无人机遥感技术在露天矿边坡测绘中的应用

刘 军[1], 王 鹤[2], 王秋玲[1], 刘小阳[1]

(1. 防灾科技学院 防灾工程系,河北 燕郊 101601;
2. 防灾科技学院 地震科学系,河北 燕郊 101601)

摘 要:边坡体三维建模与可视化表达是露天矿边坡稳定性评价的前提。以发生过小面积滑坡的露天矿边坡为研究对象,利于机动灵活的低空无人机搭载消费型数码相机获取了边坡序列影像,依据计算机视觉原理生成了边坡体稠密三维点云,实现了边坡体三维数字模型制作。结果表明:该技术可快速构建露天矿边坡精细地形,有效降低了作业成本和劳动强度。此外,该方法克服了传统单点测量方式以点带面的局限性,生产的三维模型可全面表达边坡整体形体和局部细节特征,为正确评价边坡稳定性提供了科学依据,尤其适合存在潜在隐患的露天矿边坡动态变形监测。

关键词:无人机遥感技术; 露天矿边坡; 计算机视觉; 三维数字模型
中图分类号:TD176 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.S114001

Application of UAV remote sensing technology in open-pit slop mapping

Liu Jun[1], Wang He[2], Wang Qiuling[1], Liu Xiaoyang[1]

(1. Department of Disaster Prevention Engineering, Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Yanjiao 101601, China; 2. Department of Earthquake Science, Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Yanjiao 101601, China)

Abstract: 3D modeling and visualization of the slope body is an essential prerequisite for objective evaluation of open-pit slop stability. Taking an open-pit slope where a small scale landslide happened as the study object, open-pit slope sequence images were first obtained from unmanned aerial vehicle(UAV) with a consumer-grade camera. And then, dense 3D point clouds were generated based on computer vision technology. Finally, high-resolution 3D digital models of open-pit slope were made. The experiment shows that the presented method can quickly construct an open-pit slope fine terrain, effectively reduce the operation cost and labor intensity. Moreover, due to this technology breaks the limitation of traditional method of single point measurement, reconstructed model can accurately expressed the global and local characteristics of open-pit slope, which can provide powerful support for the correct analysis and evaluation of slope stability, especially suitable for dynamic deformation monitoring of the potential risk open-pit slope.

Key words: UAV remote sensing technology; open-pit slope; computer vision; 3D digital model

收稿日期:2016-01-07; **修订日期**:2016-02-08
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(ZY20140205)
作者简介:刘军(1986-),男,讲师,主要从事低空摄影测量方面的教学与科研工作。Email:junliu.3s@hotmail.com

0 引 言

伴随露天采矿深度和边坡角度的不断增大,边坡的稳定性问题会给矿山的安全生产带来隐患,容易发生人员伤亡等生产事故[1]。因此,实时动态监测边坡稳定性,研究其发育机理和变化趋势,提出边坡工程防治措施,对矿区生产建设服务具有重要的现实意义。而边坡体三维地形的精细构建可为边坡的稳定性评估预测及其治理工程提供基础数据和技术保障。

近年来,遥感技术的发展为露天矿边坡快速三维建模提供了机遇。其中,三维激光扫描技术作为一种新兴的测绘手段,突破了常规单点测量方式采样点有限、覆盖范围小的不足,实现了对监测对象“面式”测量,具有获取速度快、精度高、非接触等优点,被开始应用于边坡滑坡监测领域。但是,由于受扫描速率和扫描距离等因素限制且价格昂贵,该技术在特大型边坡地质灾害监测领域应用有限[2]。随着材料科学和自动控制工程的发展,低空无人机(Unmanned Aerial Vehicle,UAV)遥感以其机动灵活、实时性强、低成本等优势,迅速成为快速获取地理数据的有效平台[3]。国内外学者已将无人机遥感成功应用于环境动态监测[4]、考古保护[5]、地质灾害监测[6-7]等领域。而对于露天矿边坡区域,基于无人机遥感技术制作精细三维模型的研究较少。

