



引文格式: 王俊锋, 过磊, 李彬, 等. 基于实景三维高分辨率地质剖面测量关键技术研究[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 282-290. DOI: 10.12401/j.nwg.2023187

Citation: WANG Junfeng, GUO Lei, LI Bin, et al. Research on Key Technologies of Real 3d High-Resolution Geological Profile Survey[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 282-290. DOI: 10.12401/j.nwg.2023187

基于实景三维高分辨率地质剖面测量关键技术研究

王俊锋¹, 过磊^{2,*}, 李彬³, 焦永清¹

(1. 甘肃工业职业技术学院, 甘肃 天水 741025; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119;
3. 西安地质矿产勘查开发院有限公司, 陕西 西安 710100)

摘要: 地质剖面是地质研究的基本手段之一, 随着实景三维技术快速发展, 实景三维建模技术已逐渐应用于地质技术领域。笔者以数字相机、智能手机、无人机、多源遥感影像等可广泛获取的资源为基础对典型地质剖面进行实景三维模型获取和三维剖面测量研究分析, 并引入投影方法和制图综合技术进行剖面测量、制图工作。与传统剖面相比, 本研究地质剖面测量技术、测量成果具有严格的数学基础, 工作成果具有明显的高精度、高效率等特征。因此, 基于本研究实景三维地质剖面测量技术具较好的应用前景。

关键词: 实景三维; 地质剖面; 立面投影; 制图综合

中图分类号: P234, P283.4, P56 文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)01-0282-09

Research on Key Technologies of Real 3d High-Resolution Geological Profile Survey

WANG Junfeng¹, GUO Lei^{2,*}, LI Bin³, JIAO Yongqing¹

(1. Gansu Industry Polytechnic College, Tianshui 741025, Gansu, China; 2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. Xi'an Institute of Geological and Mineral Exploration Co., Ltd., Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: Geological section is one of the basic means of geological research. With the rapid development of 3D technology, 3D modeling technology has been gradually applied to the field of geological technology. Based on widely available resources such as digital cameras, smart phones, unmanned aerial vehicles and multi-source remote sensing images, this paper studies and analyzes the real 3D model acquisition and 3D profile measurement of typical geological profiles, and introduces projection methods and cartographic synthesis technologies to conduct profile measurement and mapping. Compared with the traditional section, the geological section survey technology and survey results based on this study have a strict mathematical foundation, and the work results based on this study have obvious characteristics of high precision and efficiency, so the real 3D geological section survey technology has a good application prospect.

Keywords: real 3D; geological section; elevation projection; cartography synthesis

收稿日期: 2022-11-04; 修回日期: 2023-08-01; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 甘肃省教育厅创新基金项目(2022A-244)、“问题地图”制图系统误差研究, 中国地质调查局项目“西北地区自然资源综合调查”(DD20211393-1), 甘肃省教育科学“十四五”规划 2021 年度课题(GS[2021]GHB1833), 甘肃省职业教育教学改革研究(2021gszyjy-27), 甘肃省教育厅 2022 年大学生创新创业训练计划项目(S202212836004)联合资助。

作者简介: 王俊锋(1981-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要遥感地质工作。E-mail: wangmao4585@163.com。

* 通讯作者: 过磊(1982-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事基础地质工作。E-mail: guolei198209@139.com。

高分辨率实景三维建模技术因其多尺度、多学科属性, 忠实映射、高保真度等特性而广泛应用于基础测绘及地质调查等技术领域(胡运海, 2012; 万荧等, 2016; 李煜, 2017; 印森林等, 2018; 崔玉福等, 2021; 马建雄等, 2022; 蔡小超等, 2022; 李林等, 2022; 贾俊等, 2023)。梁京涛等(2020)开展了基于贴近摄影测量技术的高位崩塌早期识别技术方法研究; 闫博等(2020)在地质调查技术领域总结无人机工作流程基础上, 对现代沉积、古代构造特征、古代岩体切割关系等方面进行了一些尝试; 郑明等(2022)在青藏高原难进入地区开展基于虚拟现实技术的多维度、高精度地质调查实验; 刘帅等(2022)基于无人机倾斜摄影技术对露头点实景三维模型建模并绘制地质剖面; 常晓艳(2021)在地灾监测技术领域利用无人机倾斜摄影测量技术开展应用研究; 刘立等(2022)构建地质灾害隐患三维图, 为灾后地质灾害隐患管理、风险分析等提供保障。前人在无人机技术应用领域进行较多研究, 但在基于多源数据如智能手机、数字相机、消费级无人机、无人机倾斜摄影等地质剖面建模、剖面测量、剖面投影、剖面制图综合等技术领域涉及较少。笔者在前人研究基础上, 基于近景摄影测量和倾斜摄影测量等方法获取高分辨率地质剖面实景三维, 结合剖面投影技术和制图综合技术对地质剖面测量和制图进行实验讨论。结果表明, 该方法对提高地质剖面作业效率和测量精度有一定现实意义。

