

引用格式: 毕瑞, 甘淑, 袁希平, 高莎, 胡琳. 复杂地貌无人机遥感 3D 场景构建[J]. 山地学报, 2022, 40(1): 151-164.

BI Rui, GAN Shu, YUAN Xiping, GAO Sha, HU Lin. 3D scene construction of complex landform based on UAV remote sensing [J]. Mountain Research, 2022, 40(1): 151-164.

## 复杂地貌无人机遥感 3D 场景构建

毕瑞<sup>1</sup>, 甘淑<sup>1,2\*</sup>, 袁希平<sup>2,3</sup>, 高莎<sup>1</sup>, 胡琳<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 云南省高校高原山地空间信息测绘技术应用工程研究中心, 昆明 650093; 3. 滇西应用技术大学, 云南 大理 671000)

**摘要:** 针对地形起伏变化较小、形态特征单一的地貌, 无人机遥感多采用“已”字形垂直视角或模拟多镜头垂直视角航线从 5 个方向对目标对象进行数据采集, 构建 3D 场景, 但是对于地貌形态、空间分布急剧变化的山地环境, 通过传统航线方式获取地貌影像时容易出现工作效率低、飞行安全性低、精度低等问题, 适宜的航线规划方案是确保无人机飞行安全、提高工作效率、获取高质量影像的前提。本文基于无人机遥感技术, 以云南省恐龙谷南缘的环状构造地貌入口处的典型坑唇地貌为研究区, 利用 RTK 无人机获取坑唇地貌山脊上的大坡度地层露头影像, 规划井字形格网交叉倾斜视角航线, 采用 SfM 和 MVS 算法构建 3D 场景, 基于目视解译、GIS 地形特征提取和分析等方法实现多角度、多方法、精确的地貌特征识别、量测和地形特征分析。研究表明: (1) 井字形交叉格网倾斜航线能构建平均精度达 97.4%, 具有厘米级精度的大坡度地层露头地貌 3D 场景。 (2) 目视解译得到的 11 条地层露头平均长度为 92.62 m、平均倾角为 12.40°, 中部地层露头分布稀疏, 两侧较为密集, 山脊上部的地层露头走向为西南—东北、中部为南—北、下部为东南—西北。 (3) 地层露头整体近似为连续的阶梯状错断分布, 大部分地层露头分布在高程为 1695~1715 m、坡度为 40°~60°、坡向为西南的山脊中部, 且山脊中部有 2 个明显断层, 垂直断距为 5.42 m 和 16.18 m, 山脊下侧的地层露头坡度最大, 地形变化明显。本研究成果可为利用无人机遥感技术在复杂山地环境下获取高质量地貌影像和精细化地貌识别及其地形特征分析提供一种有效的参考方法。

**关键词:** 无人机; 遥感; 3D 场景构建; 井字形格网; 航线

**中图分类号:** P23

**文献标志码:** A

地貌是地球表面形成的各种起伏形态, 是了解和分析自然地理环境的重要因素<sup>[1]</sup>。我国疆域辽阔, 地貌类型丰富<sup>[2-5]</sup>, 地貌形态的特征分析对自然环境变化<sup>[6]</sup>、灾害识别<sup>[7-8]</sup>、地质构造运动<sup>[9]</sup>等研究具有重要意义。

针对大范围的地貌调查及其特征分析的传统方法多利用计算机技术结合大量的野外现场调研实测数据实现<sup>[10-11]</sup>, 作业风险性强、时间成本高, 并且测

量成果精度受多方面因素影响。近年来, 通过 DEM<sup>[12]</sup>、光学遥感影像<sup>[13]</sup>、雷达遥感影像<sup>[14]</sup>、三维激光扫描数据<sup>[15]</sup>以及多源数据的融合<sup>[16]</sup>能实现更为精确、定性和量化的地貌调查和分析, 但由于卫星过境周期长、自然环境因素干扰较大、影像分辨率低等问题, 无法对单一、小范围的地貌实现更高精度的分析研究。目前, 利用机动灵活、低成本、数据成果丰富<sup>[17]</sup>的无人机 (Unmanned Aerial Vehicle,

收稿日期 (Received date): 2021-04-02; 改回日期 (Accepted date): 2022-01-01

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41861054)。[National Natural Science Foundation of China (41861054)]

作者简介 (Biography): 毕瑞 (1996-), 男, 云南昆明人, 博士研究生, 研究方向: 摄影测量与遥感, 无人机遥感及其应用。[BI Rui (1996-), male, born in Kunming, Yunnan province, Ph. D. candidate, research on photogrammetry and remote sensing, UAV remote sensing and its application] E-mail: biergr805453393@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): 甘淑 (1964-), 女, 云南腾冲人, 教授, 博士, 研究方向: 资源环境遥感及 3S 技术应用。[GAN Shu (1964-), female, born in Tenchong, Yunnan province, Ph. D., professor, research on remote sensing and 3S technology application of resources and environment] E-mail: 18142645886@163.com

UAV)获取不同时期不同地貌的高分辨率影像,通过构建3D场景实现多视角、快速和非接触的地貌调查,利用得到的DEM和DSM数据进行地形特征提取及其演化分析等研究<sup>[18-22]</sup>,为地貌调查和地形特征分析提供了一种新手段。众多研究中,针对地形起伏变化较小、形态特征较为单一的地貌多采用“已”字形垂直视角<sup>[23-25]</sup>或模拟多镜头垂直视角航线<sup>[26]</sup>从5个方向对目标对象进行数据采集。但是云南高原山地环境复杂,地貌形态、空间分布的多样化,通过传统航线方式获取地貌影像时容易出现工作效率低、成果质量差、精度低等问题,适宜的航线规划方案是确保无人机飞行安全、提高工作效率、获取高质量影像的前提。因此,对于地形起伏变化较大区域的典型地貌,研究无人机技术对于获取最优影像数据的方法以及探讨精细化的地貌特征识别、精确的地形特征量测和分析方法具有重要意义。

本文以云南省禄丰市西南侧恐龙谷南缘的环状构造地貌为研究区,选择入口处海拔较高的坑唇构造地貌上的大坡度地层露头为研究对象,采用井字形交叉格网倾斜视角航线获取无人机影像,利用运动恢复结构(Structure from Motion, SfM)和多视角立体视觉(Multi View Stereo, MVS)算法构建3D场

景,通过目视解译、GIS地形特征提取和分析等方法实现多视角精细化的地貌特征识别、精确的地形特征量测和分析,为实现无人机技术在获取高质量地貌影像和开展高精度地貌调查和地形特征分析提供方法参考。

## 1 研究区概括

本文选取云南省禄丰市西南侧恐龙谷南缘的环状构造典型地貌为研究区(图1a)。环状地貌(图1b)东西宽约3 km、南北长约10 km、直径约为4 km,内部为一凹陷坑,四周陡峭高山相连,形成放射性条纹状的坑唇山脊。大坡度地层露头位于整个环状构造东北方向入口最高处的大坡度坑唇山脊上(图1c),地层露头与周围地势形成鲜明对比,是进行地貌特征量测和地形特征分析绝佳的对象。