文中针对露天矿边坡地形特点,利用多旋翼无人机获取敏感区域高分辨率重叠影像,结合计算机视觉技术实现了边坡地形三维重建,最终制作出了数字高程模型(DEM)和精细三维模型,为后续边坡监测模型的建立和稳定性评价提供重要的基础空间数据。

1 露天矿边坡无人机影像数据获取

选取某金属露天矿边坡为实验场地。选用 8 轴旋翼无人机(图 1),搭载松下 DMC-FX75 数码相机。手动遥控无人机对边坡滑坡区域进行低空飞行定焦(焦距 4 mm)拍摄,共获取 180 幅不同角度的高重叠度航空影像,像素大小均为 2 560×1 920,平均地面分辨率为 3 cm。图 2 为空中相机拍摄时刻方位透视图。图 3 是一幅有代表性的边坡滑坡影像,由图可以看出无人机姿态倾角比较大,影像中边坡岩体遮挡比较严重。

图 1 多旋翼无人机平台

Fig.1 Multi rotor UAV platform

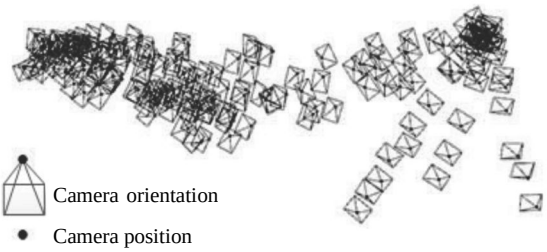

图 2 相机方位透视图

Fig.2 Perspective view of camera position and orientations

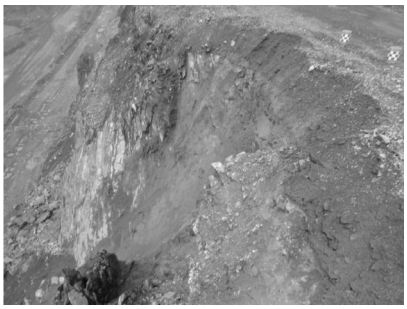

图 3 一幅典型边坡无人机影像

Fig.3 One representative UAV image of slope

2 露天矿边坡无人机影像快速处理

传统摄影测量方法在获取空间三维几何信息时,需要具备专业的影像获取和数据处理技术,为此要投入大量的人力和物力。近年来,随着计算机视觉领域里面特征点提取和影像匹配理论、运动恢复结构(Structure from Motion,SfM)[8]算法以及多视图立体视觉算法(Multi-View Stereopsis,MVS)[9]等新技术的不断完善,基于影像的三维重建技术有了突破性

进展。相较于传统摄影测量方法,计算机视觉算法可进行相机自校验,且在不依赖任何地面控制点等先验信息条件下,直接从二维影像自动恢复出场景三维点云模型,非常适合畸变大、短基线、小像幅特点的无人机影像数据处理,具有更强的灵活性,通用性好。

无人机影像特征点提取和高精度影像匹配是运动恢复结构算法的首要步骤。首先,利用 SIFT(Scale-Invariant Features Transform)特征提取算子对每幅无人机影像进行特征点提取;其次,利用基于 K-D 树的近似最邻近(Approximate Nearest Neighbors,ANN)算法进行粗匹配;然后利用基于随机抽取一致性(Random Sample Consensus,RANSAC)框架的 8 点算法计算基本矩阵,剔除误匹配点,建立满足对极几何约束的精匹配特征点集,完成同名特征点匹配。

在透视相机模型下,假设待求相机参数和空间点坐标分别为 $C=\{C_1, C_2, \cdots, C_n\}$ 和 $X=\{X_1, X_2, \cdots, X_m\}$,定义误差函数为重投影误差的平方和,则目标函数可写成:

$$g(C,X)=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}v_{ij}f(P(C_i,X_j),q_{ij})^2 \tag{1}$$