1 实景三维建模技术方法

1.1 技术流程

剖面实景三维建模及处理流程(图 1)主要包括获取影像、实景三维建模、实景三维剖面测量、剖面制图综合、成果提交等。

便携式实景三维采集设备包括普通智能手机、GNSS 数字相机、消费级无人机等(图 2); 大面积作业设备多采用多镜头多旋翼或固定翼无人机。依据工作范围、工作目的、作业方式、工作区状况、剖面制图比例等制定实景三维获取方案。如智能手机、GNSS 数字相机、消费级无人机满足地质队员野外典型地质现象观察和建模; 多镜头无人机等实现大面积长距离地质剖面摄影及建模任务; 高分卫星影像建模实现中小比例尺剖面测量和制图。

实景三维建模采用 Smart3D 等软件进行无人机

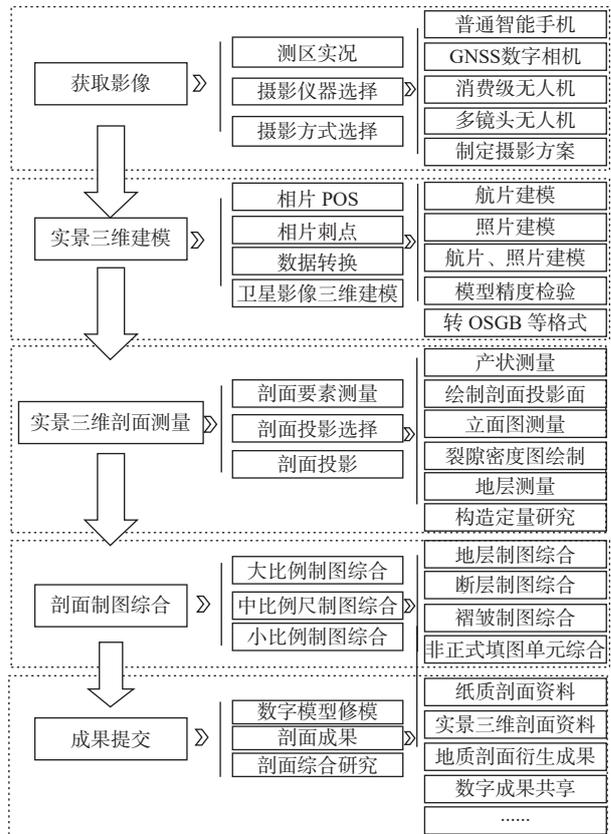


图 1 剖面实景三维建模及处理流程

Fig. 1 3D modeling and processing flow of geological section



图 2 常见地质剖面实景三维采集工具

Fig. 2 Common acquisition tools for real 3D geological section

航片、地面数字相机单独建模或者联合建模。建模坐标信息常采用 POS 或像控点刺点方式。不同类型设备获取实景三维可利用公共点进行精度互检。实景三维剖面模型可采用通用数据格式实现模型相互转化,常见三维交换格式为如 OSGB 可实现 Smart3D、3Dmax、EPS 等软件数据交换。

实景三维剖面测量主要包括剖面要素测量、剖面投影面选择、剖面投影。剖面要素测量主要包括产状测量、接触界线解译、断层绘制等;剖面投影面选择是指依据剖面主要产状、剖面走向等要素确定剖面的投影面;依据剖面投影结果进行立面测量,完成剖面要素采集。

在剖面投影及矢量化采集基础上,依照地图制图综合原理对投影至投影面的剖面各种信息进行选取、简化、夸大、位移等进行综合制图。

基于实景三维的地质剖面成果包括传统纸质图件和新型数字产品,可满足不同比例剖面图的生产,新型数字产品可满足剖面 3D 打印、数字科普展示、地质三维档案、互联网三维共享等多方面的应用需求,并具有良好的可复用特征。

1.2 实验条件

实景三维地质剖面测量结果与三维影像分辨率关系密切,便携式摄影测量方法获取实景三维建模质量主要取决于近景摄影分辨率、相片重叠度、近景摄影 POS 定位精度等。便携式近景设备 GNSS 基线较短,在 GNSS 定位精度不高情况下易导致剖面模型要素如方位、长度在内的形变。主要通过以下方法预防和改善:①增加足够密度像控点。②适当增加近景摄影 GNSS 基线网精度。③增加近景摄影重叠度及相片数量。④增加人工定向、测距标志、抽检要素等。

无人机作业应采用航线规划并尽量满足贴近摄影要求,获取垂向和倾斜航片。部分实验区高分辨率卫星三维影像可以用于地质剖面宏观要素的解译,从实验精度和效果看,近景摄影测量技术与卫星遥感技术可以形成技术互补和相互验证。