## 2 研究方法

### 2.1 数据采集

本文使用搭载视场角为84°、有效像素为2000万镜头的,配备多频多系统高精度实时动态定位

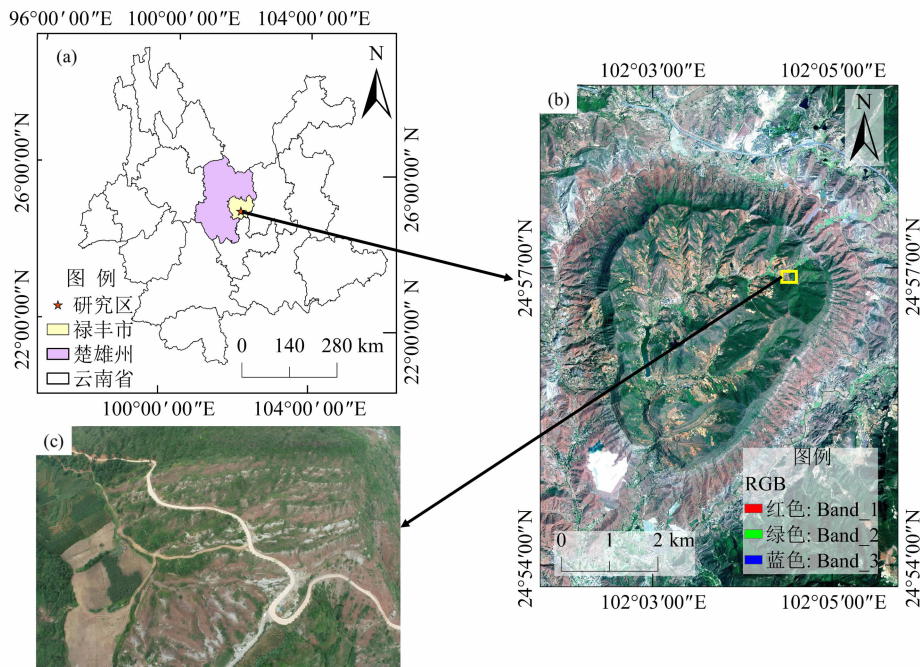


图1 研究区位置示意图:(a) 禄丰市区位;(b) 研究区卫星影像图(影像来源:天地图);

(c) 大坡度地层露头无人机影像(2020年10月5日,无人机获取)

Fig. 1 Location of the study area: (a) location of Lufeng city; (b) satellite image map (source: Map World);

(c) UAV image of the stratigraphic outcrops of the large slope strata (October 5, 2020, captured by UAV)

(Real - Time Kinematic, RTK) 系统, 可实现水平  $1\text{ cm} + 1\text{ ppm}$  (RMS) 和垂直  $1.5\text{ cm} + 1\text{ ppm}$  (RMS) 定位精度的大疆 Phantom 4 RTK (P4R) 无人机进行数据采集, 利用 GS RTK 地面站控制软件进行航线规划。

由于该区域地形坡度较大, 为避免飞行效率低、影像缺失或数据冗余等问题, 采用井字形交叉格网倾斜视角航线 (图 2a) 进行影像数据采集。确保获取陡坡 4 个方向的影像 (图 2b), 同时使相机主光轴尽可能垂直于陡坡表面 (图 2c), 减少因地形起伏度变化造成的影像畸变和重叠度降低的问题<sup>[26]</sup>。

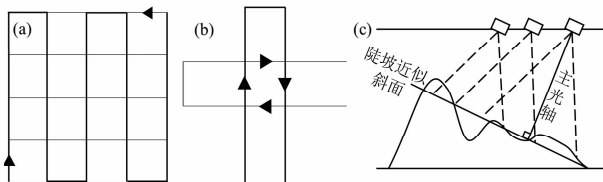


图 2 井字形格网交叉倾斜视角航线示意图:

(a) 航线图; (b) 四交点镜头方向; (c) 倾斜视角

Fig. 2 Diagram of well-shaped grid route with oblique-view: (a) flight route; (b) four intersection point lens direction; (c) oblique-view

研究区飞行面积约为  $0.55\text{ km}^2$ , 设置无人机飞行高度为  $200\text{ m}$ 、航向重叠度为  $70\%$ 、旁向重叠度为  $80\%$  和镜头倾角为  $45^\circ$ , 地面分辨率为  $6.98\text{ cm/px}$  并且 RTK 处于固定状态, 以获取实时差分信号。在光线充足的条件下, 获取影像共 128 张, 影像的 POS

坐标均为 CGCS 2000 坐标系。无人机飞行航线如图 3 所示。

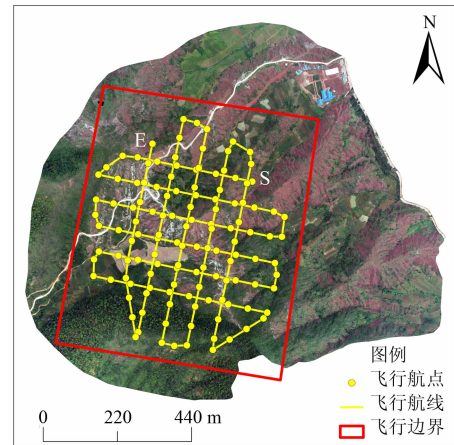


图 3 无人机飞行航线

Fig. 3 UAV flight route

## 2.2 3D 场景构建

对获取的影像进行检查和预处理后, 利用 SfM - MVS 算法构建 3D 场景<sup>[26-27]</sup>。3D 场景构建流程 (图 4) 主要为: SIFT 算法<sup>[28]</sup>提取影像特征点进行影像匹配、SfM 算法<sup>[29]</sup>构建稀疏点云、MVS<sup>[30]</sup>构建稠密点云、格网构建和纹理映射<sup>[31]</sup>。本文使用集成 SfM - MVS 算法的 ContextCapture Smart3d 软件实现 3D 场景构建, 得到 DOM、DSM 和密集匹配点云。

## 2.3 3D 场景精度分析方法

为保证地层露头特征量测和地形特征分析的准

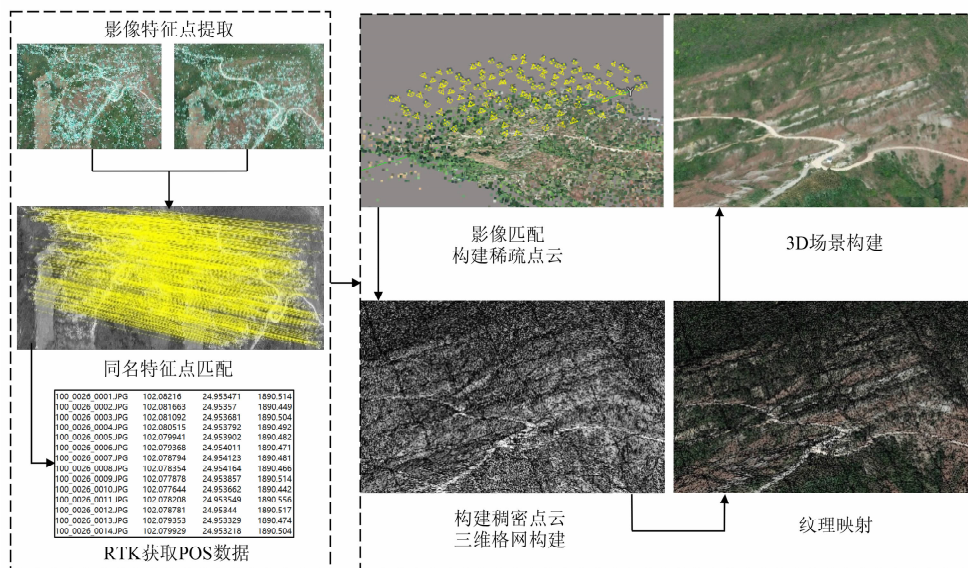


图 4 3D 场景构建流程

Fig. 4 3D scene construction process

确性,采用相对精度的评价方法对地层露头 3D 场景进行精度分析。在 3D 场景中选择明显规则的标志作为检测对象,计算 3D 场景测量值与实际测量值之间的偏差,采用平均精度作为 3D 场景精度评价指标。

平均精度计算公式如下:

$$\delta = \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\Delta_i|}{S_i}\right) \times 100\% \\ = \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|L_i - S_i|}{S_i}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中, $\delta$  为平均精度(%); $n$  为检测对象数量; $L_i$  为各检测对象在 3D 场景中的测量值(m); $S_i$  为各检测对象实际测量值(m); $\Delta_i$  为各检测对象误差值(m)。

## 2.4 地层露头特征分析方法

### 2.4.1 目视解译

为实现多视角、多方位的地层露头识别,利用分辨率为 7 cm/px 的 DOM 影像,根据地层露头的颜色、形态和纹理等信息,在 ArcGIS 10.7 目视解译的基础上,结合 3D 场景进行识别,获取地层露头的数量。同时,利用 Acute3D Viewer 中的距离测量工具得到相邻地层露头的间距,分析地层露头垂直分布上的相对差异。

