doi: 10.6046/gtzyyg.2020.04.31

引用格式: 闫驰, 焦润成, 曹颖, 等. 无人机倾斜摄影在泥石流灾害识别分析中的应用——以北京房山区史家营曹家坊泥石流 为例[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(4): 251 – 257. (Yan C, Jiao R C, Cao Y, et al. The application of UAV oblique photography in debris flow disaster identification and analysis: Taking the debris flow in Caojiafang, Shijiaying, Fangshan District, Beijing as an Example [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(4): 251 – 257.)

无人机倾斜摄影在泥石流灾害识别分析中的应用 ——以北京房山区史家营曹家坊泥石流为例

闫 驰, 焦润成, 曹 颖, 南 赟, 王晟宇, 郭学飞 (北京市地质研究所,北京 100120)

摘要: 传统泥石流遥感调查方法主要是正射航空摄影,其获取数据精度和维度存在局限性,无人机倾斜摄影技术可 同时从垂直、倾斜等不同的角度采集影像,获取地面物体更为完整准确的信息,建立的三维模型更直观,可为地质 灾害调查提供新的技术手段。以史家营曹家坊泥石流沟为例,开展了基于无人机倾斜摄影测量的泥石流灾害特征 识别分析。通过倾斜摄影可以获取泥石流沟高精度三维模型和纹理细节,真实反映实际地表顶面及侧面高分辨率 信息,较准确获取泥石流物源分布情况及物源方量的估算,数据可用于泥石流一次最大冲出量的计算。该方法能够 对泥石流地质灾害调查、现状评估提供更有力的数据支撑,充分发挥遥感技术在泥石流灾害调查、评价中的效能。 关键词:倾斜摄影;泥石流;三维模型;遥感识别及分析

中图法分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 1001-070X(2020)04-0251-07

0 引言

无人机倾斜摄影技术是测绘领域新兴的一项对 地观测技术,通过在飞行载体上搭载多台航摄仪,同 一时间从4个侧面和1个垂直面等不同的角度采集 影像,获取更为完整精确的地面物体的三维信 息[1]。运用倾斜摄影测量技术,突破了传统正射航 空摄影只能在垂直角度获得影像的局限性,能够真 实地还原地物的本来面貌^[2-3],而且机载平台运用 先进卫星导航技术,可以获得准确的绝对地理坐 标^[4-6],通过控制点的绝对定向可以获取非常高的 绝对精度,弥补了小面积高精度遥感产品的空白,被 广泛地应用于应急测绘、城市建模、不动产登记、文 物保护等领域^[3]。前人对泥石流灾害(隐患)遥感 调查主要采用传统正射航空摄影和地面调查的方 法,其获取的数据是垂向二维的,无法完成三维地质 体数据的计算,在精度和维度上存在局限性,本文以 北京房山区史家营曹家坊泥石流为例,探讨倾斜摄 影技术在泥石流灾害(隐患)特征识别以及数据分 析中的积极作用,旨在通过倾斜摄影三维模型能够 精确挖掘泥石流灾害(隐患)特征的各项数据,有效 为该灾害隐患的相关研究和防治工作提供参考,为 今后灾害体评价分析提供更有力的数据支持。

1 研究区概况

曹家坊泥石流沟位于北京市房山区城西 65 km 处,史家营乡曹家坊村西北方向,是北京市 突发性地质灾害隐患台账中较为典型的地质灾害 点之一,图1为该区影像,获取时间为2018年9月 6日,获取方式为无人机倾斜摄影。曹家坊泥石流 沟内主要发育侏罗纪地层,绝大部分地区岩性以 火山岩、砂砾岩为主,岩性较硬;中上游局部发育 窑坡组含煤地层,岩性软硬相间。整体而言,曹家 坊沟内发育岩性较硬,风化程度不高;但区内断裂 构造发育,可见多处断层破碎带。根据北京市地 质研究所历年汛期应急调查,该泥石流沟近10 a 时间内未发生泥石流灾害,但工程活动强度巨大, 上游河道狭窄并建有蓄水池。为了查清该泥石流 灾害发育状况,笔者借助倾斜摄影测量手段对其 进行了分析研究。

收稿日期: 2020-01-06;修订日期: 2020-05-28

基金项目:北京市突发地质灾害监测预警系统(一期)工程运行(编号: PXM2017_158204_000002)及"北京市重要泥石流沟航空摄影测量"(编号: ZHYG20170401)共同资助。

第一作者:闫 驰(1987-),男,硕士,工程师,主要从事遥感地质方面的应用研究。Email: 363365880@qq.com。



图 1 曹家坊泥石流沟航射影像示意图 Fig. 1 Aerial image sketch map of Caojiafang debris flow ditch