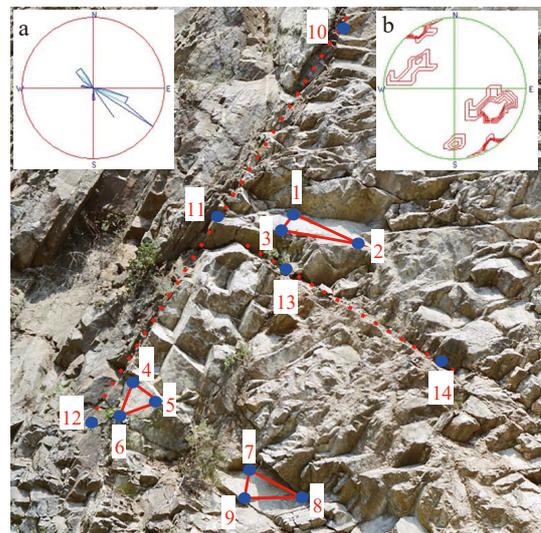
2 实景三维剖面测量技术

2.1 产状的测量方法

实景三维是一种精细化建模技术,满足高分辨率地质剖面测量。该技术对岩层产状、接触界线、构造

裂隙的观察、解译、统计具有一定优势。依据建模结果可进行产状采集及计算、接触界线解译、裂隙等密图及玫瑰图制作等。三维地质剖面产状测量宜采用三点法直接测量和计算(王俊锋等,2014)。图3为笔者在陕西蓝田县采用外置 GNSS 数字相机获取的实景三维影像,在三维软件(如 EPS)中对构造面理进行实景坐标测量,获得三维坐标并输出,在 Struckit 软件中完成产状各要素计算,完成倾向玫瑰图、裂隙等密图等绘制。点 1-2-3、4-5-6、7-8-9 为岩石产状面理,10-11-12 为沉积地层与侵入岩接触界线、13-14 为岩石中裂隙(图3)。

产状测量应避免遮挡、影像拉花、产状面过小等部位。表1为实景三维及罗盘面理测量结果对比,倾



(a). 倾向玫瑰图; (b). 裂隙等密图

图3 实景三维产状测量图

Fig. 3 Real 3D occurrence survey map

表1 实景三维与罗盘产状测量对比

Tab. 1 Comparison of real 3D and compass attitude measurement

序号	建模方法	实景三维		罗盘测量		差值	
		倾向	倾角	倾向	倾角	倾向	倾角
1	单反相机 近景摄影 建模	113°	44°	118°	41°	-5°	3°
2		134°	74°	133°	77°	1°	-3°
3		121°	45°	124°	50°	-3°	-5°
4		106°	57°	113°	51°	-7°	6°
5		109°	59°	102°	61°	7°	-2°
6		125°	41°	114°	47°	11°	-6°
1	无人机摄影 建模(图5f)	189°	88°	187°	84°	2°	4°
2		182°	87°	181°	79°	-1°	8°
3		358°	84°	1°	81°	-3°	3°
4		189°	87°	192°	86°	-3°	1°
5		275°	54°	279°	54°	-4°	0°

向之差 $\leq 12^\circ$, 倾角之差 $\leq 10^\circ$ 。依据卢立吉等(2016)方法检查本次实景三维及罗盘产状测量结果, 未发现存在显著精度差异。

2.2 实景三维剖面投影原理

空间点在平面的投影可以看成过经特定点的直线与平面的交点。空间点在平面上的投影问题可概括为直线和平面交点求解(朱鹏先等, 2021):

设非零向量为:

$$g = (m, n, p) \tag{1}$$

设实景三维体一点为:

$$w = (x_0, y_0, z_0) \tag{2}$$

设投影平面 S 方程为:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \tag{3}$$

设水平面为 H 。

经过 w 点的向量 g 方程为:

$$\frac{x - x_0}{m} = \frac{y - y_0}{n} = \frac{z - z_0}{p} \tag{4}$$

当 $Am + Bn + Cp \neq 0$ 时, 非零向量与投影面有交点, 交点为投影点坐标:

$$x = x_0 - \frac{m(Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D)}{Am + Bn + Cp} \tag{5}$$

$$y = y_0 - \frac{n(Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D)}{Am + Bn + Cp} \tag{6}$$

$$z = z_0 - \frac{p(Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D)}{Am + Bn + Cp} \tag{7}$$

实景三维与投影面位置关系包括相割、相离、相切等关系(图 4)。投影面可依据地质剖面的产状、剖面走向、接触界线等关系设置一个或多个投影面。多投影面可采用分段方式分段投影, 不同投影面之间坐标系统存差异。

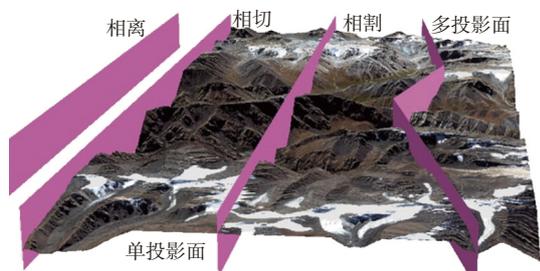


图 4 实景三维剖面投影方式

Fig. 4 Real 3D section projection mode

实景三维剖面投影主要存在几何体的长度、面积、角度变形, 如剖面中岩层厚度、共轭节理夹角、表面积等几何要素都可能存在变形。剖面中长度变形对岩层厚度影响较大, 设 l 为岩层真厚度, l' 为岩层投

影后厚度, $g \perp S, S \perp H, \theta$ 为向量 g 与岩层面走向夹角, g 为平行投影时满足: $l' = l \times \cos\theta$, 当 $\theta=0^\circ$ 时长度变形最小, 当 $\theta=30^\circ$ 时, 长度变形约大于 13%。剖面岩层总体走向、断层走向、接触接线走向等与 g 夹角不建议大于 30° 。

当 $S \perp H$ 时实景三维投影垂向变形最小; 当 g 为平行向量且满足 $g \perp S$ 且 $S \perp H$ 时为正投影, 正投影时实景三维剖面在投影面 S 中横轴整体变形最小。因此, 实景三维剖面投影面宜选择正投影。剖面走向方位的选择与岩层走向、接触界线走向、断层走向相协调, 避免剖面的长度、角度、面积变形过大。