### 2.4.2 特征量测方法

根据识别得到的地层露头,基于三角函数计算方法(图 5)提取地层露头形态参数,包括长度、高差、倾角和走向。以每一地层露头的坡脚位置为起点,将其延伸至终点,获取地层露头的起点  $A(x_A, y_A, z_A)$  和终点  $B(x_B, y_B, z_B)$  三维坐标作为计算参数,得到长度  $s$ 、高差  $\Delta h$ 、倾角  $\theta$  形态参数。

同时,为实现多方位地层露头走向分析,基于空间直线参数方程求解方法,利用 Matlab 逐一计算地

层露头对应的空间直线参数方程绘制结构迹线,并将得到的结构迹线分别投影至 XY 平面和 YZ 平面。

空间直线参数方程为:

$$\begin{cases} x = x_A + (x_B - x_A)t \\ y = y_A + (y_B - y_A)t \\ z = z_A + (z_B - z_A)t \end{cases} \quad (2)$$

式中, $t$  为参数。

### 2.4.3 GIS 地形特征提取和分析方法

地层露头之间不仅存在相对位置的关系,在地貌形态上也存在细微变化。因此,基于 DEM 进行高程、坡度、坡向、高程剖面 and 坡度剖面的 GIS 地形特征分析是理解和量化地形特征参数和频率分布的必要方法。为避免植被和农作物对地形特征参数量化导致的精度降低的影响,在去除原始点云中的大部分非地面点后,利用插值得到 0.3 m 分辨率的 DEM 作为基础数据。

## 3 结果与分析

### 3.1 3D 场景精度分析

选取汽车天窗、道路宽、汽车车身宽度和隔离墩 4 类检测对象(图 6)进行 3D 场景相对精度评价。在 Acute3D Viewer 获取检测对象的模型测量值,各检测对象测量值与实际值对比结果如表 1 所示。

表 1 检测对象测量值与实际值对比结果

Tab. 1 Comparison results between the measured value and the actual value of the detection objects

检测对象	量测对象	测量值 $L_i$ /m	实际值 $S_i$ /m	误差 $\Delta_i$ /cm
汽车天窗	长	1.27	1.26	1
	宽	0.74	0.70	4
道路	宽	3.83	3.80	3
汽车车身	宽	1.62	1.60	2
隔离墩 1	长	1.99	2.00	-1
	宽	0.46	0.50	-4
隔离墩 2	长	2.02	2.00	2
	宽	0.49	0.50	-1
隔离墩 3	长	2.04	2.00	4
	宽	0.48	0.50	-2

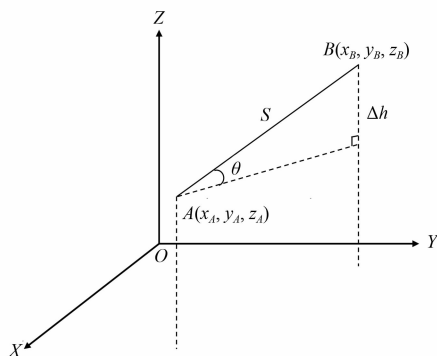


图 5 三角函数计算方法示意图

Fig. 5 Trigonometric function calculation method

由表 1 统计结果得到,各检测对象测量精度均为厘米级,无人机技术能真实还原实际地形,构建高质量的地层露头地貌 3D 场景。结合式(1)计算得到 3D 场景平均精度为 97.4%,数据成果可用于地层露头地貌的特征量测和地形特征分析。

### 3.2 地层露头特征识别和量测分析

#### 3.2.1 特征识别分析

结合 DOM 和 3D 场景目视解译得到,地层露头整体由西南向东北方向延伸分布(图 7a),白色状砂岩分布在植被覆盖度较低的环状坑唇构造内侧(图 7b),与周围植被、土壤、农田形成鲜明对比。部分

地层露头被道路切断,大部分地层露头呈条状分布于道路一侧的山脊上。以山脊一侧的地层露头为主,共解译出 11 条地层露头(图 7c),中部地层露头分布稀疏,两侧较为密集,计算得到相邻地层露头的平均间距为 12.46 m。

#### 3.2.2 特征量测分析

根据地层露头的多视角立体识别结果,对 11 条地层露头进行特征量测分析。由 11 条地层露头特征量测结果(表 2)和倾角统计结果(图 8)得到,地层露头平均长度为 92.62 m、平均倾角为  $12.40^{\circ}$ ,地层露头随着高度的增加逐渐变陡,较陡

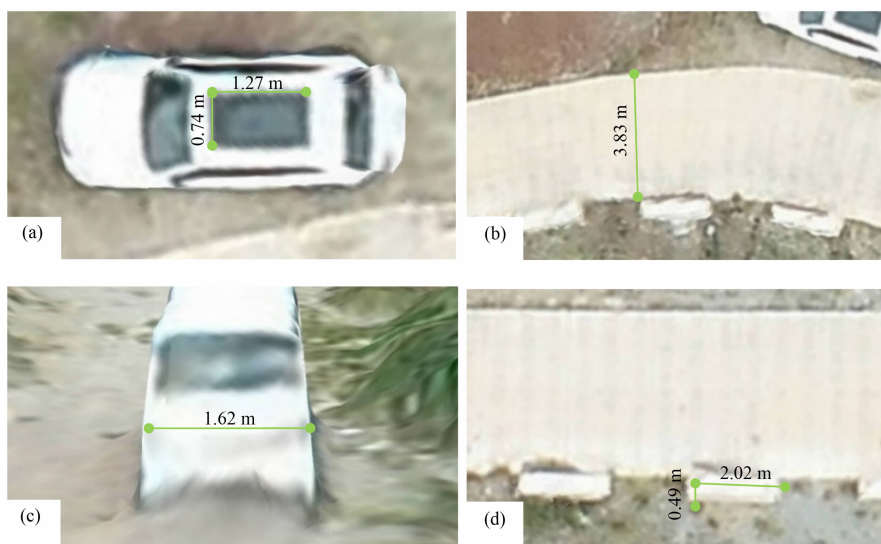


图 6 3D 场景精度评价检测对象:(a)汽车天窗;(b)道路宽度;(c)汽车车身宽度;(d)隔离墩

Fig. 6 Detection objects for 3D scene accuracy evaluation: (a) car sunroof; (b) road width; (c) car body width; (d) isolation pier



图 7 地层露头解译结果:(a)地层露头示意图;(b)环状坑唇构造地貌两侧 3D 场景;(c)露头地貌间距测量

Fig. 7 Interpretation results of stratigraphic outcrops: (a) diagram of stratigraphic outcrops; (b) 3D scenes on both sides of annular pit-lip landforms; (c) outcrop landforms spacing measurement

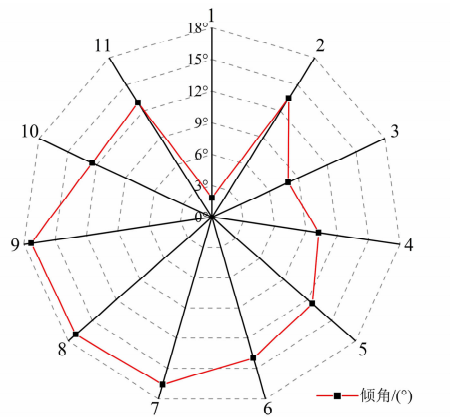


图 8 地层露头倾角统计结果  
Fig. 8 Statistical results of stratigraphic outcrop dip angle

的地层露头分布于山脊中部(图 8 中 6#~9#),长度介于 40~100 m、倾角介于 13.97°~17.29°,较高区域的地层露头(图 8 中 7#~9#)倾角变化差异不明显。

由不同投影面上的地层露头结构迹线结果(图 9)得到,地层露头之间相互平行,整体走向为西南—东北逐渐上升(图 9a),由俯视图(图 9b)得到,地层露头分布位置不同其走向存在差异,靠近山脊上部的地层露头走向为西南—东北、中部为南—北、下部为东南—西北方向,上部与下部走向相反,地层露头终点方向呈环形指向山脊最高处。