2 倾斜摄影及实景建模

本次研究的曹家坊泥石流沟为"V"型沟,高差近 1 150 m。为了全面获取泥石流沟宏观、微观信息,采 用的飞行平台为旋翼电动无人机,数码相机选用五拼 倾斜相机系统;此外,为满足后期三维建模的需要, 倾斜摄影需较大的重叠度,航向重叠及旁向重叠均设 定为 80% 左右,且为保证测区内倾斜纹理的完整性, 在进行倾斜航摄时,对测区范围进行了一个相对航高 的外扩,保证原测区周边获取到高质量的倾斜纹理。

本次倾斜三维实景模型采用大场景快速三维建 模技术和模型精细化处理技术,制定面向倾斜摄影 数据处理的技术方案,形成了快速精细三维建模的 工艺流程,如图2所示。



of oblique photographic data

数据处理及三维建模中本次主要采用法国 Acute3D公司的 Smart3D(ContextCapture)软件完成 的,后期模型的编辑过程采用了不同的软件进行修 正,包括3DMax 和 MeshMixer 等,使编辑后得到的模 型符合要求。

2.1 多视立体空中三角测量

本次工作采用 POS 辅助的垂直影像 + 倾斜影像 联合平差的方式。通过多视影像匹配技术生成高密 集连接点,区域网平差解算出各视影像的外方位元素。

2.2 密集点云生成

根据求解出的外方位元素,在所有影像间进行 密集匹配,生成大量的密集点云,并重点开展影像重 叠度对密集点云生成的影响性分析。采用空三加密 成果,按照一定的准则建立一定范围大小的 TILE, 逐 TILE 密集匹配、构建 3D TIN 以及纹理生成。

2.3 基于点云构建三角网

对每个 TILE 生成的点云构建三角网,即 3D TIN,与传统的 2D TIN 不同,它可以真实地展现物体 镂空结构,更加符合物体的真实表达。

2.4 纹理信息生成

对三角网中的每个三角面片优选出最佳的纹理 影像,与几何模型共同组成三维实景模型。重点分 析纹理选取的原则,如建筑物顶部更多依赖垂直影 像,侧面纹理主要依赖倾斜影像。结合 3D TIN 和影 像及外方位元素优选合适的影像进行纹理映射。

2.5 模型编辑

相机在高空以一定的倾角拍摄地面目标时,由 于地面目标的高密集分布特征、目标截面很小等将 使得原数据存在遮挡、地物特征难区分辨别等现象, 导致生成的模型存在破面、飞点等,部分纹理错误模 型存在小漏洞及模型变形等情形,本次工作对模型 进行了编辑,包括几何结构和纹理的编辑(图3)。



图 3 曹家坊泥石流沟口大比例尺 Mesh 模型 Fig. 3 Large scale Mesh model of Caojiafang debris flow gully

3 泥石流遥感识别

传统的高空间分辨率卫星遥感手段能够有效识 别灾害体,提取孕灾环境因子。这些方法和经验对 于倾斜摄影图像仍然适用,而且基于高精度的三维 模型,遥感识别内容更加精细、全面。

3.1 物源分布特征识别

基于高精度的三维模型,通过人机交互解译,曹 家坊泥石流沟内主要物源包括煤矸石堆(分未治理 和治理后2种)、自然松散堆积物、危岩体、工程切 坡、旱地覆土、灾害体、局部水体以及人类工程形成 的堆积物等。

经处理好的倾斜摄影数据,导入 LocaSpace Viewer 软件中,很好地展示了泥石流沟三维形态,并且 该软件提供了三维模型任何位置斜面体体积量算功 能。对物源堆积体方量计算,通过采样点的方式,绘 制其堆积范围,设置采样精度(建议略大于模型精 度,可以是模型精度的3倍,比如本次模型精度 5 cm,采样精度则设置为15 cm),通过自动计算就 可以得出该物源堆积体的估算方量。

基于倾斜摄影的方量计算,采用按照采样间隔, 构建出一个个的立方体柱,并逐个和模型的表面以 及设置的底面求交。采样间隔越精细,精度就越准。 最后累计计算出所有立方体柱的体积总量。本次对 泥石流物源储量估算精度约为10 m³。