2.3 剖面测量方法

实景三维常见测量方法主要为直接测量法和立面图绘制法。直接测量法从实景三维影像中直接测量坐标位置、岩层厚度等利用制图软件直接进行剖面绘制, 该方法适合实景三维直接绘制柱状剖面。如黄土高原中生界水平地层(图 5b、图 5e、图 5g)、探槽、土壤样坑、拨土等工程。

立面图是一种平行正投影的结果, 投影面与水平面垂直, 常用于建筑物外立面绘制(王莫, 2015)。常用软件如 EPS 等提供立面图绘制功能。利用立面图功能, 采集三维剖面要素。主要步骤: ①依据剖面测量需要, 裁剪实景三维。②依据剖面位置、岩层走向、剖面走向等绘制剖面线并构造垂向投影面。③立面模式下进行各要素选取、采集等, 依照采集结果进行地质剖面制图综合。

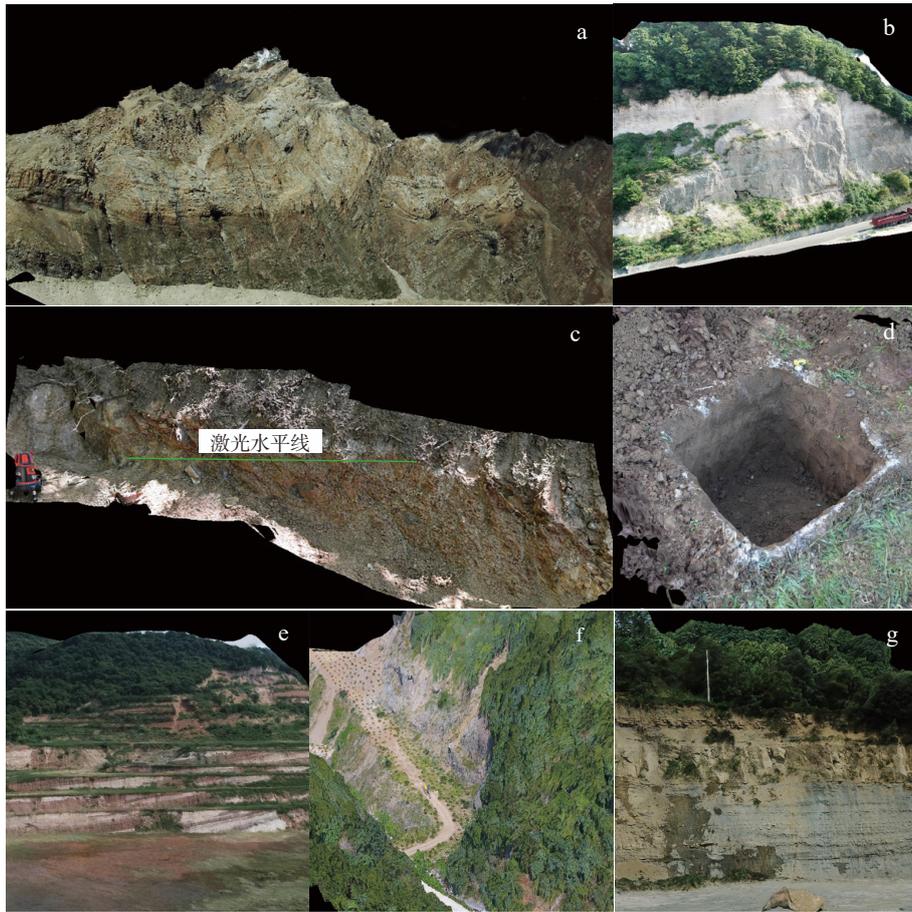
2.4 测量精度检验方法

在现有技术条件下, 实景三维剖面精度检验常见方法有像控点(特征点)检验法、标志抽样检验法、激光水平标检验法等。

像控点(特征点)检验法: 在获取实景三维剖面附近按照一定几何间距布设一定数量或一定密度的像控点, 利用传统测量仪器如全站仪或 CORS 等进行测量并获取空间三维坐标, 通过空间三维坐标与像控点或特征点的坐标残差分析, 以评价实景三维采集精度的方法。该方法在大面积、长距离剖面等较常用。

标志抽样检验法指依照钢尺、罗盘等传统仪器, 对实景三维剖面采集的同位置岩层产状、岩层厚度、裂隙走向、构造面理等进行测量检核, 以评价实景三维建模过程层中的整体变形及局部细节建模精度。

激光水平标检验法: 在狭小的空间如土壤探坑、地质探槽等地区, 利用激光水平装置制造激光水平线



(a)新疆乌苏东图津河组(C_2dt)实景三维; (b)陕西铜川下白垩统宜君组(K_1y)实景三维; (c)陕西安康白钨矿探槽实景三维; (d)陕西宝鸡土壤采样坑实景三维; (e)陕西铜川下侏罗统直罗组(J_1z)实景三维; (f)陕西西安采石场实景三维; (g)陕西铜川下侏罗统延安组(J_1y)实景三维

