引文格式：黄惠, 麦瑜潇. PPK 技术在危岩落石区的应用与精度分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(3): 142-144. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623. 2023.03.033

PPK 技术在危岩落石区的应用与精度分析

黄　惠[1]，麦瑜潇[2]
（1. 广西壮族自治区第六地质队，广西 贵港 537100；2. 桂林市国土资源规划测绘院，广西 桂林 541000）

摘　要：利用大疆精灵 4 结合 RTK 技术获取 3 个危岩落石区的图像，对比分析了有地面控制点和无控制点利用 PPK 技术两种光束法区域网平差方法（简称方法 1、方法 2），并通过均方根误差评估了两种方法的精度。结果表明，方法 1 比方法 2 获得的数据精度高，但带有 PPK 技术的方法 2 为危岩落石区等危险区和暴露区的监测和研究提供了一个可行的解决方案，且也可获得较好的精度，满足平时的工作需求。

关键词：危岩落石区；光束法区域网平差；PPK；精度
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）03-0142-03

Application of PPK Technology in Rockfall Area and Its Accuracy Analysis

HUANG Hui[1], MAI Yuxiao[2]
(1. No.6 Geological Team of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guigang 537100, China;
2. Guilin Institute of Land Resources Planning and Surveying, Guilin 541000, China)

Abstract: In this study, we used DJI phantom 4 RTK to obtain the images of three dangerous rockfall areas, and compared two different bundle adjustment methods(method 1 and method 2 for short) with ground control points and no control points combined with PPK technology. Then, we used the root mean square error(RMSE) calculated at the test points to evaluate the accuracy of two methods. The results show that the data accuracy obtained by method 1 is higher than method 2. However, method 2 with PPK technology provides a feasible solution for monitoring and studying dangerous and exposed areas such as rockfall area, and can also achieve good accuracy, which meets the demand of usual work.

Key words: rockfall area, bundle adjustment, PPK, accuracy

近年来对于地灾的监测和研究备受重视。一些潜在的自然灾害点往往位于基础设施和居民点之上的陡坡，对于传统的野外观测来说，这样的地形难以接近且具有危险性。小型无人机系统（sUAS）获取的空间范围较小，操作机动灵活，适用于该领域的研究和监测，不少学者已对该应用进行了研究[1-4]，但大多是在地形条件均匀的平坦地区进行的。GNSS 动态后处理（PPK）技术近年来开始广泛应用于无人机航测领域，国内外学者在该领域已做了相关研究，如李亚东[5]等分析了 PPK 技术在无人机森林航空摄影测量中的应用，提出采用无人机加装 PPK 模块结合 SFM 方法生成森林正射影像的方案，其成果精度能满足森林资源二类调查的用图精度要求；刘建坡[6]等分析发现在相机校准的前提下，不采用 GCP 仅依靠 PPK 技术获取的具有精确定位影像的地理配准成果也可达到厘米级定位精度；魏荣灏[7]等对基于 PPK 无验潮的水下地形测量技术进行了研究，测试结果表明，PPK 获取的结果具有良好的稳定性，定位精度能满足水下地形测量工作需要。利用无人机和 PPK 技术已逐渐成为一种主流趋势，但目前将二者结合应用于危岩落石灾害方面的研究较少，本文尝试探讨了 PPK 与 sUAS 结合技术在危岩落石方面的应用，并通过实验分析了该方案的精度与效率。

1　PPK 数据处理关键技术

PPK 技术是利用载波相位进行事后差分的 GNSS 定位技术，属于动态后处理测量技术。该技术采用动态初始化 OTF 可快速解算整周模糊度，外业测量观测 10~30 s 即可解算得到厘米级的空间三维坐标。与 RTK 实时载波相位差分测量技术不同，PPK 测量时流动站与基准站之间无需建立实时通信链接，在外业观测结束后，对流动站与基准站 GNSS 接收机所采集的原始观测数据进行事后处理，从而计算得到流动站的三维坐标。PPK 数据处理是将基站和无人机获取的 GNSS

收稿日期：2021-12-22；修回日期：2022-01-13。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41071294）；广西空间信息与测绘重点实验室主任基金资助项目（桂科能 1207115-09）。
第一作者简介：黄惠（1985—），硕士研究生，注册测绘师，主要从事工程测量、地质测量方面的工作，E-mail：182839168@qq.com。

原始观测数据分别导入相关专业后处理软件进行处理。利用IGS站提供精密星历和地面参考基站已知坐标，解算得到无人机端流动站的精确三维坐标[6]。载波相位观测值改正值的表达式为：

$$\Delta S = R_0^i - [\lambda N_0^i(t) + \lambda C_0^i(t) + \varphi_0^i(t)] \tag{1}$$

式中，R_0^i 为IGS站提供的第 i 颗卫星的精密星历在 t 时刻的轨道精确位置与地面基站的已知坐标计算得到的参考站与卫星间的真实距离；N_0^i 为参考站初始相位模糊度；$C_0^i(t)$ 为参考站初始历元到观测历元的相位整周数；$\varphi_0^i(t)$ 为参考站相位观测值的小数部分；λ 为波长。