通过倾斜摄影三维模型量算,对曹家坊沟内各 类物源方量进行估算(如表1所示)。估算结果显 示,该沟内主要物源储量总计可达 274.31 × 10^4 m³。

表1 曹家坊泥石流沟主要物源量统计

 Tab. 1
 Statistic of main provenance of

 Caojiafang debris flow gully

	-		-
序号	物源类型	解译图斑数量/个	物源量估算/m ³
1	崩塌体	3	5 540
2	人类工程堆积物	10	49 970
3	风化危岩体	7	2 220
4	旱地覆土	4	109 060
5	未治理煤矸石堆	12	32 690
6	工程切坡	29	3 030
7	水体	6	9 650
8	危岩体	2	1 180
9	治理后煤矸石堆	8	2 486 180
10	自然松散堆积物	10	43 580
	合计	_	274.31×10^4

3.1.1 不良地质体

本次通过倾斜摄影调查,发现沟内崩塌、危岩体 等不良地质体5处。崩塌体三维模型上呈不规则的 倒石堆(图4(a)),也有工程切坡形成的扇形堆积 体(图4(b));岩石切割强烈,长期风化,在三维模型 上可清晰识别出自然风化形成的危岩体(图4(c))和 山坡上的多处滚石,滚石大者尺寸可达2.8 m×1.6 m× 1.2 m(图4(d))。





(b) 扇形堆积体



(c) 危岩体

(d) 滚石

图 4 崩塌、危岩体影像特征 Fig. 4 Image characteristics of collapse and dangerous rock mass

3.1.2 煤矸石堆

曹家坊泥石流沟中上游局部发育窑坡组含煤地 层,煤矿开采堆积了大量的煤矸石堆,部分已经进行 了工程治理(如图 5 所示),本次共解译煤矸石堆 20 处,经倾斜摄影三维模型上量算,物源量共计 251.89×10³ m³。



(a) 治理前

(b) 治理后

图 5 煤矸石堆影像特征 Fig. 5 Image characteristics of coal gangue heap

3.1.3 人类工程堆积物

曹家坊沟进行了大规模的工程建设,也产生了 大量的人类工程堆积物(如图6所示),本次共解译 10处人类工程堆积物,经倾斜摄影三维模型上量 算,总计约49970m³。

3.1.4 工程切坡

曹家坊泥石流沟工程切坡主要包括修建道路和 矿山开采,影像上倒石堆特征明显(如图7所示), 共计29处,物源量约3030m³。

3.1.5 自然松散堆积物

自然松散堆积物主要分布曹家坊沟中下游,三维 模型可清晰识别松散物呈台阶状展布,并可大致估算 松散物的堆积厚度多数在5m以上(如图8所示)。



图 6 人类工程堆积物影像特征 Fig. 6 Image characteristics of human engineering deposits



(a) 修建道路

(b) 矿山开采

图 7 工程切坡影像特征 Fig. 7 Image characteristics of engineering slope cutting



图 8 自然松散堆积物影像特征 Fig. 8 Image characteristics of natural loose deposits

3.2 水动力综合条件

三维分析可知,曹家坊沟流域面积为3.58 km², 流动方向约150°;沟岸山坡平均坡度约33.33°;主沟 长3.70 km,弯曲系数1.10,沟系密度6.71 km/km²; 最大高差1150 m,平均坡降28.7%;治理后主河道 流通区十分通畅(图3),但上游河道最狭窄处为建 蓄水池,建了拦挡坝,对河道形成堵塞(图9)。流域 上游的汇水全部经过该狭窄的通道进入中下游(该 处河道宽度不足30 m),该处北侧的上游山坡上存 在大量由洪积、坡积形成的松散物源,厚度普遍大于 5 m。拦挡坝在堵塞河道的同时还形成超过10 m 高 的落差,进一步增强了沟道的水动力条件。



图 9 曹家坊泥石流沟上游河道堵塞情况示意图 Fig. 9 Schematic diagram of the upstream channel blocking of Caojiafang debris flow gully

3.3 受威胁对象

曹家坊泥石流沟内受威胁对象主要包括 X019、 矿区道路、乡村道路、畜牧场、政府用地、居民地、景 区建筑物和矿山建筑物等,详情如表 2 所示。三维 示意图如图 10 所示。

表 2 曹家坊泥石流沟受威胁对象情况统计

Tab. 2 Statistic of threatened objects

in	Caojiafang	debris	flow	gully	
					_

序号	威胁对象类型	解译图斑数量	长度/数量统计	单位
1	X019	1	313.33	m
2	矿区道路	3	2 121.55	m
3	乡村道路	9	11 470.16	m
4	畜牧场	1	1	处
5	政府用地	1	1	处
6	居民地	8	90	户
7	景区建筑物	8	26	栋
8	矿山建筑物	8	8	栋



图 10 曹家坊泥石流沟威胁对象三维示意图 Fig. 10 Three dimensional schematic diagram of threat objects of Caojiafang debris flow gully