图5 典型地区地质剖面实景三维

Fig. 5 The typical area of real 3D geological section

或激光垂向交叉线,激光水平线满足高程相等、满足激光线走向一致等特性,在获取实景三维后通过检验实景三维影像中激光水平线的高程,或者激光标志线的走向特性。

实景三维影像获取时可利用测量标尺、直角三角形等特定的几何模型构造长度、角度、面积等检验条件进行精度检验。

3 地质剖面制图综合

与传统遥感解译方式不同,高分辨率实景三维地质剖面分辨率可达毫米级,其地质单元色调和纹理更接近目视效果,依据剖面地质单元几何特征、色调、纹理等通过三维模型直接测量可完成地质剖面制图。剖面制图比例尺理论精度为 0.1 mm,表 2 为实景三维

表 2 制图比例与分辨率

Tab. 2 Mapping scale and resolution

制图比例	分辨率(m)	制图比例	分辨率(m)
1:50	0.005	1:500	0.05
1:100	0.01	1:1000	0.1
1:250	0.025	1:2000	0.2

地质剖面制图比例与实景三维分辨率对应表。

地质剖面制图综合是指将大比例尺剖面图缩编成中小比例尺图的过程,依据用图性质、比例尺等通过简化、概括、抽象等方法舍去次要信息,使得图面层次协调、对象清晰的制图过程(曲平等,2012)。常见地质剖面制图综合方法有逐级缩编法、自动综合法等。低分辨率实景三维不能绘制高于同等比例尺精度地质剖面,高分辨率实景三维影像可以通过制图综合方法绘制中小比例尺剖面图。

3.1 逐级缩编法

实景三维地质剖面测量应进行最大比例尺测图, 依据制图综合原理将大比例尺向中小比例尺逐级缩编。通过制图综合过程中的简化、位移、夸大、合并、分割等方法完成剖面制图综合。

例如, 获取 0.01 m 分辨率三维影像, 应采集 1:100 数字剖面, 依照制图综合方法逐级完成 1:250、1:500、1:1000、1:2000 剖面绘制。剖面绘制过程中, 对重要部位进行夸大, 非重要部位简化、合并、位移等概括表示。岩层产状、断层走向等要素应在最大分辨率下完成采集, 制图综合过程中对密集或次要信息进行抽稀或概略。

3.2 自动综合法

自动综合法是指通过技术手段自动生成任意中小比例尺数据, 信息量随着比例尺变化自动增减, 信息的压缩与复原和比例尺是自动适应的(赵丽宁等, 2001)。随地质剖面显示比例尺变化, 断层、产状、岩性花纹、裂隙等剖面信息自适应增减, 并呈现信息承载的最优化特征。常见的自动综合算法有优先级法(刘波等, 2008)、结点自动删除法(李靖涵, 2018)、弯曲简化法(段修梅, 2012)、移动平均法等方法对大比例地质剖面进行自动选取、简化等。

4 典型案例分析

4.1 黄土高原中生界垂直剖面

试验区位于陕西省铜川市, 出露岩石地层有中三叠统纸坊组(T_2z)、上三叠统铜川组(T_3t)、胡家组(T_3h)、永坪组(T_3y)、瓦窑堡组(T_3w)、下侏罗统延安组(J_1y)、直罗组(J_1z)、下白垩统宜君组(K_1y)、洛河组(K_1l)等。地层产状发育较缓, 地质剖面常见为沿沟系发育的垂直剖面, 主要岩性为长石石英砂岩、砾岩、泥岩、油页岩、碳质页岩、煤线等。

本区域实景三维资料获取主要采用大疆精灵 4 无人机平台, 采用垂直及倾斜航线飞行, 航高约 10~30 m, 航向重叠度设置 80%, 旁向重叠度设置 60%。便携式近景 GNSS 数字相机路线摄影测量补充。完成三叠系、侏罗系、白垩系地质剖面总计约 2.6 km。实验对比实景三维影(图 5b、图 5e、图 5g)及地质剖面特征。

(1)通过 GNSS 数字相机获取实景三维影像分辨率可达 1~5 mm, 基本可以识别 10~30 mm 砾石等要

素, 如宜君组中大量砾岩。砂岩、泥岩、煤线等要素几何表达清晰可见, 岩层产状、岩层厚度等要素测量结果与检查结果吻合较好。实景三维建模应用效果优于同位置肉眼观察, 部分人员难以涉足陡崖地形区有显著的测量优势。

(2)无人机低空摄影可满足大面积长距离剖面的实景三维建模。分辨率可达 0.5~5 cm, 无人机建模分辨率略低于数字相机, 但砂岩、泥岩、煤线等要素较易区分, 砂岩中砾石、岩石中垂向节理及小型断裂亦可清晰分辨。实验表明, 无人机剖面应用从效率及测量精度上与传统罗盘、钢尺方法无显著区别, 与 RTK 方法(李玲等, 2018)地质剖面相比具有显著的效率优势。

(3)GNSS 数字相机近景摄影较无人机摄影具有一定高分辨率优势, 其缺点也较明显如: 摄影基线网较短且在摄影基线布置不合理情况下易导致三维模型垂向变形较大。无人机建模后, 通过与数字影像公共点采集一定密度像控点、无人机影像和数字影像联合建模等方案可减小数字相机或者智能手机影像建模的局部误差。