将校正值加入载波相位观测方程式，则有：

$$\lambda N_r^i(t) + \lambda NC_r^i(t) + \varphi_r^i(t) + \Delta s = \sqrt{((X^i(t) - X_r(t))^2 + ((Y^i(t) - Y_r(t))^2 + ((Z^i(t) - Z_r(t))^2} = d\rho \tag{2}$$

式中，$N_r^i(t)$ 为流动站初始相位模糊度；$NC_r^i(t)$ 为流动站初始历元至观测历元的相位整周数；$\varphi_r^i(t)$ 为流动站相位观测值的小数部分；$d\rho$ 为同一观测历元的各项残差值。

根据式（2），理论上只需参考站和流动站接收机同步观测4颗以上GNSS卫星数据，利用最小二乘法即可计算得到流动站的精确三维坐标。

2　数据获取与研究方法

1）数据获取。本文利用大疆精灵4无人机获取了3处危岩落石区数据。危岩点均位于地势较高的山体，危岩点与受威胁物之间的相对高度在50 m以上，受威胁物底部与危岩所在山体水平距离较近，存在不稳定结构面，由于山体相对高差很大，危岩点均具有较高的危险性。如图1所示，危岩点1位于陡壁中部，陡壁节理发育，岩体破碎；危岩点2位于石山陡壁上，陡壁节理发育，危岩点悬空明显；危岩点3位于石山陡壁上，位置较偏远，陡壁节理发育，岩体破碎，危岩点悬空明显。3处危岩点节理发育，与母岩分离明显，岩体破碎，易发生崩落。



图1　3处危岩点实景图

2）研究方法。本文在3处危岩落石区域设置了地面控制点与检测点，危岩点1处设置了12个地面控制点、35个检测点；危岩点2、3处分别设置了10个地面控制点、30个检测点，利用徕卡全站仪对所有点进行测量。利用大疆精灵4与RTK技术相结合方式在每个区域进行了1 d的调查，飞行轨迹垂直于地面坡度。所有研究点位的飞行高度均设定为80 m，地面采样距离为2~3 cm，图像重叠率为80%。无人机获取的影像经过Pix4Dmapper处理，分别采用带有控制点的光束法区域网平差方法（方法1）和与PPK技术相结合的光束法区域网平差方法（方法2）进行数据处理；再利用检测点的实测数据与两种方法得到的数据以及在DSM上提取的数值进行对比，评定其精度。

3）精度评定方法。通过将实测数据与两种方法计算得到的以及在DSM上提取的检测点数据进行对比，求出每个坐标差值，再求出总的均方根误差（RMSE）。具体公式为：

$$\mathrm{diff}_X = X_{\text{实测}} - X_{\text{后期提取}} \tag{1}$$

$$\mathrm{diff}_Y = Y_{\text{实测}} - Y_{\text{后期提取}} \tag{2}$$

$$\mathrm{diff}_Z = Z_{\text{实测}} - Z_{\text{后期提取}} \tag{3}$$

$$\mathrm{RMSE}_X = \sqrt{\sum_1^n \frac{\mathrm{diff}_X^{\,2}}{n}} \tag{4}$$

$$\mathrm{RMSE}_Y = \sqrt{\sum_1^n \frac{\mathrm{diff}_Y^{\,2}}{n}} \tag{5}$$

$$\mathrm{RMSE}_Z = \sqrt{\sum_1^n \frac{\mathrm{diff}_Z^{\,2}}{n}} \tag{6}$$

$$\mathrm{RMSE}_{XYZ} = \sqrt{\mathrm{RMSE}_X^2 + \mathrm{RMSE}_Y^2 + \mathrm{RMSE}_Z^2} \tag{7}$$

式中，n 为总坐标个数。

3　精度分析

实测检测点数据与两种方法获取的数据对比结果如表1所示，可以看出，方法1得到3处危岩落石区的总RMSE分别为0.018 m、0.047 m和0.014 m，而方法2得到的总RMSE分别为0.047 m、0.078 m和0.340 m；采用方法1得到的危岩落石区1与危岩落石区2检测点的较差平均值与标准差小于方法2，方法1的精度优于方法2，但方法2也能取得较好的精度。实测检测点数据与从DSM提取的数据对比结果如表2所示，可以看出，采用方法1得到危岩落石区1与危岩落石区2

表1　检测点实测与两种方法获取的数值对比结果/m

数据类型	危岩落石区1		危岩落石区2		危岩落石区3	
	方法1	方法2	方法1	方法2	方法1	方法2
diff_X平均值	0.003	0.015	0.001	0.012	−0.003	−0.096
diff_X标准差	0.007	0.008	0.025	0.028	0.007	0.026
RMSE_X	0.008	0.018	0.025	0.031	0.008	0.102
diff_Y平均值	−0.005	0.015	0.003	0.006	−0.002	−0.108
diff_Y标准差	0.008	0.009	0.020	0.030	0.010	0.046
RMSE_Y	0.009	0.018	0.020	0.030	0.010	0.118
diff_Z平均值	0.008	0.048	0.002	0.040	0.002	0.244
diff_Z标准差	0.009	0.009	0.015	0.046	0.006	0.260
RMSE_Z	0.013	0.040	0.034	0.065	0.006	0.302
RMSE_{XYZ}	0.018	0.047	0.047	0.078	0.014	0.340