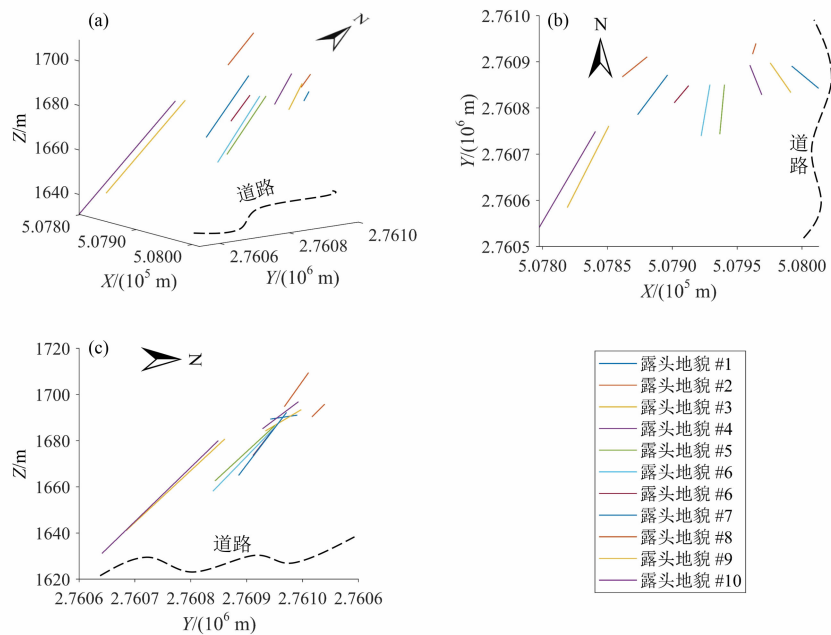


图 9 地层露头地貌结构迹线结果:(a)露头地貌结构迹线;(b)俯视图;(c)立面图

Fig. 9 Results of structural traces of stratigraphic outcrops: (a) traces of stratigraphic outcrops; (b) top view; (c) elevation view

表 2 地层露头特征量测结果

Tab. 2 Measurement results of stratigraphic outcrops

编号	长度 s/m	高差 $\Delta h$ /m	倾角 $\theta/(^{\circ})$
1	52.59	1.71	1.86
2	23.63	5.50	13.46
3	66.92	9.25	7.95
4	66.17	11.74	10.22
5	109.90	23.94	12.58
6	114.49	27.63	13.97
7	40.34	11.52	16.59
8	92.94	27.27	17.06
9	49.63	14.75	17.29
10	183.98	39.68	12.46
11	218.27	48.90	12.95

3.3 地层露头地形特征分析

3.3.1 高程分布特征

为了直观地分析地层露头所处区域的高程分布差异,以 1 m 为间隔对高程进行频率统计(图 10a),根据频率统计中横坐标高程的区间值对 DEM 进行重分类(图 10b)。

由频率统计和重分类结果得到,该区域高程范

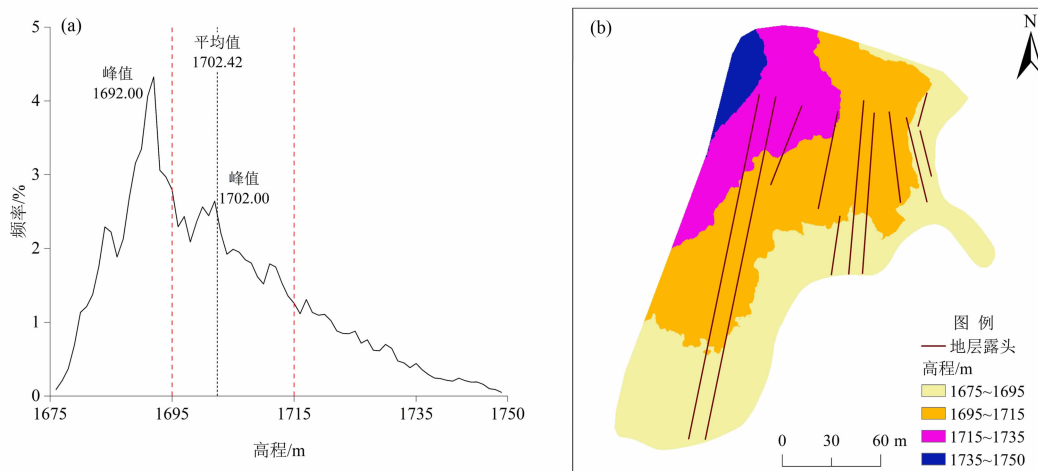


图 10 高程分析结果:(a) 高程频率统计;(b) 重分类

Fig. 10 Results of elevation analysis: (a) elevation frequency statistics; (b) reclassification

围为 1675 ~ 1750 m, 平均高程为 1702.42 m, 频率峰值对应高程为 1692.00 m, 位于山脊下侧; 大部分地层露头位于山脊中部, 高程为 1695 ~ 1715 m, 该高程区间出现第二个频率峰值, 对应高程为 1702.00 m, 接近平均高程; 随着高程的增加频率逐渐降低, 整体地形变化趋于稳定, 少部分地层露头延伸至山脊上部。

### 3.3.2 高程剖面分析

利用高分辨率的 DEM 可以直观地反映地层露头分布区域更为细微的地形变化。因此, 在地层露头分布集中区域设置正交于地层露头的高程剖面基准线(BB'), 以 30 m 为间隔平行设置上部 and 下部 2 条剖面线(AA' 和 CC') (图 11), 利用 3 条剖面线获取地层露头不同区域的地形变化。

由高程剖面结果得到, 地层露头上部(图 12a)地形起伏连续, 各地层露头以明显的折点进行区分。地层露头中部(图 12b)地形起伏变化明显, 地层露头多位于错断斜面上, 近似为连续的阶梯状分布(图 12b 中红线所示), 地层露头间距密集。地层露头下部(图 12c)地形起伏程度最大, 地层露头间距增加, 同一水平距离内分布多条地层露头, 区别特征不明显, 较难判断不同地层露头间的地形变化。

### 3.3.3 坡度和坡向分析

坡度是描述地层露头分布区域地形特征和评价地层露头稳定性的重要敏感参数之一, 坡向又决定了不同地层露头的日照和降雨条件, 影响地层露头

周围的植被长势。因此, 利用 DEM 进行坡度、坡向分析, 以 20° 为分类间隔将坡度进行重分类, 坡度、坡向分析结果如图 13 所示。

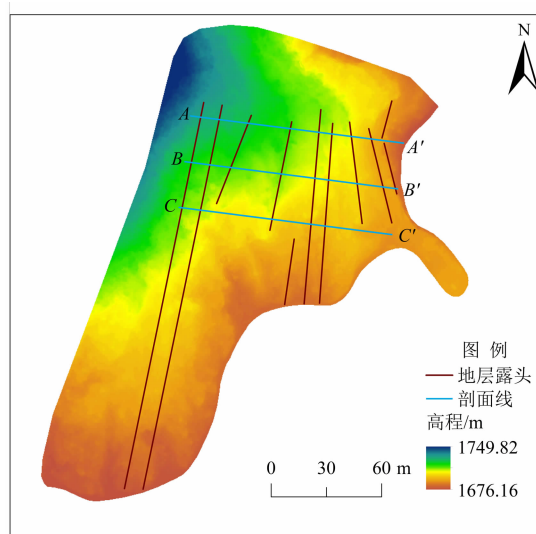


图 11 剖面线分布图

Fig. 11 Distribution of profile lines

由坡度分析结果(图 13a)得到, 该区域坡度主要以 20° ~ 40° 和 40° ~ 60° 两个区间交替分布, 地层露头主要分布于 40° ~ 60° 坡度较陡区域, 与周围坡度形成鲜明对比。坡向分析结果(图 13b)得到, 该区域坡向主要为东南方向为主, 其面积占比约为 27.80%, 地层露头主要分布在坡向为西南方向, 介于阳坡和半阳坡之间, 地层露头分布的坡向与整体坡向呈垂直分布。研究区位于北半球, 理论上地层