4.2 土壤样坑剖面建模

试验区位于陕西关中平原区农田, 为研究农田表层土壤及植物根系状况, 进行土壤取样采样坑实验, 实验坑长宽高约 1 m×1 m×1 m。采用大疆御无人机及 GNSS 数字相机进行对比实验(图 5d)。无人机航高 5~15 m, 航向重叠度 80%, 旁向重叠度 60%; GNSS 数字相机地表拍摄, 相机与目标距离约 2~5 m, 从不同方向完成采样坑相片 150 余张。

通过实验对比, GNSS 数字相机与无人机获取探坑几何要素精度基本相当, 直线定向、长度变形差异可忽略不计, 满足传统采样坑的三维建模精度要求。

GNSS 数字相机实景三维分辨率优于 1 mm, 实景三维中可见清晰的小麦根须以及杂草根茎。无人机获取实景三维优于 5 mm, 采样坑土壤含水、土壤成分变化等色调信息实景三维中能较好体现。实景三维土壤采样坑建模结果优于同等距离条件下肉眼观察要素。

4.3 陕西北白钨矿探槽

地质探槽、拨土等是地质施工中重要的工作方法和实物依据, 三维可视化后具有较好的工程应用价值。实景三维探槽能够较好的复原探槽及矿体或矿化体的赋存位置及其几何形态。可采用普通智能手机或

者 GNSS 数字相机完成建模数据获取。普通智能手机应布设相控或获得 GNSS 三维坐标。

试验区位于陕西省宁陕县花岗岩与地层接触部位,因本区域高大植被覆盖较好,无人机完成航摄较为困难。从东、南、西、北、东北、西北、西南、东南等不同方向获取建模相片 222 张,并从垂向获取探槽壁、探槽底部不同方位的相片,相片重叠度优于 90%。数字相机或智能手机与探槽距离约 2~10 m。

综合实验结果显示:①智能手机相片建模分辨率优于 1~5 mm, GNSS 数字相机分辨率优于 1~5 mm。实景三维模型分辨率优于同等条件下肉眼所见。②探槽测量中采用激光水平光源制造激光水平线,三维建模后利用激光水平线验证探槽垂向变形状况(图 5c)。实景三维产状测量结果与传统罗盘无显著差异,探槽长度等几何形变可忽略不计。③采用激光水平装置制造垂直或水平相交激光线及交点,或采用激光反光标志等制造相控点,并利用全站仪或 CORS 测量。标志点作为建模像控点或检验点,GNSS 定位困难时,将提高三维建模的几何精度。④白钨矿在紫外光下呈现出浅蓝色萤光,紫外光源激发状态下获取近景相片,重建实景三维模型,有利于立体环境下矿体或矿化体观察和三维空间角度矿体的赋存状态

研究。

4.4 中高山区中小比例剖面

航空摄影测量存在困难时可采用高分辨率卫星遥感影像获取三维模型,或采用 DEM 与正射影像形成三维模型,也可采用三维模型与近景摄影测量等综合方式形成三维模型,完成相应的地质剖面测量、制图综合等。

试验区位于新疆乌苏博罗克鲁山腹地,出露地层为东图津河组(C_2dt)。剖面沿南北向断裂发育,断裂东西两侧崖壁 $60^\circ\sim 90^\circ$ 近直立状,崖壁高差约 400 m。通过高分卫片、DEM、近景摄影测量等综合方法建模获取实景三维(图 5)。近景相片分辨率优于 20 cm,实景三维中一般的地层界线、构造界线、垂向节理等可清晰解译。东图津河组一段(C_2dt^1)主要为火山碎屑岩,近景相片中呈深灰色或灰黑色,二段(C_2dt^2)主要为岩性灰岩,近景相片呈乳白色。东图津河组地质剖面总长度约 2.8 km,剖面北侧灰岩段逆冲于火山碎屑岩之上;南测灰岩段与火山碎屑岩段之间发育大量的互层或条带。灰岩中穿插大量火山碎屑岩条带,火山碎屑岩条带随高度变化呈现厚度变薄、频次减弱特征(图 6)。依实景三维剖面及测量结果推测,东图津河组海陆交互特征明显(张天继等, 2006)。

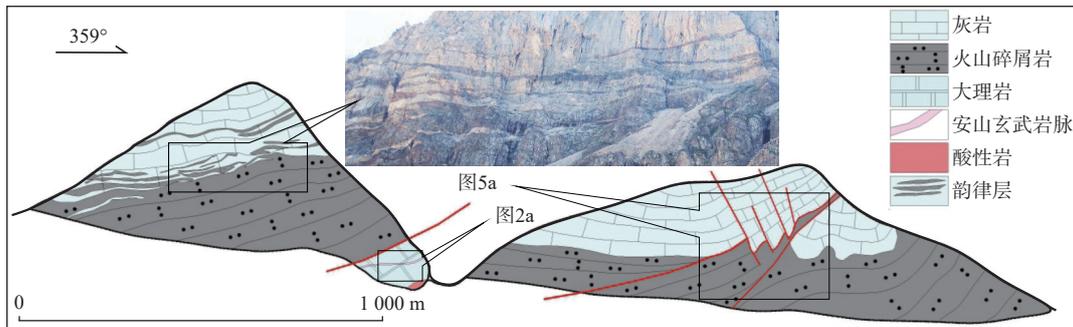


图6 新疆乌苏东图津河组实景三维制图综合剖面

Fig. 6 Real 3D and Cartographic synthetic section of Dongtujinhe Formation in Wusu, Xinjiang