4 历史冲淤及一次泥石流最大冲出量 估算

从目前获取的航摄影像来看,曹家坊沟口的堆 积物已经被改造、建设成居民地,河道则受堆积物和 人类工程活动影响,向西南侧偏移明显;曹家坊沟 人类工程活动强度大,冲淤变幅情况已无迹可寻。 经走访调查,最近一次较明显的冲淤发生在 2012 年,但变幅程度相对较低,普遍不超过 0.1 m。

以往对泥石流一次冲出物质总量计算采用《泥 石流灾害防治工程勘查规范》中的计算公式,即

$$Q = KTQ_{\rm c} \quad , \tag{1}$$

式中: Q 为泥石流过流总量, $m^{3} s^{-1}$; Q_{c} 为泥石流洪 峰值流量, $m^{3} s^{-1}$; T 为泥石流持续时间, s; K 为计 算系数。F 为汇水面积, km^{2} , 当 $F < 5 km^{2}$ 时, K=0.202; F 为[5,10) km^{2} 时, K = 0.113; F 为 [10,100) km^{2} 时, K = 0.037 8; $F \ge 100 km^{2}$ 时, K =0.025 2。

应用式(1)计算泥石流一次冲出物质总量需要 泥石流沟活动情况的详细记载,其中数据也需要进 行调查,数据获得较为困难。曹家坊沟由于历史资 料缺少相关数据,因此本次未采用式(1)进行泥石 流一次冲出物质总量的计算。

本研究采用经验公式对曹家坊泥石流一次冲出 物质总量进行估算,即

$$L_1 = -2 + 0.26F + 0.41S + 0.002 \ 1M \ , \ (2)$$

2020年

式中: L_1 为一次泥石流最大冲出量,m³;S为流域切 割密度,km• km⁻²;M为流域内固体松散物储量, m³。

式(2)中数据均可由倾斜摄影三维模型获得,计 算得知一次泥石流最大冲出量为 2.26×10⁴ m³。

5 结论

本文以房山区史家营曹家坊泥石流沟为例,将 无人机倾斜摄影引入地质灾害研究,开展了基于无 人机倾斜摄影的灾害特征识别,取得主要结论如下:

1)通过该技术,查清了曹家坊泥石流沟的基本 情况。该泥石流沟沟道内存在大量物源,物源总量 约274.31×10⁴ m³;沟道上游河道最狭窄处建了拦 挡坝,形成一处蓄水池,对河道形成堵塞;下游沟口 处有大量景区建筑物和居民地;受降雨激发易发生 泥石流灾害,一次泥石流最大冲出量约2.26×10⁴ m³。 相关数据可为该灾害隐患的相关研究和防治工作提 供参考。

2)本文基于高精度的无人机倾斜摄影测量, 实现了泥石流地质灾害的三维建模,真实地反映 了泥石流沟内各类物源分布情况,自带高程和纹 理信息。经过绝对定位,三维模型具备可量测性,可 以量测目标地物的长度、宽度、高度、面积和体积等, 为今后灾害体评价分析提供更有力的数据支持。

3)以往计算泥石流一次冲出物质总量需要泥 石流沟活动情况的详细记载,其中数据也需要进行 调查,数据获得费时费力,本文首次基于倾斜摄影三 维建模的测量数据,依据经验公式,估算了泥石流沟 一次泥石流最大冲出量,方便快捷,数据可靠。

4)北京地区泥石流灾害(隐患)整体数量大,威 胁影响高,倾斜摄影三维建模能充分发挥其灵活机 动、高精高效的特点,从多个角度来观察地面的物 体,真实地拍摄到地质灾害的具体情况,弥补了传统 的垂直正射影像技术的不足,在泥石流灾害调查、评 价工作中发挥效能。

参考文献(References):

 [1] 郑史芳,黎治坤.结合倾斜摄影技术的地质灾害监测[J].测绘 通报,2018(8):88-92.

Zheng S F, Li Z K. Geological hazard monitoring combined with tilt photography [J]. Surveying and Mapping Bulletin ,2018(8);88–92.

[2] 李杨.无人机倾斜摄影技术在地质灾害调查监测中的应用
 [J].冶金与材料,2018,36(3):18-24.

Li Y. Application of UAV tilt photography technology in geological hazard investigation and monitoring [J]. Metallurgy and Materials, 2018, 36(3):18 – 24.

- [3] 刘对萍,潘艳宾.无人机倾斜摄影在泥石流灾害调查中的应用
 [J].土地开发工程研究,2016(6):34-39.
 Liu D P,Pan Y B. Application of UAV tilt photography in debris flow disaster investigation[J]. Land Development Engineering Research, 2016(6):34-39.
- [4] 杨 娟,无人机倾斜摄影在地质灾害三维可视化中的应用[J]. 中国锰业,2017,35(2):38-43.