检测点在 Z 方向上的较差平均值与标准差小于方法2，但二者相差不大；采用方法2在 Z 方向上也取得了较好的精度。在危岩落石区3，两种方法取得的数值对比误差较大，其原因在于，该处位置偏远，无人机飞行器个别时段RTK网络信号接收较弱，对后期数据处理产生了较大影响。总体而言，方法1的精度高于方法2。

表2 检测点实测值与从DSM提取的数值对比结果/m

数据类型	危岩落石区1		危岩落石区2		危岩落石区3	
	方法1	方法2	方法1	方法2	方法1	方法2
$diff_Z$平均值	0.010	0.050	0.025	−0.002	−0.020	0.220
$diff_Z$−SD	0.038	0.038	0.056	0.070	0.020	0.095
$RMSE_Z$	0.040	0.060	0.060	0.070	0.030	0.257

4 结 语

1）PPK技术结合sUAS适用于危岩落石区等范围较大且危险区域的检测和研究。

2）方法1比方法2获得的数据精度更高，但后者仍具有较好的精度和可靠性，可满足实际工作需要。

3）方法2在偏远、RTK网络信号接收较弱的工作区会有较大偏差，需布设地面控制点验证结果。

参考文献

[1] Giordian D, Manconi A, Facello A, et al. Brief Communication: The Use of Unmanned Aerial Vehicle in a Rockfall Emergency Scenario[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2015,15(1):163-169

[2] Rodriguez J, Macciotta R, Hendry M T, et al. UAVs for Monitoring Investigation and Mitigation Design of a Rock Slope with Multiple Failure Mechanisms: A Case Study[J]. Landslides,2020,17(1):2 027-2 040

[3] Salvini R, Mastrorocco G, Esposito G, et al. Use of a Remotely Piloted Aircraft System for Hazard Assessment in a Rocky Mining Area(Lucca, Italy)[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2018,18(1):287-302

[4] Macciotta R, Grapel C, Skirrow R. Ragmented Rockfall Volume Distribution from Photogrammetry Based Structural Mapping and Discrete Fracture Networks[J]. Applied Sciences,2020,10(1):69-77

[5] 李亚东,曹明兰,李长青,等. PPK技术在无人机森林航空摄影测量中的应用[J]. 中南林业科技大学学报,2021,41(7):20-25

[6] 刘建坡,王宇鑫. PPK在sUAS航测中的应用及精度分析[J]. 地理空间信息,2021,19(8):42-47

[7] 魏荣灏,陈佳兵,徐达. 基于PPK无验潮的水下地形测量技术研究[J]. 海洋技术学报,2021,40(1):57-62

常用参考文献著录要求

期　　刊 [序号]主要责任者.题名:其他题名信息[文献类型标识/文献载体标识].刊名,出版年,卷(期):起止页码

专　　著 [序号]主要责任者.题名:其他题名信息[文献类型标识/文献载体标识].出版地:出版者,出版年:引文页码

析出文献 [序号]析出文献主要责任者.析出文献题名:其他题名信息[文献类型标识/文献载体标识]//原文献主要责任者.原文献题名:其他题名信息.出版地:出版者,出版年:引文页码

专　　利 [序号]专利申请者或所有者.专利题名:专利号[文献类型标识/文献载体标识].公告日期或公开日期

电子公告 [序号]主要责任者.题名:其他题名信息[文献类型标识/文献载体标识].(更新或修改期)[引用日期].获取和访问路径

报纸文章 [序号]主要责任者.题名:其他题名信息[文献类型标识/文献载体标识].报纸名,出版日期(版次)

附表1 文献类型和标识代码

参考文献类型	文献类型标识代码
普通图书	M
会议录	C
汇编	G
报纸	N
期刊	J
学位论文	D
报告	R
标准	S
专利	P
数据库	DB
计算机程序	CP
电子公告	EB
档案	A
舆图	CM
数据集	DS
其他	Z

附表2 电子资源载体和标识代码

电子资源的载体类型	载体类型标识代码
磁带(magnetic tape)	MT
磁盘(disk)	DK
光盘(CD-ROM)	CD
联机网络(online)	OL

注:1、英文和中文参考文献的要求、格式一样。

2、不能少于7条。

3、作者人数在3个以上时写出3个加“等”字，只有3个或不足3个则全部写出。

4、凡可标注数字对象唯一标注符(doi码)的，一律标注于该条文献最后，用“.”与之前内容间隔。

5、参考文献在正文中要有与之相对应的标示。参考文献的排序为在正文中首次出现的顺序，对于不能在正文中明确标注的文献，一律放在所有能标注文献的后面。

6、希望本刊文献能得到您的关注。