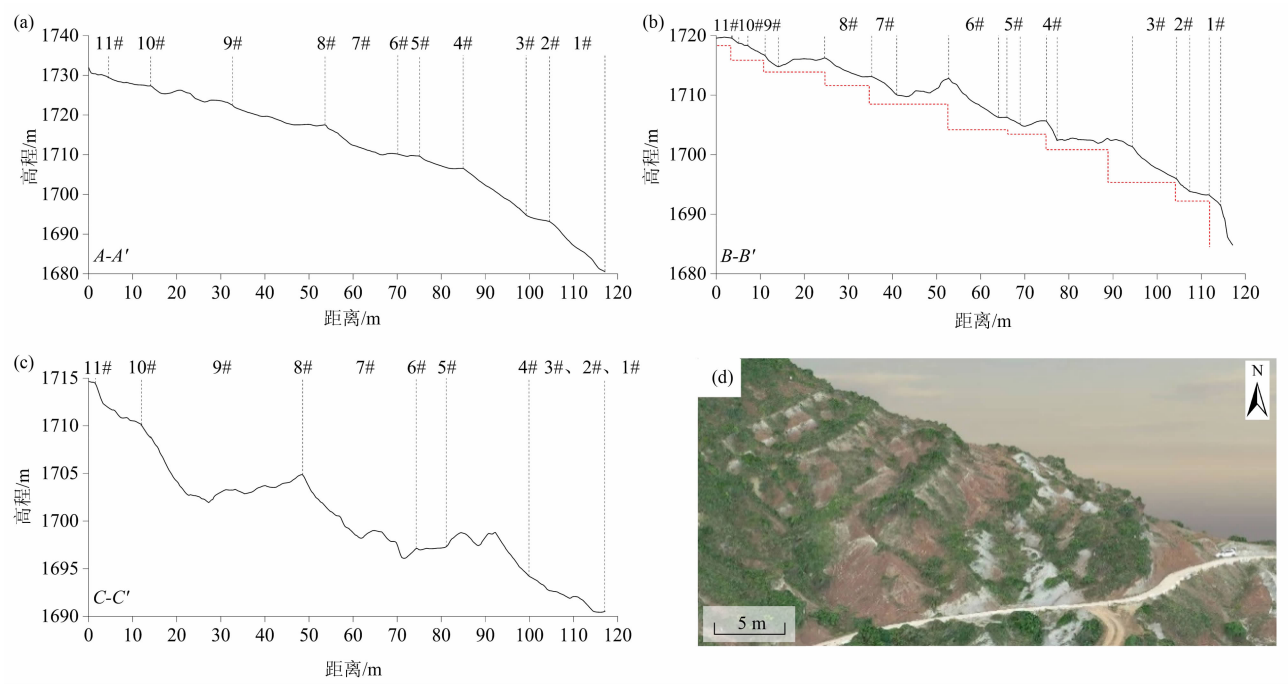


图 12 高程剖面分析结果:(a)上部高程剖面线;(b)中部高程剖面线;(c)下部高程剖面线;(d)地层露头 3D 场景侧视图  
Fig. 12 Results of elevation profile analysis: (a) the upper elevation profile line; (b) the central elevation profile line;  
(c) the lower elevation profile line; (d) side view of 3D scene of stratigraphic outcrops

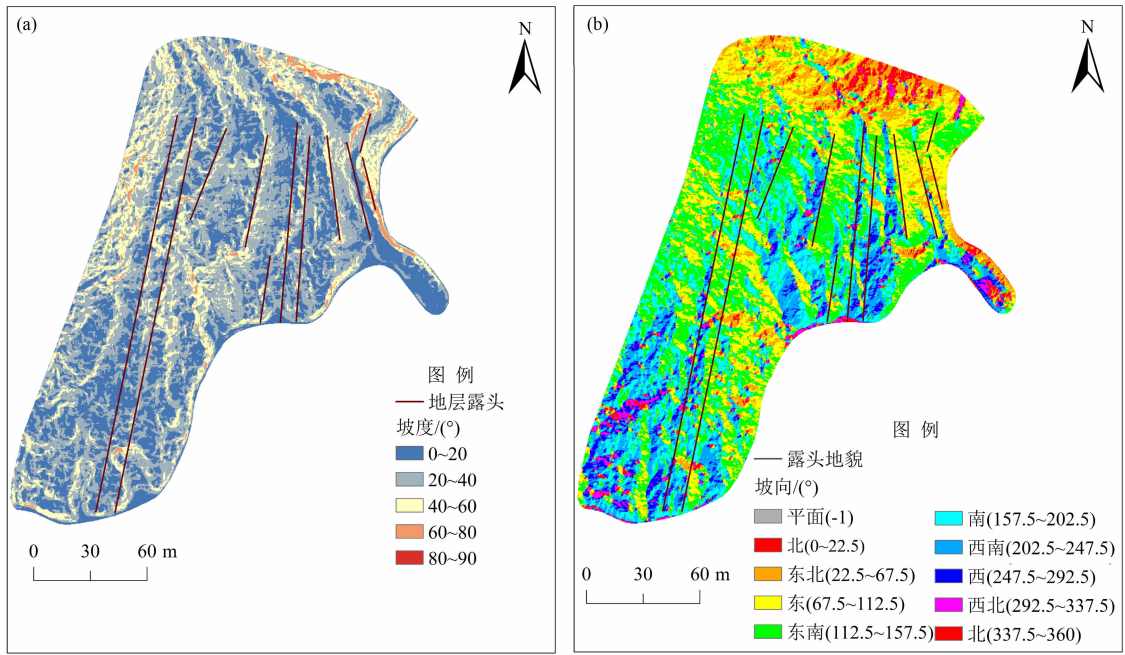


图 13 坡度、坡向分析结果:(a)坡度;(b)坡向  
Fig. 13 Analysis results of slope and aspect: (a) slope; (b) aspect

露头所在坡向区域植被覆盖应更为茂盛,但由于地层露头多为白色状砂岩,并且太阳辐射能量较强,土壤水分保持能力较弱,植被生长较差,相反其他区域

植被覆盖度较高。

3.3.4 坡度剖面分析

为了具体量化地层露头分布区域坡度的变化特

征,结合地层露头高程剖面结果,利用地形变化明显的中部高程剖面基准线( $BB'$ ),提取对应坡度值进行坡度剖面分析。由于直接使用坡度值会导致相邻坡度值出现跳跃性变化,整体不连贯,将坡度以正切函数值的形式进行表达,构建剖面距离与坡度正切函数值之间的关系。坡度剖面分析结果如图 14 所示。

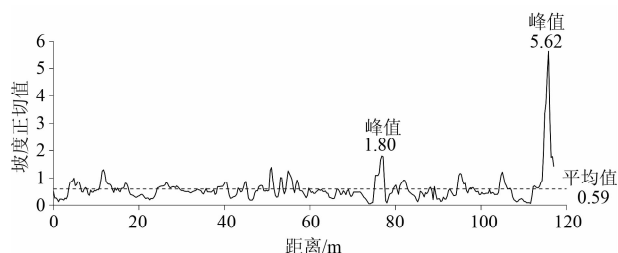


图 14 坡度剖面分析结果

Fig. 14 Results of slope profile analysis

由坡度剖面分析结果得到,地层露头坡度正切值变化范围为 0~6,整体坡度正切平均值为 0.59,对应角度约为  $30.5^\circ$ ,地层露头阶梯平面与垂直断面交界处形成了高于平均值的坡度。距离为 76.8 m 时,出现第一个峰值 1.80,对应角度约为  $60.95^\circ$ ,该峰值对应 4#地层露头,地层露头右侧为明显错断面,地势较陡,坡度角度增加。距离为

115.8 m 时,出现第二个峰值 5.62,对应角度约为  $79.91^\circ$ ,该峰值对应 1#地层露头,1#地层露头位于山脊下部,山脊下部靠近道路导致下部断面与道路近似垂直,坡度最大。