Yang J. The application of UAV tilt photography in three – dimensional visualization of geological hazards[J]. China Manganese Industry,2017,35(2):38-43.

[5] 魏永明,郭华东,陈玉,等.甘肃省舟曲特大泥石流的遥感影像特征及古泥石流遥感识别的地质意义[J]. 第四纪研究, 2014,34(2):28-33.

Wei Y M, Guo H D, Chen Y, et al. Remote sensing image characteristics of Zhouqu super – large debris flow in Gansu Province and geological significance of remote sensing identification of ancient debris flow[J]. Quaternary Study, 2014, 34(2):28 – 33.

- [6] 王润生,熊盛青,聂洪峰,等.遥感地质勘查技术与应用[J].地 质学报,2011,85(11):1699-1743.
 Wang R S,Xiong S Q,Nie H F, et al. Remote sensing technology and its application in geological exploration [J]. Acta Geologica Sinica,2011,85(11):1699-1743.
- [7] 童立强,聂洪峰,李建存,等.喜马拉雅山地区大型泥石流遥感 调查与发育特征研究[J].国土资源遥感,2013,25(4):104 -112.doi:10.6046/gtzyg.2013.04.17.

Tong L Q,Nie H F,Li J C, et al. Survey of large - scale debris flow and study of its development characteristics using remote sens ing technology in the Himalayas [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(4):104 - 112. doi:10.6046/gtzyyg. 2013. 04.17.

- [8] 郭兆成,童立强,郑雄伟,等.四川庐山地震次生地质灾害遥感 调查及灾害特征初探[J].国土资源遥感,2014,26(3):99 -105.doi:10.6046/gtzyg.2014.03.16.
 Guo Z C,Tong L Q,Zheng X W, et al. Remote sensing survey of secondary geological disasters triggered by Lushan earthquake in Sichuan Province and tentative discussion on disaster characteristics[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2014,26(3):99 -105.doi:10.6046/gtzyg.2014.03.16.
- [9] 张志军,庄永成.基于 GF-1 数据的地质灾害遥感调查——以 青海省大通县为例[J].科学技术与工程,2017,17(18):9-17.

Zhang Z J,Zhuang Y C. The survey of geological hazards based on GF - 1 data: Taking example for Datong County, Qinghai Province [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(18):9-17.

[10] 王钦军,陈 玉,蔺启忠,等.矿山地质灾害遥感监测方法及成因分析[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(1):75-79.
Wang Q J, Chen Y, Lin Q Z, et al. Geological hazards monitoring method and its formation analysis in mining area [J]. The Chinese Journal of Geological Harzard and Control,2011,22(1):75-79.

[11] 马思顺,陈志雄,王瑞雪,等. 遥感技术在地质灾害调查中的应用[J]. 地质灾害与环境保护,2017,28(4):80-86.
Ma S S, Chen Z X, Wang R X, et al. Application of remote sensing technology in geological hazard investigation [J]. Journal of Geolog-ical Hazards and Environment Preservation,2017,28(4):80-86.

The application of UAV oblique photography in debris flow disaster identification and analysis: Taking the debris flow in Caojiafang, Shijiaying, Fangshan District, Beijing as an Example

YAN Chi, JIAO Runcheng, CAO Ying, NAN Yun, WANG Shengyu, GUO Xuefei (Beijing Institute of Geology, Beijing 100120, China)

Abstract: The traditional remote sensing survey method of debris flow is mainly orthophoto aerial photography , which has limitations in the accuracy and dimension of data acquisition . UAV tilt photography technology can simultaneously acquire images from different angles , such as vertical and tilt , obtain more complete and accurate information of ground objects , establish more intuitive three – dimensional model , and provide new technical means for geological disaster investigation . Taking the Caojiafang debris flow gully in Shijiaying as an example , the authors carried out the feature recognition analysis of debris flow disaster based on UAV tilt photogrammetry . It is believed that the high – precision three – dimensional model and texture details of debris flow gully can be obtained by incline photography , which can truly reflect the high – resolution information of material source volume ; the data can be used to calculate the maximum amount of debris flow once washed out . This method can provide a more powerful means for the investigation of debris flow geological disasters and the assessment of current situation . The remote sensing technology can be fully used in the investigation and evaluation of debris flow disaster . **Keywords**: oblique photography ; debris flow; three – dimensional model ; remote sensing identification and analy- sis

(责任编辑:李瑜)