域网平差计算,无需对现有的平差软件进行改动。本文采用这种方法获取POS数据的误差改正参数,所采用的方法流程如图1所示。

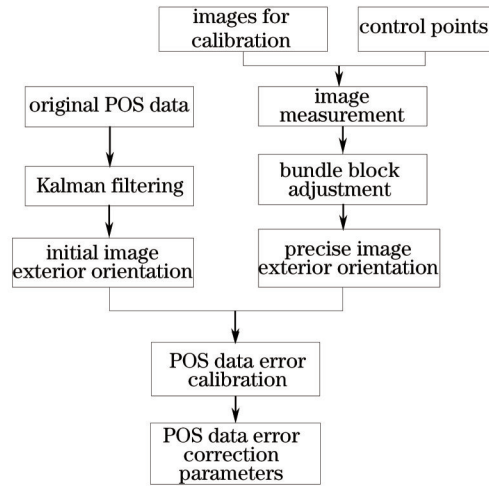


图1 无人机机载POS数据纠正

Fig.1 Correction of original UAV POS data

在测区的四角及中心地带布设若干控制点,利用已知的地面控制点坐标值求解出相应影像的外方位元素,从而建立外方位元素改正模型:

$$\begin{cases} \Delta X_p = [(X_1 - X_{p1}) + (X_2 - X_{p2}) + \dots + (X_n - X_{pn})]/n \\ \Delta Y_p = [(Y_1 - Y_{p1}) + (Y_2 - Y_{p2}) + \dots + (Y_n - Y_{pn})]/n \\ \Delta Z_p = [(Z_1 - Z_{p1}) + (Z_2 - Z_{p2}) + \dots + (Z_n - Z_{pn})]/n \\ \Delta \Phi_p = [(\Phi_1 - \Phi_{p1}) + (\Phi_2 - \Phi_{p2}) + \dots + (\Phi_n - \Phi_{pn})]/n \\ \Delta \Omega_p = [(\Omega_1 - \Omega_{p1}) + (\Omega_2 - \Omega_{p2}) + \dots + (\Omega_n - \Omega_{pn})]/n \\ \Delta K_p = [(K_1 - K_{p1}) + (K_2 - K_{p2}) + \dots + (K_n - K_{pn})]/n \end{cases} \quad (3)$$

其中 $X_1, Y_1, Z_1, \Phi_1, \Omega_1, K_1$ 为解算出的第1张影像的外方位元素值, $X_n, Y_n, Z_n, \Phi_n, \Omega_n, K_n$ 为解算出的第 n 张影像的外方位元素值, $X_{p1}, Y_{p1}, Z_{p1}, \Phi_{p1}, \Omega_{p1}, K_{p1}$ 代表第1张影像的初始外方位元素值, $X_{pn}, Y_{pn}, Z_{pn}, \Phi_{pn}, \Omega_{pn}, K_{pn}$ 代表第 n 张影像的初始外方位元素值, n 代表参与运算的影像张数。

根据(3)式即可得到POS数据误差改正参数 $\Delta X_p, \Delta Y_p, \Delta Z_p, \Delta \Phi_p, \Delta \Omega_p, \Delta K_p$, 利用求得的改正参数即可将原始机载POS数据的线元素和角元素进行改正。

综上所述,本文的试验过程如下:

- 1) 影像数据获取:以无人机为遥感平台,设计包含整个实验区的飞行航线进行数据获取。
- 2) 影像数据质量检查与畸变差校正:对获取的无人机影像进行质量检查,包括航向、旁向重叠度、航线弯曲度等,若影像合格则对影像进行畸变差校正。
- 3) 机载原始POS数据改正:通过布设少量控制点获取POS数据改正参数,对机载原始POS数据进行改正。
- 4) 无人机影像区域网平差精度对比分析:选取实验区域,分别进行常规光束法区域网平差、POS数据辅助光束法区域网平差、加入改正参数后POS数据辅助光束法区域网平差,选取检查点对区域网平差精度进行评定,并分析总结产生误差的原因。

3 实验

3.1 影像的自动获取

在彭州市北部进行了大比例尺轻型无人机遥感影像的获取实验。该实验区地处成都平原与龙门山过

渡地带,属于山地丘陵地区,实验区的地质构造较为复杂,高差较大,整个地势为西北高东南低,最高海拔1320 m,最低海拔623 m,多云雾。本次试验采用 Cannon EOS 450D 数码相机,镜头焦距为24 mm。采用650 m的相对航高进行拍摄,预设航向重叠度75%,旁向重叠度35%,影像地面分辨率约0.14 m。并且,航向和旁向的重叠度都达到了预设重叠度的要求。图2为获取的相邻影像,其中(a)和(b),(c)和(d)为旁向相邻,(b)和(c)为航向相邻。