### 3.3.5 构造地貌断层分析

通过对地层露头进行识别以及地形特征分析可知,地层露头的分布与高程、坡度和坡向都存在一定联系。为了进一步探讨地层露头分布与构造地貌断层之间的联系,沿垂直于山脊方向设置 2 条高程剖面(图 15)进行分析,其中,高程剖面线  $DD'$  从地层露头分布区域延伸至环状构造地貌外部, $EE'$  为平行于  $DD'$  剖面线 125 m 处,由环状构造地貌内部延伸至外部。

在地层露头区域,高程剖面线  $DD'$  出现 2 个谷值,形成断层,计算得到 2 个断层的垂直断距为 5.42 m 和 16.18 m,越靠近山脊顶部,断层越明显,并且大部分地层露头分布于 2 个断层之间形成的抬升区域,随着水平距离的增加,环状构造地貌内外形成巨大断层,垂直断距为 56.99 m。对于地层露头覆盖较少区域,高程剖面线  $EE'$  出现 1 个谷值,垂直断距为 14.75 m,与高程剖面线  $DD'$  相比,断层出现的水平位置大致相同,整体形态连续,越靠近山脊顶部,平缓地势逐渐减少,形成的

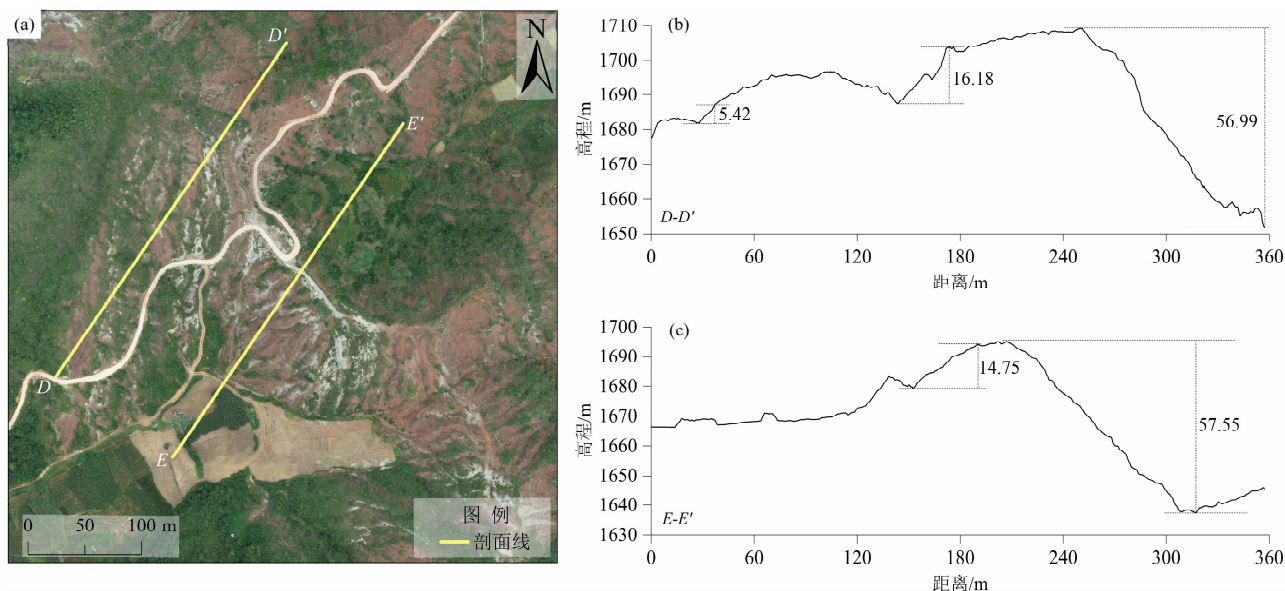


图 15 断层剖面分析结果:(a)剖面线示意图;(b)  $DD'$  剖面线结果;(c)  $EE'$  剖面线结果

Fig. 15 Results of fault profile analysis: (a) diagram of the profile lines; (b) result of  $DD'$  profile line; (c) result of  $EE'$  profile line

断层垂直断距为 57.55 m,构造地貌内外形成的断层垂直断距未有明显差异,外部地势变化相对平缓,地貌形态分布均匀。

## 4 讨论

### 4.1 数据获取方式的影响

无人机技术具有操作简单、机动灵活、高效率的数据采集和非接触等优势,可以快速还原复杂地形环境下的真实地貌三维形态,为实现多视角下的微地貌精细化形态特征三维量测和地形特征参数定性、量化分析提供了新的技术手段。

目前,地面三维激光扫描技术<sup>[32]</sup>广泛用于地貌的调查和分析,地貌识别和测量精度可到厘米级甚至是亚厘米级。但是对于地形地势起伏变化差异明显的区域,受仪器重量、地形遮挡以及扫描仪最大测量距离等限制,造成点云数据无法覆盖整个区域,并且不同点云去噪滤波处理方法得到的地面点直接关系后续插值得到的 DSM 或 DEM 数据精度,影响地形特征参数的准确性。

同时,利用无人机在进行数据采集时,航线规划至关重要,一方面影响数据的完整性,另一方面影响数据处理成果的精度。结果表明,针对复杂的地形环境,使用井字形格网交叉倾斜视角航线能确保地形起伏变化较大区域数据的完整性,能构建数据完整、测量精度较高的 3D 场景,可为实现精确的地貌特征识别和地形特征分析提供准确地基础数据。但是,野外数据采集时,单一的航线方式类型并不一定适用于所有地貌,还需根据实际地形特点,充分考虑飞行高度、镜头角度和重叠度等航线规划参数,保证获取高质量的影像和高精度的数据成果。

### 4.2 数据成果精度的影响

通过还原真实地貌,结合 3D 场景实现多视角立体下的地貌识别,利用相关数据成果可对地貌特征进行量测和地形特征分析。但是,地貌特征的量测精度和地形分析的准确性一方面是由于地形环境变化的影响,另一方面则是由于不同分辨率的 DEM 导致的。对于起伏程度较大的区域,随着 DEM 分辨率的降低,地形特征参数结果会逐渐

平滑<sup>[33]</sup>。相比较传统的 30 m、25 m 分辨率的 DEM,本研究使用 0.3 m 分辨率的 DEM 能获取更为细微的地貌特征变化,实现高精度的地形特征参数提取,数据结果更具有可信度。但是,对于单一使用 0.3 m 高分辨率的 DEM 进行分析相对比较局限,后续需进行不同高分辨率 DEM 对地形特征参数提取准确性的对比分析,根据不同地形特征参数的需求,确定最佳分辨率的 DEM 满足不同研究的需求。

本研究主要是利用无人机技术综合分析地层露头的 3D 场景、特征量测、高程分布、坡度和坡向等地形特征参数,实现单期数据的地层露头地貌的特征量测和地形特征的定性、量化分析,但是地貌的形成及其演化是多因素条件相互关联的结果,后续研究中,需结合多地形特征参数之间的相互关系来进行更加深入的探讨。

## 5 结论

本文利用 RTK 无人机获取恐龙谷南缘典型环状坑唇构造地貌上的大坡度地层露头高分辨率影像,利用 SfM 和 MVS 算法构建 3D 场景,基于目视解译、GIS 地形特征提取和分析方法实现多角度、多方法、精确地地层露头识别、量测和地形特征分析。主要结论如下:

(1)使用井字形格网交叉倾斜视角航线对于大坡度地层露头地貌具有较强的显著性,能实现快速、安全获取高质量影像,构建得到的 3D 场景精度可达厘米级,平均精度为 97.4%。

(2)通过目视解译识别出 11 条地层露头,平均长度为 92.62 m、平均倾角为 12.40°,中部地层露头分布稀疏,两侧较为密集,靠近山脊中部和上部地层露头倾角逐渐增加;结构迹线结果表明,靠近山脊上部的地层露头走向为西南—东北、中部为南—北、下部为东南—西北。

(3)地层露头整体上近似为连续的阶梯状分布,大部分地层露头位于高程为 1695 m ~ 1715 m、坡度为 40° ~ 60°、坡向为西南的山脊中部,并且山脊中部存在 2 个明显的错断,垂直断距为 5.42 m 和 16.18 m,靠近山脊下侧的地层露头坡度最大,地形