其中:v_{ij} 作为一个变量,当空间点 X_j 在相机 C_i 中可见时为 1,否则为 0;$f(P(C_i,X_j),q_{ij})=||P(C_i,X_j),q_{ij}||$ 表示 X_j 点在相机 C_i 上的重投影误差。

最后,用稀疏光束法平差(parse Bundler Adjustment)算法逐步迭代,不断最小化投影点和观测图像点之间的重投影误差,解算出最佳相机位置、姿态和场景三维点云坐标。

由于 SfM 算法重建得到的是场景稀疏点云,需要结合基于面片多视图立体视觉 (Patch-based Multi-View Stereo,PMVS)算法进行加密处理。PMVS 算法是在 SfM 获取相机参数基础上,通过特征点的匹配、重建以及空间点的扩散、过滤等步骤,得到精度相对较高的稠密点云模型。

目前,该领域非常有代表性和影响力的开源软件包括:Snavely 等发布的 Bundler,Wu Changchang 的 VisualSFM 等,这些系统都具有全自动和鲁棒性等特点。在商业领域,如 PhotoModeler,PhotoScan 等软件也集成了 SfM 和 PMVS 算法。在低空无人机摄影测量方面,市场上非常著名的商业软件是由 Pix4D 公司研发的无人机航空影像全自动快速处理软件 Pix4Dmapper。该软件无需人工干预,即可将无人机影像制作成专业的二维地图和三维模型。

3 露天矿边坡三维模型

利用 SfM-MVS 算法进行露天矿边坡无人机影像全自动数据处理,生成如图 4(a)所示的三维点云模型。该模型可以形象、直观地表达边坡区域地貌特征,对精细识别和解译滑坡具有重要的指导意义。图中长方形标注区域有点云漏洞,主要原因是获取数据时采用倾斜摄影的方式,没有顾及岩体遮挡问题,可通过调整无人机云台,使相机尽可能正射拍摄,漏

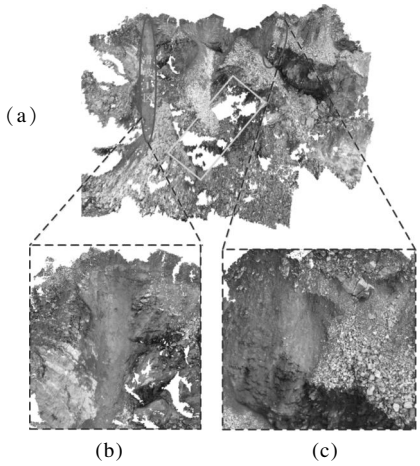

图 4 露天矿边坡无人机影像三维重建结果。(a) 三维重建点云;(b)和(c) 滑坡区点云局部效果

Fig.4 Reconstruction of open-pit slope from UAV images. (a) Densy 3D point clouds model of slope; (b) and (c) Local amplification of cloud points for landslide area

洞将会消失。图 4(b)、(c)是通过目视解译发现的两处滑坡区,从图中可以清晰识别出滑坡的基本形态和范围,发现该区域因滑坡引起了岩石崩塌,这会严重影响边坡下方的人身和构筑物安全,需采取措施加固或封锁滑坡区域。数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是研究边坡滑坡地质灾害的重要途径之一,为此采取 Delaunay 三角网构建算法中的分治算法利用离散点云构建不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN),生成了边坡区域数字高程模型,如图 5 所示。建立的 DEM 模型还可以转换成 DXF、GRD 等多种格式的数据文件,结合 Flac^{3D}、PFC^{3D} 等数值模拟计算软件实现露天矿边坡的稳定性分析计算。此外,为了使得边坡模型更加