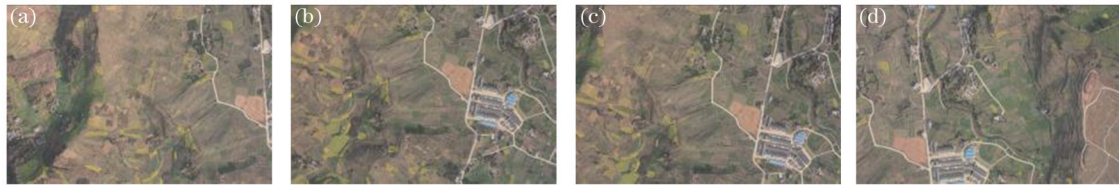


图2 无人机获取的相邻影像

Fig.2 Adjacent images obtained by UAV

3.2 区域网平差精度评定

3.2.1 常规光束法区域网平差

光束法区域网平差的基本思想是待定点与控制点的像点与摄影中心及相应地面点均构成一条光束^[4]。它以每张像片所组成的一条光束为平差的基本单元,以共线方程为平差基础方程。以像点坐标为观测值,地面点坐标和影像外方位元素为待定参数。如果一个待定点跨了 n 张像片,则可以列出 $2n$ 个误差方程,将所有待定点的误差方程组成法方程,解出每个待定点的地面坐标。以本次无人机获取的影像为试验数据,利用该方法获得的区域网平差结果如表1所示,其中RMSE表示均方根误差。

表1 检查点精度

Table 1 Precision of check points

Check points ID	Actual coordinates /m			Measured coordinate /m			Errors of coordinate /m			
	X	Y	Z	X'	Y'	Z'	dX	dY	dZ	
121	***.587	****.486	***.806	***.495	****.539	***.578	-0.092	0.053	-0.228	
122	***.909	****.618	***.428	***.863	****.514	***.086	-0.046	-0.104	-0.342	
123	***.808	****.641	***.361	***.754	****.543	***.890	-0.054	-0.098	0.529	
124	***.362	****.717	***.889	***.241	****.593	***.008	-0.121	-0.124	-0.881	
125	***.501	****.468	***.146	***.609	****.511	***.220	0.108	0.043	0.074	
126	***.376	****.876	***.509	***.286	****.907	***.275	-0.090	0.031	-0.234	
127	***.252	****.621	***.421	***.259	****.714	***.499	0.007	0.093	0.078	
128	***.698	****.343	***.643	***.594	****.442	***.756	-0.104	0.099	0.113	
129	***.167	****.538	***.474	***.214	****.409	***.089	0.047	-0.129	-0.385	
RMSE				$m_x=0.087$	$m_y=0.098$	$m_z=0.093$	$m_z=0.426$			

3.2.2 POS数据辅助光束法区域网平差

将POS影像定向参数与像点坐标观测值加地面控制点进行摄影测量与非摄影测量观测值的联合平差,求解加密点坐标。其基本原理是,以像点坐标、GPS摄站坐标和IMU(Inertial measurement unit)姿态角为观测值,以地面控制点坐标、影像外方位元素以及各种系统误差改正数为待定参数,根据测量精度对像点坐标、POS系统提供的GPS摄站坐标及IMU姿态角赋予不同的权,用最小二乘法求解地物点的三维坐标和影像外方位元素的最或然值。其作业流程如图3所示。