变化明显,并且构造地貌内外形成的断层垂直断距约为 57.27 m。

(4) 无人机遥感技术可为研究微地貌特征识别、量测及其地形特征分析提供精细的基础数据,将有助于进一步分析地貌的形成及其演化的关联机制,为实现高精度的微地貌三维重现提供重要的方法参考。

## 参考文献 (References)

- [1] 杨玉春,齐雁冰,付金霞,等. 基于 DEM 的地貌特征分析与类型划分——以砭砂岩区为例[J]. 中国水土保持科学,2019,17(6):1-10. [YANG Yuchun, QI Yanbing, FU Jinxia, et al. DEM based geomorphic features and classification: A case study in the Pisha sandstone area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(6): 1-10] DOI: 10.16843/j.sswc.2019.06.001
- [2] 黄思霜,许模,杨艳娜,等. 川东高陡背斜区水文网控制的地下岩溶空间分异研究[J]. 山地学报, 2020,38(1):83-92. [HUANG Sishuang, XU Mo, YANG Yanna, et al. Spatial differentiation of underground karst controlled by hydrological network in high-steep anticline in eastern Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2020, 38(1): 83-92] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000493
- [3] HU Sheng, QIU Haijun, WANG Ninglian, et al. The influence of loess cave development upon landslides and geomorphologic evolution: A case study from the northwest Loess Plateau, China [J]. Geomorphology, 2020, 359: 107167. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107167
- [4] 汪震,姜勇彪. 江西宜黄盆地丹霞地貌特征分析[J]. 山地学报,2019,37(6):839-847+942. [WANG Zhen, JIANG Yongbiao. Analysis of Danxia landform characteristics in the Yihuang basin, Jiangxi province, China [J]. Mountain Research, 2019, 37(6): 839-847+942] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000474
- [5] 熊礼阳,汤国安. 黄土高原沟谷地貌发育演化研究进展与展望[J]. 地球信息科学学报,2020,22(4):816-826. [XIONG Liyang, TANG Guoan. Research progresses and prospects of gully landform formation and evolution in the Loess Plateau of China [J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(4): 816-826] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190519
- [6] GARCIA G P B, GROHMANN C H. DEM-based geomorphological mapping and landforms characterization of a tropical karst environment in southeastern Brazil [J]. Journal of South American Earth Sciences, 2019, 93: 14-22. DOI: 10.1016/j.jsames.2019.04.013
- [7] 梁馨月,徐梦珍,吕立群,等. 基于地貌特征的青藏高原边缘泥石流沟分类[J]. 地理学报,2020,75(7):1373-1385. [LIANG Xinyue, XU Mengzhen, LYU Liqun, et al. Geomorphological characteristics of debris flow gullies on the edge of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(7): 1373-1385] DOI: 10.11821/dlxb202007004
- [8] 孙稳,何宏林,魏占玉,等. 基于无人机航测获取高分辨率 DEM 数据的断层几何结构精细解译与分析——以海原断裂唐家坡为例[J]. 地震地质,2019,41(6):1350-1365. [SUN Wen, HE Honglin, WEI Zhanyu, et al. Interpretation and analysis of the fine fault geometry based on high-resolution DEM data derived from UAV photogrammetric technique: A case study of Tangjiapo site on the Haiyuan fault [J]. Seismology and Geology, 2019, 41(6): 1350-1365] DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2019.06.003
- [9] GUI SADO-PINTADO E, JACKSON D W T, ROGERS D. 3D mapping efficacy of a drone and terrestrial laser scanner over a temperate beach-dune zone [J]. Geomorphology, 2019, 328: 157-172. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.12.013
- [10] 齐德利,颜明,闫丹,等. 中国丹霞地貌的面积概算——粤北坪石红层盆地的实证研究[J]. 山地学报,2016,34(2):134-141. [QI Deli, YAN Ming, YAN Dan, et al. Estimate area of Danxia landform in China—an empirical research on Pingshi red-beds basin in northern Guangdong [J]. Mountain Research, 2016, 34(2): 134-141] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000110
- [11] 查方勇,郭威,张阳,等. 陕西南宫山南坡火山岩崩塌景观地貌形成演化[J]. 山地学报,2018,36(2):305-311. [ZHA Fangyong, GUO Wei, ZHANG Yang, et al. The formation and evolution of the volcanics-collapsed landform on the south slope of Nangong mountain in Shaanxi province, China [J]. Mountain Research, 2018, 36(2): 305-311] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000326
- [12] NOVAK A, OŠTIR K. Towards better visualization of Alpine quaternary landform features on high-resolution digital elevation models [J]. Remote Sensing, 2021, 13(21): 4211. DOI: 10.3390/rs13214211
- [13] 赵振明,唐亚明,徐永,等. 山西大宁县典型滑坡体地貌特征与降雨和强震关系[J]. 地震工程学报,2020,42(6):1641-1649. [ZHAO Zhenming, TANG Yaming, XU Yong, et al. Geomorphic characteristics of typical landslides in Daning county, Shanxi province, China, and its relationship with rainfall and strong earthquakes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1641-1649] DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1641
- [14] DAOUD S, DINI B, HAEBERLI W, et al. Ice loss in the northeastern Tibetan Plateau permafrost as seen by 16 yr of ESA SAR missions [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020,

- 545: 116404. DOI: 10.1016/j.epsl.2020.116404
- [15] 刘青, 王伟, 高星, 等. 大型滑坡坝溃决对下游河谷边坡的影响分析——以白格滑坡下游 50 km 内的河谷边坡为例[J]. 山地学报, 2021, **39** (2): 226 – 237. [LIU Qing, WANG Wei, GAO Xing, et al. Analysis of the effects of dammed lake outburst floods on geomorphology of river basin: A case study of the valley slope erosion within 50 km downstream of Baige landslide, Tibet, China [J]. Mountain Research, 2021, **39** (2): 226 – 237] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000590
- [16] FERNANDEZ T, PEREZ J L, CARDENAL J, et al. Analysis of landslide evolution affecting olive groves using UAV and photogrammetric techniques [J]. Remote Sensing, 2016, **8** (10): 837. DOI: 10.3390/rs8100837
- [17] 连会青, 孟璐, 韩瑞刚, 等. 基于无人机遥感的地质信息提取——以柳江盆地为例[J]. 国土资源遥感, 2020, **32** (3): 136 – 142. [LIAN Huiqing, MENG Lu, HAN Ruigang, et al. Geological information extraction based on remote sensing of unmanned aerial vehicle: Exemplified by Liujiang basin [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, **32** (3): 136 – 142] DOI: 10.6046/gtzyyg.2020.03.18
- [18] 贾曙光, 金爱兵, 赵怡晴. 无人机摄影测量在高陡边坡地质调查中的应用[J]. 岩土力学, 2018, **39** (3): 1130 – 1136. [JIA Shuguang, JIN Aibing, ZHAO Yiqing. Application of UAV oblique photogrammetry in the field of geology survey at the high and steep slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39** (3): 1130 – 1136] DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1474
- [19] BEMIS S P, MICKLETHWAITE S, TURNER D, et al. Ground-based and UAV – Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology [J]. Journal of Structural Geology, 2014, **69**: 163 – 178. DOI: 10.1016/j.jsg.2014.10.007
- [20] 熊保颂, 李雪. 基于便携式无人机 SfM 方法的活动构造地貌位错测量——以阿尔金断裂中段为例[J]. 科学技术与工程, 2020, **20** (26): 10848 – 10855. [XIONG Baosong, LI Xue. Offset measurement along active fault based on portable unmanned aerial vehicle and structure from motion: A case study of the middle section in Altyn – Tagh fault [J]. Science Technology and Engineering, 2020, **20** (26): 10848 – 10855]
- [21] MEINEN B U, ROBINSON D T. Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization of UAV image acquisition schemes for SfM – MVS [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, **239**: 111666. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111666
- [22] 黄海峰, 林海玉, 吕奕铭, 等. 基于小型无人机遥感的单体地质灾害应急调查方法与实践[J]. 工程地质学报, 2017, **25** (2): 447 – 454. [HUANG Haifeng, LIN Haiyu, LYU Yiming, et al. Micro unmanned aerial vehicle based remote sensing method and application for emergency survey of individual geohazard [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, **25** (2): 447 – 454] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017.02.023
- [23] LIN Haiyu, HUANG Haifeng, LYU Yiming, et al. Micro – UAV based remote sensing method for monitoring landslides in three gorges reservoir, China [G]. WU Ji, Proceeding of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). New York: IEEE. 2016: 4944 – 4947. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730290
- [24] 黄海宁, 黄健, 周春宏, 等. 无人机影像在高陡边坡危岩体调查中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2019, **46** (6): 149 – 155. [HUANG Haining, HUANG Jian, ZHOU Chunhong, et al. Application of UAV images to rockfall investigation at the high and steep slope [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2019, **46** (6): 149 – 155] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000 – 3665.2019.06.20
- [25] 余加勇, 薛现凯, 陈昌富, 等. 基于无人机倾斜摄影的公路边坡三维重建与灾害识别方法[J/OL]. 中国公路学报, 2021. [2021 – 1 – 29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20210129.1136.004.html> [YU Jiayong, XUE Xiankai, CHEN Changfu, et al. Three – Dimensional reconstruction and disaster identification of highway slope using unmanned aerial vehicle-based oblique photography technique [J/OL]. China Journal of Highway and Transport, 2021. [2021 – 1 – 29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20210129.1136.004.html>]
- [26] RIQUELME A, DEL SOLDATO M, TOMAS R, et al. Digital landform reconstruction using old and recent open access digital aerial photos [J]. Geomorphology, 2019, **329**: 206 – 223. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.01.003
- [27] LI Xue, XIONG Baosong, YUAN Zhao, et al. Evaluating the potentiality of using control-free images from a mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry to measure paleoseismic offsets [J]. International Journal of Remote Sensing, 2021, **42** (7): 2417 – 2439. DOI: 10.1080/01431161.2020.1862434
- [28] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, **60** (2): 91 – 110. DOI: 10.1023/b:Visi.0000029664.99615.94
- [29] AGUERA-VEGA F, CARVAJAL-RAMIREZ F, MARTINEZ-CARRICONDO P, et al. Reconstruction of extreme topography from UAV structure from motion photogrammetry [J]. Measurement, 2018, **121**: 127 – 138. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.02.062
- [30] XIAO Xiongwu, GUO Bingxuan, LI Deren, et al. Multi-view stereo matching based on self-adaptive patch and image grouping for multiple unmanned aerial vehicle imagery [J]. Remote Sensing, 2016, **8** (2): 89. DOI: 10.3390/rs8020089