实验表明,中高山区或者造山带地质剖面实景三维测量还应参考如下几个步骤和原则:①剖面宏观走向依据岩层的主要产状、接触界线等整体投影形变最小的原则。②实景三维测量先整体后局部。先整体指先绘制剖面的整体界线、地层界线、断层界线等;后局部是指在宏观界线基础上,绘制岩层、裂隙、测量产状等。③剖面的绘制应该按照大比例尺、中比例尺、小比例尺逐级缩编,剖面逐级缩编需要按照制图综合的基本原则完成,对具有特殊意义的地层或非正

式填图单元按照一定制图综合原则合理放大、平移、合并等。

5 结论

(1)测图精度高、效率高。普通数字相机或智能相机像素目前已达到 1 亿像素,对应地质剖面分辨率部分优于毫米级。通过测试,部分实景三维剖面整体建模效果优于同位置肉眼观察。

(2)设备多样,采集方案多样。地质剖面实景三维获取方式多样,长距离、大面积地质剖面可采用多镜头长航时无人机低空采集,地质队员单人携带便携式摄影器材如数字相机、智能手机等可以完成剖面地质调查或路线地质调查典型地质现象的实景三维的获取工作。

(3)数据共享。实景三维数据基于通用三维建模格式,模型具有良好的几何特征和数据共享特征。实景三维模型存储格式具有精确的几何特征和丰富的纹理特征,可以作为重要工程施工的佐证档案。实景三维与传统的存档相片相比具有精确的可测量性、信息多样性等特征。

(4)基于多光谱相机的实景三维地质剖面,将为剖面测量和矿物诊断提供良好的制图依据。

致谢:本次实验过程感谢中国地质调查局西安地质调查中心朱涛高级工程师、西安地质矿产勘查开发院苏英明等工程师参与研究并提出宝贵意见。

参考文献(References):

- 蔡小超,唐红涛.运用倾斜摄影测量技术精细提取新疆皮山县地质构造定量参数[J].地震研究,2022,45(03):468-478.
- CAI Xiaochao, TANG Hongtao. Precise Extraction of Quantitative Parameters of the Geological Structure in Pishan County, Xinjiang Using Oblique Photogrammetry[J]. Journal of Seismological Research, 2022, 45(03): 468-478.
- 常晓艳.无人机倾斜摄影测量技术在地灾监测中的应用[D].秦皇岛:燕山大学,2021.
- CHANG Xiaoyan. Application of UAV Tilt photogrammetry technology in Geological Hazard Monitoring[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- 崔玉福,刘质加,王靖.数字孪生卫星技术与工程实践[J].航天器工程,2021,30(06):62-69.
- CUI Yufu, LIU Zhijia, WANG Jing. Digital Twin satellite Technology and Its Engineering Practice[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(06): 62-69.
- 段修梅.基于1:1万地形数据更新1:5万DEM的方法研究[D].长沙:中南大学,2012.
- DUAN Xiumei. Updating method of 1:50 000 scale DEM Based on 1:10 000 scale terrain data[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- 胡运海.近景摄影测量技术在滑坡监测中的运用[D].成都:成都理工大学,2012.
- HU Yunhai. The application of close-range photogrammetry in Landslide monitoring Take the landslide in Phoenix Mountain, Leigu Town, Beichuan County for example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- 贾俊,李志忠,郭小鹏,等.多源遥感技术在降雨诱发勉县地质灾害调查中的应用[J].西北地质,2023,56(03):268-280.
- JIA Jun, LI Zhizhong, GUO Xiaopeng, et al. Application of Multi-source Remote Sensing Technology on Investigation of Geological Disasters Induced by Rainfall in Mian County[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(03): 268-280.
- 李靖涵.海底地貌自动制图综合算法研究[D].郑州:战略支援部队信息工程大学,2018.
- LI Jinghan. Research on Automated Cartographic Generalization of Submarine Relief[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2018.
- 李林,朱立峰,李政国,等.复杂断裂构造条件下城市地质三维建模方法研究[J].西北地质,2022,55(04):133-139.
- LI Lin, ZHU Lifeng, LI Zhengguo, et al. Technology Research on the Constructing of Urban Geological 3D Model in Condition of Complex Faults[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(04): 133-139.
- 李玲,王俊锋,王龙杰,等.RTK方法在地质剖面测量中的应用[J].陕西地质,2018,36(01):95-98.
- LI Ling, WANG Junfeng, WANG Longjie, et al. Application of RTK Method in Geological Profile Survey[J]. Geology of Shaanxi, 2018, 36(01): 95-98.
- 李煜.基于无人机与摄影测量的不同尺度地质结构面精细识别[D].南京:南京大学,2017.
- LI Yu. Fine Recognition of Geological Structure Surface on Different Scales by UAV and Photogrammetry[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- 梁京涛,铁永波,赵聪,等.基于贴近摄影测量技术的高位崩塌早期识别技术方法研究[J].中国地质调查,2020,7(05):107-113.
- LIANG Jingtao, TIE Yongbo, ZHAO Cong, et al. Technology and method research on the early detection of high-level collapse based on the nap-of-the-object photography[J]. Geological Survey of China, 2020, 7(05): 107-113.
- 刘波,刘晓红,朱颖.无级比例尺GIS技术中制图要素分级探讨[C].海洋测绘综合性学术研讨会论文集.2008.
- LIU Bo, LIU Xiaohong, ZHU Ying. A Discussion on the Grading of Mapping Elements in the GIS Technology with Continuous Scale[C]. Comprehensive Academic Conference on Marine Surveying and Mapping. 2008.
- 刘立,陈宏宇,刘娟,等.地质灾害隐患三维一张图构建方法[J].测绘工程,2022,31(05):46-53+60.
- LIU Li, CHEN Hongyu, LIU Juan, et al. Research on the method of constructing a three-dimensional map of geological disasters[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2022, 31(05): 46-53+60.