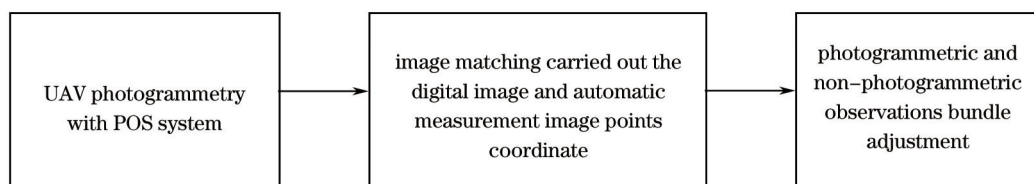


图3 POS系统数据处理流程

Fig.3 Process of POS system data processing

同样以常规光束法区域网平差的数据为例,其平差结果如表2所示。

表2 检查点精度

Table 2 Precision of check points

Check points ID	Actual coordinates /m			Measured coordinate /m			Errors of coordinate /m		
	X	Y	Z	X'	Y'	Z'	dX	dY	dZ
121	***.587	****.486	***.806	***.413	****.972	***.646	-1.174	-0.514	-1.16
122	***.909	****.618	***.428	***.673	****.837	***.004	-0.236	-0.761	-1.424
123	***.808	****.641	***.361	***.797	****.157	***.152	-1.041	0.516	-1.209
124	***.362	****.717	***.889	***.129	****.034	***.253	0.337	-0.713	-1.636
125	***.501	****.468	***.146	***.998	****.400	***.229	0.497	-1.068	-0.917
126	***.376	****.876	***.509	***.375	****.227	***.572	0.599	0.967	1.063
127	***.252	****.621	***.421	***.774	****.211	***.739	0.522	0.99	1.318
128	***.698	****.343	***.643	***.518	****.802	***.515	-0.38	-0.228	-1.128
129	***.167	****.538	***.474	***.374	****.526	***.571	-0.793	-1.072	-0.903
RMSE				$m_x=0.690$ $m_y=0.808$ $m_{xy}=0.751$ $m_z=1.216$					

3.2.3 加入改正数后 POS 数据辅助光束法区域网平差

由于无人机航测受外界影响较大,同时受载荷的限制不能搭载高精度 GPS,因此机载原始 POS 数据通常含有大量粗差,直接将原始 POS 数据纳入到区域网平差的解算中精度有很大降低(见表1和表2),因此,需要对原始 POS 数据进行改正。

具体采用的方法为:利用布设的地面控制点坐标值求解出相应影像的外方位元素,根据(3)式计算出 POS 数据改正参数,然后对原始 POS 数据进行改正。为保证后续展绘控制点的精度,首先对纠正前与纠正后的 POS 数据精度情况进行了比较分析,所采用的参考数据为完成区域网平差后反算的外方位元素准确值。将 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 、 $\Delta \Phi$ 、 $\Delta \Omega$ 、 ΔK 定义为纠正前、纠正后的 POS 数据与完成区域网平差后反算的外方位元素准确值的差值,结果如表3所示。

表3 未纠正与纠正后 POS 数据精度比较

Table 3 Precision comparison of uncorrected and corrected POS data

	Image ID	ΔX /m	ΔY /m	ΔZ /m	$\Delta \Phi$ /($^\circ$)	$\Delta \Omega$ /($^\circ$)	ΔK /($^\circ$)
Uncorrected	6	5.875	7.256	-8.301	-2.528	3.896	2.901
	8	8.367	8.530	6.798	3.007	2.235	3.478
	68	-5.589	-7.435	-6.441	4.679	-3.890	3.897
	69	7.342	6.344	7.439	2.620	2.567	-4.586
	121	6.566	-8.490	5.274	-3.678	-3.567	-3.901
Corrected	6	0.990	-1.457	-0.844	0.940	-0.646	-0.739
	8	-0.734	-1.319	1.390	0.759	1.056	0.983
	68	-1.207	1.570	0.998	-0.907	0.745	0.844
	69	-0.785	0.866	-0.724	-0.945	-0.521	-1.104
	121	1.240	1.341	1.507	1.045	0.934	1.049

利用改正后 POS 数据辅助进行区域网平差,结果如表4所示。

表4 检查点精度

Table 4 Precision of check points

Check points ID	Actual coordinates /m			Measured coordinate /m			Errors of coordinate /m		
	X	Y	Z	X'	Y'	Z'	dX	dY	dZ
121	***.587	****.486	***.806	***.754	****.766	***.389	0.167	0.28	0.583
122	***.909	****.618	***.428	***.783	****.829	***.912	-0.126	0.211	0.484
123	***.808	****.641	***.361	***.513	****.832	***.983	-0.295	0.191	0.622
124	***.362	****.717	***.889	***.541	****.401	***.544	0.179	-0.316	0.655
125	***.501	****.468	***.146	***.321	****.689	***.894	-0.18	0.221	0.748
126	***.376	****.876	***.509	***.501	****.536	***.237	0.125	-0.34	0.728
127	***.252	****.621	***.421	***.487	****.455	***.075	0.235	-0.166	-0.346
128	***.698	****.343	***.643	***.821	****.610	***.234	0.123	0.267	0.591
129	***.167	****.538	***.474	***.414	****.277	***.979	0.247	-0.261	0.505
RMSE				$m_x=0.207$ $m_y=0.272$ $m_{xy}=0.241$ $m_z=0.633$					

4 试验结果分析

1) 从精度方面来看,常规的区域网平差方法要高于后面两种利用 POS 数据辅助区域网平差方法,但是常规的区域网平差方法需要大量的地面控制点,这对于地形复杂的山区来说是很困难的。利用 POS 数据的方法虽然精度不如常规方法高,但是它只需要少量的地面控制点。在山区作业的时候,利用这种方法可以有效减少地面控制点个数,既减少了外业的劳动强度,又提高了工作效率。