- [31] 余忠迪,李辉,巴芳,等. 基于消费者级无人机的城市三维建模[J]. 国土资源遥感,2018,**30** (2):67-72. [YU Zhongdi, LI Hui, BA Fang, et al. 3D city model construction based on a consumer-grade UAV [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, **30** (2): 67-72] DOI: 10.6046/gtzyyg.2018.02.09
- [32] 张迪,李家存,吴中海,等. 利用地面 LiDAR 精细化测量活断层微地貌形态——以毛垭坝断裂带尼处断层崖为例[J]. 地质力学学报,2021,**27** (1):63-72. [ZHANG Di, LI Jiacun, WU Zhonghai, et al. Using terrestrial LiDAR to accurately measure the micro-geomorphologic geometry of active fault: A case study of fault scarp on the Maoyaba fault zone [J]. Journal of Geomechanics, 2021, **27** (1): 63-72] DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.007
- [33] CLAESSENS L, HEUVELINK G B M, SCHOORL J M, et al. DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modelling [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2005, **30** (2): 461-477. DOI: 10.1002/esp.1155

## 3D Scene Construction of Complex Landform Based on UAV Remote Sensing

BI Rui<sup>1</sup>, GAN Shu<sup>1,2\*</sup>, YUAN Xiping<sup>2,3</sup>, GAO Sha<sup>1</sup>, HU Lin<sup>1</sup>

(1. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;  
2. Research Center of Applied Engineering of Spatial Information Surveying and Mapping Technology of Plateau Mountain in Yunnan  
province, Kunming 650093, China; 3. West Yunnan University of Applied Sciences, Dali 671000, Yunnan, China)

**Abstract:** For the landform with small topographical fluctuation and single morphological characteristics, snake-like vertical view was used or multi-shot vertical view routes were simulated in UAV remote sensing to collect images of target objects from 5 directions, and 3D scenes were constructed. Unfortunately, for mountainous environments with sharp changes in landform and spatial distribution, landform image acquisition by traditional routes is prone to problems of low work efficiency, low flight safety, low accuracy and so on. Appropriate route planning scheme is a prerequisite to ensure flight safety of UAV, improve work efficiency and obtain high-quality images.

In this paper, it took a typical pit-lip landform at the entrance of annular structure landform at the southern edge of Dinosaur Valley in Yunnan province as a case study, and planned well-shaped grid flight routes with oblique view. RTK UAV was used to obtain image of large-slope stratigraphic outcrop, and SfM and MVS algorithms were adopted to construct the 3D scene, and then visual interpretation, GIS topographic feature extraction, and analysis methods were used to achieve recognition, measurement, and analysis on topographic features with multi-angle, multi-method, and high accuracy.

The results include: (1) 3D scenes of large-slope outcrop landform with an average accuracy of 97.4% and centimeter-level accuracy was constructed. (2) The 11 outcrops obtained by visual interpretation had an average length of 92.62 m and an average dip angle of 12.40°. The outcrops were sparsely distributed in the middle and densely distributed on both sides, and the outcrops in the upper of the ridge struck from southwest to northeast, from south to north in the middle, and from southeast to northwest in the lower part. (3) The outcrops were approximately continuous step-shaped fault distribution, and most of them were distributed in the middle of the ridge with an elevation of 1695 ~ 1715 m and a slope of 40° ~ 60° and an aspect of the southwest. In the middle of the ridge, there were two obvious faults with vertical distances of 5.42 m and 16.18 m, and the slope of the

outcrop at the bottom of the ridge was the largest, and the terrain changed obviously. The results provide an effective reference method for obtaining high-quality geomorphic images and fine-grained geomorphic recognition and topographic feature analysis in the complex mountainous environment by using UAV remote sensing technology.

**Key words:** UAV; remote sensing; 3D scene construction; well-shaped grid; flight route

## 喜马拉雅山中段冰湖体积估算与规模分级标准初探

(苏鹏程 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所)

波曲河发源于喜马拉雅中部希夏邦马峰北坡聂拉木县波绒乡的冰川区,是中国与尼泊尔的界河。波曲河出中国境后,进入尼泊尔柯西河,后汇入印度恒河进入印度洋,为恒河的四级支流,其上游部分位于中国境内,中、下游沿程分布有大量的尼泊尔城镇。波曲河较大的支流主要有冲堆普、科亚普、通曲、如甲普、电厂沟、章藏布等。

中国通向南亚的交通要道——中尼公路(中尼公路中国境内段为 G318 国道,尼泊尔段称为阿尼哥公路)蜿蜒穿越喜马拉雅山,纵贯波曲河流域。西藏樟木口岸位于流域中部。

独特的地质构造背景和源源不断的印度洋暖湿气流,让处于喜马拉雅中部的波曲河流域成为高原冰湖连片发育区。波曲河流域是研究冰湖扩张过程以及冰湖体积-面积关系的典型流域。截至 2020 年 12 月,流域内发育有大小不等的冰湖 147 处,最小冰湖面积  $166 \text{ m}^2$ ,最大冰湖面积达  $5.5 \text{ km}^2$ (体积超过 4 亿方),其中  $0.1 \text{ km}^2$  以上的冰湖有 22 处。建立喜马拉雅地区冰湖体积的估算方法,对于冰湖溃决危险性分析与评价、溃决洪峰流量的估算以及洪水演进过程的模拟等方面具有重要的工程价值。

详见本期《喜马拉雅山中段冰湖体积估算与规模分级标准初探》一文。