逼真，对数字高程模型上的每个三角单元逐个进行纹理映射,制作了露天矿边坡三维数字模型(如图 6 所示)，可以从图上量取滑坡区域的长度、宽度、坡度、高程、体积等信息,完成滑坡灾害的定量评估,为开展边坡监测预警工作以及有针对性地制定防治预案提供了详实的基础空间数据。

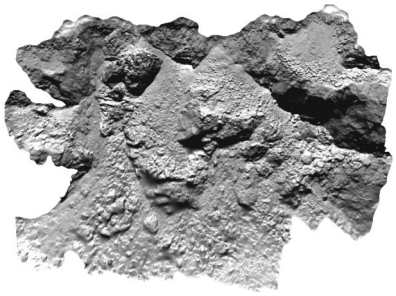

图 5 露天矿边坡数字高程模型

Fig.5 Digital Elevation Model of open-pit slope

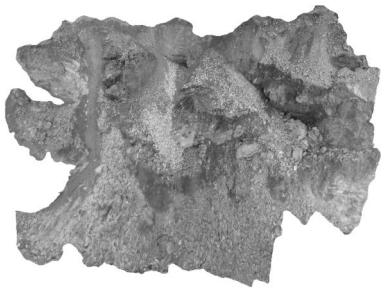

图 6 露天矿边坡三维模型

Fig.6 3D model of open-pit slope

4 结束语

针对露天矿边坡稳定性研究的需要，选用旋翼无人机遥感系统获取了露天矿边坡区域的高分辨率影像,结合影像三维重建技术,实现有单点到面的数据采集，完成了露天矿边坡体精细三维模型的快速制作,为后续边坡区域的稳定性分析、预测提供可靠的数据支持。由于重建算法没有用到任何地面控制点信息,因此得到是局部坐标系的点云坐标。如果事先在测区周围布设地面控制点(至少 3 个),那么可以通过空间相似变换模型 (3 个平移、3 个旋转角和 1 个尺度因子)将局部点云坐标转换到 WGS-84 等世界坐标系下完成坐标系的统一，为后续模型精度评估及其应用打下基础。此外,在露天矿边坡地形构建中,随着无人机影像数量的增加，重建效率也是一个要面临的重要问题，这对大规模露天矿边坡场景的数据处理提供更高的要求。

参考文献:

[1] Chen Jianping, Li Ke, Chang K J, et al. Open-pit mining geomorphic feature characterisation[J]. ***International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation***, 2015, 42: 76-86.

[2] Chu Hongliang, Yin Yueping, Cao Feng, et al. Research on deformation monitoring of large collapses and landslides based on 3D laser scanning technology[J]. ***Hydrogelogy and Engineering Geology***, 2015, 42(3): 128-134. (in Chinese) 褚洪亮, 殷跃平, 曹峰, 等. 大型崩滑灾害变形三维激光扫描监测技术研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(3): 128-134.

[3] Irschara A, Kaufmann V, Klopschitz M, et al. Towards fully automatic photogrammetric reconstruction using digital images taken from UAVs [C]//Symposium of Commission VII of the ISPRS -100 Years, 2010: 65-70.

[4] Lucieer A, Turner D, King, D H, et al. Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to capture micro-topography of Antarctic moss beds [J]. ***International Journal of Applied Earth Observation***, 2014, 27: 53-62.

[5] Verhoeven G, Doneus M, Briese C, et al. Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs [J]. ***Journal of Archaeological Science***, 2012, 39: 2060-2070.

[6] Niethammer U, James M R, Rothmund S, et al. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results[J]. ***Engineering Geology***, 2012, 128: 2-11.

[7] Turner D, Lucieer A. Using a Micro Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for ultra high resolution mapping and monitoring of landslide dynamics[C]// IGASS, 2013.

[8] Snavely N. Scene reconstruction and visualization from internet photo collections [D]. Washington: University of Washington, 2008.

[9] Furukawa Y, Ponce J. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis [J]. ***IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence***, 2010, 32(8): 1362-1376.