- 刘帅, 陈建华, 王峰, 等. 基于无人机倾斜摄影的数字露头实景三维模型构建[J]. 地质科学, 2022, 57(03): 945-957.
- LIU Shuai, CHEN Jianhua, WANG Feng, et al. Construction of a 3D model of digital outcrop real scene based on UAV oblique photography[J]. Chinese Journal of Geology(Scientia Geologica Sinica), 2022, 57(03): 945-957.
- 卢立吉, 王凤艳, 王明常, 等. 基于误差理论的产状测量精度评定[J]. 世界地质, 2016, 35(02): 567-574.
- LU Liji, WANG Fengyan, WANG Mingchang, et al. Evaluation on precision of occurrence measurement based on theory of errors[J]. Global Geology, 2016, 35(02): 567-574.
- 马建雄, 明镜, 郭微. 无人机倾斜摄影构造地质剖面解译[J]. 测绘通报, 2022, (S2): 167-169+184.
- MA Jianxiong, MING Jing, GUO Wei. Interpretation of tectonic geological profiles based on UAV oblique photography[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022, (S2): 167-169+184.
- 曲平, 王铁军, 梁文光. 地理信息数据库缩编方法的探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(06): 75-76+79.
- QU Ping, WANG Tiejun, LIANG Wenguang. Research on the Methods of Geoinformation Database Reduction[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 35(06): 75-76+79.
- 万荧, 邹进贵, 孟丽媛. 近景摄影测量在地质观测中的应用研究[J]. 测绘通报, 2016, (S2): 250-253.
- WAN Ying, ZOU Jingui, MENG Liyuan. Application of close-range photogrammetry in geological observations[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016, (S2): 250-253.
- 王俊锋, 白宗亮, 田琮, 等. Google Earth在地质解译中的应用[J]. 新疆地质, 2014, 32(01): 136-140.
- WANG Junfeng, BAI Zongliang, TIAN Cong, et al. The Application of Google Earth in Geological Interpretation[J]. Xinjiang Geology, 2014, 32(01): 136-140.
- 王莫. 对古建筑现状立面图表现形式的探讨[J]. 中国文物科学研究, 2015, (01): 74-77.
- WANG Mo. A Discussion of Appearance Methods for Elevations Plan of Historical Architecture's Current Situation[J]. China Cultural Heritage Scientific Research, 2015, (01): 74-77.
- 闫博, 袁红旗, 袁康, 等. 无人机在地质工作中的应用[J]. 地质科学, 2020, 55(4): 1327-1339.
- YAN Bo, YUAN Hongqi, YUAN Kang, et al. Application of UAV in geological work[J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(4): 1327-1339.
- 印森林, 谭媛元, 张磊, 等. 基于无人机倾斜摄影的三维露头地质建模: 以山西吕梁市坪头乡剖面为例[J]. 古地理学报, 2018, 20(05): 909-924.
- YIN Senlin, TAN Yuanyuan, ZHANG Lei, et al. 3D outcrop geological modeling based on UAV oblique photography data: A case study of Pingtouxiang section in Lüliang City, Shanxi Province[J]. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition), 2018, 20(05): 909-924.
- 张天继, 李永军, 王晓刚, 等. 西天山伊什基里克山一带东图津河组的确立[J]. 新疆地质, 2006, (01): 13-15+99.
- ZHANG Tianji, LI Yongjun, WANG Xiaogang, et al. Fossil Evidence for the Dongtujinhe Formation of Yishenjilike Mountain, Western TianShan[J]. Xinjiang Geology, 2006, (01): 13-15+99.
- 赵丽宁, 赵德鹏. 数字海洋地理要素无级比例尺自动综合方法[J]. 大连海事大学学报, 2001, (01): 106-109.
- ZHAO Lining, ZHAO Depeng. A study on the method of geo-spatial information automatic generalization in Digital Ocean[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2001, (01): 106-109.
- 郑明, 宋扬, 唐菊兴, 等. 青藏高原高海拔—难进入地区无人机地质调查试验研究与应用展望[J]. 地质论评, 2022, 68(04): 1423-1438.
- ZHENG Ming, SONG Yang, TANG Juxing, et al. Groundbreaking flying test of the UAV-Based geological survey in high-elevation and hard-to-reach areas of the Qinghai—Xizang(Tibet) Plateau and its application prospect[J]. Geological Review, 2022, 68(04): 1423-1438.
- 朱鹏先, 项巧敏. 空间直线与平面的交点[J]. 数学学习与研究, 2021, (13): 149-150.