2) 从试验结果看,三种方法的高程精度都要低于平面精度,这是由于该区的地形起伏较大,另外由于没有采用立体设备,所以在数据处理的时候对高程变化的敏感度较低。

3) 从外业控制点选取上来看,在选择地面控制点的时候,既要考虑到它的地面特征,又要考虑到它在影像上的重叠度。前者是为了方便在影像上准确地量测出其位置,而后者则是为了使该控制点在区域网平差中的权重更大。试验证明,量测一个 3°重叠和量测一个 4°重叠的控制点,对提高系统精度所起的作用是不一样的。

4) 从最终结果来看,利用 POS 提供的外方位元素来做区域网平差,其精度要低于常规的区域网平差方法,其主要原因在与 POS 提供的外方位元素的精度不够。因为光束法区域网平差,其外方位元素的初始值是很重要的,精度不高的初始值直接影响其收敛速度,有时甚至会导致迭代不收敛。此次试验区域为山区且地形复杂,高差较大,因此机载 GPS 在摄影测量过程中可能出现信号失锁现象,外界环境对信号的干扰也很严重,虽然经过处理,但是其残差并没有完全消除,使其提供的外方位线元素精度大打折扣,从而导致区域网平差的精度大幅下降。通过布设少量控制点,进行原始 POS 数据改正,利用改正后 POS 数据的方法在精度上接近常规方法,同时提高了区域网平差的效率。

5 结 论

通过研究可发现,采用常规光束法区域网平差解算具有较高精度,但需要有足够多的控制点作保障,这增加了外业劳动强度,降低了影像处理效率;直接将无人机机载 POS 数据提供的外方位元素纳入到区域网平差的解算中,其精度不能满足大比例尺成图规范要求;利用少量控制点对原始无人机机载 POS 数据进行改正,将改正后的 POS 数据纳入区域网平差的解算中,既提高了平差精度,又提高了效率。随着轻型无人机性能的不断改进、GPS/IMU 设备的不断改善,其瞬时定位和测姿的精度将会不断的提高,最终将真正实现无地面控制的空中三角测量。

参 考 文 献

- 1 Andrea S Laliberte, Albert Rango. Texture and scale in object-based analysis of subdecimeter resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(3): 761-770.
- 2 He Jing, Li Yongshu, Lu Heng. Experimental study on UAV image stitching error [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(12): 121001.
何 敬, 李永树, 鲁 恒. 无人机影像拼接误差实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(12): 121001.
- 3 Tang Min, Li Yongshu, Wang Shengming. Research of distortion correction based on UAV images [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 061102.
唐 敏, 李永树, 王生明. 基于无人机影像的畸变校正研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 061102.
- 4 Lu Heng, Li Yongshu, He Jing, *et al.*. A automatic mosaic method in unmanned aerial vehicle images based on featurepoints [J]. Geography and Geo-information Science, 2010, 26(5): 16-19.
鲁 恒, 李永树, 何 敬, 等. 一种基于特征点的无人机影像自动拼接方法[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(5): 16-19.
- 5 Andrea S Laliberte, Jeffrey E Herrick, Albert Rango, *et al.*. Acquisition, or thorectification, and object-based classification of unmannedAerial vehicle (UAV) imagery for rangeland monitoring [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2010, 48(6): 661-672.
- 6 Wang Conghua, Lin Zongjian. A reseach on aerotriangulation in UAVRS image [J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(4): 41-43.
王聪华, 林宗坚. UAVRS 影像空中三角测量实验研究[J]. 测绘科学, 2007, 32(4): 41-43.
- 7 Yuan Xiuxiao, Ming Yang. Automatic extraction of image tie points for aerial digital frame imagery with large overlap

- [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(5): 505-508.
袁修孝, 明 洋. 大重叠度面阵航空数码影像的自动转点[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(5): 505-508.
- 8 Legat K. Approximate direct georeferencing in national coordinates [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2006, 60(44): 239-255.
- 9 Jin Zhonghua, Cui Hongxia. The detection and correction of digital camera's radial distortion [J]. Science Mosaic, 2008, (10): 118-120.
金仲华, 崔红霞. 数字相机径向畸变差检测及改正[J]. 科技广场, 2008, (10): 118-120.
- 10 Li Deren, Zheng Zhaobao. 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.
- 11 Yuan Xiuxiao. Modern methodologies for photogrammetric point determination [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(11): 1001-1006.
袁修孝. 当代航空摄影测量加密的几种方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(11): 1001-1006.