

安志磊,王凤艳,王明常,等.基于无人机多姿态贴近摄影测量的高陡边坡快速航线规划及应用.吉林大学学报(地球科学版),2025,55(1):209-222. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240261.

An Zhilei, Wang Fengyan, Wang Mingchang, et al. Rapid Flight Path Planning and Application of High and Steep Slopes Based on UAV Multi-Pose Nap-of-the-Object Photogrammetry. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(1): 209 - 222. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240261.

基于无人机多姿态贴近摄影测量的 高陡边坡快速航线规划及应用

安志磊,王凤艳,王明常,吴翔,张成要,杜佳涛,马润泽

吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

摘要:针对复杂空间展布的高陡岩质边坡,传统测量方法在效率、精度等方面还有待提高。为了快速准确地获取岩体结构参数以评价岩质边坡稳定性,提出了无人机多姿态贴近摄影测量方法。首先通过现场关键点测量快速建立边坡概化模型,结合所建立的航线规划和姿态控制模型,快速规划航线和摄影姿态;然后采用在遥控器端安装软件的方法代替 PC 端,实现实时实地、免粗飞、快速多姿态贴近摄影测量航线规划的毫米分辨率高陡边坡高质量影像快速采集;最后通过吉林省长春市净月区某高陡边坡的多姿态贴近摄影测量实验,从模型精度、纹理清晰度、产状解译精度等方面验证该方法的可行性和可靠性。结果表明:多姿态贴近摄影测量所建模型在 x 、 y 、 z 方向上的精度分别为 0.018、0.016 和 0.033 m;模型产状解译的倾向和倾角精度分别为 3.1° 和 2.6° ;与普通贴近摄影测量结果对比,多姿态贴近摄影测量所建模型纹理细节得到了很大提升,表面拉花现象大幅减少。模型影像的感知对比度质量指数(PCQI)较大,自然图像质量评价(NIQE)值较低。PCQI 和 NIQE 两种指标结果都表明左右偏斜 45° 、上下偏斜 30° 的模型影像质量优于其他偏斜角度对照组。多姿态贴近摄影测量优于普通贴近摄影测量,能较好地减少摄影死角和减弱纹理拉花现象,模型影像质量大幅提升。

关键词:无人机;贴近摄影测量;多姿态;高陡边坡;航线规划

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240261

中图分类号:P23

文献标志码:A

Rapid Flight Path Planning and Application of High and Steep Slopes Based on UAV Multi-Pose Nap-of-the-Object Photogrammetry

An Zhilei, Wang Fengyan, Wang Mingchang, Wu Xiang, Zhang Chengyao, Du Jiatao, Ma Runze
College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: For complex spatial distributed high and steep rock slopes, traditional surveying methods

收稿日期:2024-10-12

作者简介:安志磊(2000-),男,硕士研究生,主要从事贴近摄影测量航线规划方面的研究,E-mail:842144986@qq.com

通信作者:王凤艳(1970-),女,教授,博士生导师,主要从事岩体结构参数精细解译与岩体质量评价以及相机标定方面的研究,E-mail:wangfy@jlu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42077242,42171407)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (42077242,42171407)

still face challenges in efficiency and accuracy. To obtain rock mass structural parameters quickly and accurately for evaluating the stability of rock slopes, a multi-attitude close-range photogrammetry method using unmanned aerial vehicles (UAVs) is proposed. Firstly, the conceptual slope model was established rapidly by measuring key points on site, and the flight route planning and attitude control model were combined to quickly plan the flight routes and camera orientations. Then, by implementing software on the remote controller instead of a PC, the method achieves real-time, on-site, coarse-flight-free, rapid multi-attitude close-range photogrammetry with high-quality image acquisition of high and steep slopes at millimeter resolution. Finally, the method is validated through a multi-attitude close-range photogrammetry experiment on a high and steep slope in Jingyue district, Changchun City, Jilin Province. The feasibility and reliability of the method are assessed based on model accuracy, texture clarity, and orientation interpretation accuracy. The results show that the accuracy of the model in x , y and z directions is 0.018, 0.016, and 0.033 m, respectively. The accuracy of dip direction and dip angle interpretation is 3.1° and 2.6° , respectively. Compared with conventional close-range photogrammetry, the multi-attitude close-range photogrammetry significantly enhances texture details and greatly reduces surface distortion effects. The Chinese PCQI (perceived clarity quality index) values are higher, while the NIQE (natural image quality evaluator) values are lower, indicating better image quality. The result of PCQI and NIQE metrics both showed that the image captured with 45° lateral tilt and 30° vertical tilt provide higher quality than those from other tilt angles. Multi-attitude close-range photogrammetry outperforms conventional close-range photogrammetry, effectively reducing dead angles and mitigating texture distortion, thereby substantially improving model image quality. The model was verified to be reliable by point accuracy, distance, and orientation interpretation accuracy assessments. The rock mass structural parameters, such as trace lines, orientations, dominant joint sets, and RQD (rock quality designation), interpreted by this method provide reliable foundational data for slope stability evaluation.

Key words: drone; nap-of-the-object photogrammetry; multi-pose; steep slope; flight path planning

0 引言

快速、准确地获取岩体结构参数,对于岩质边坡稳定性评价及其灾害防治具有重要意义^[1]。最初的岩体结构测量多为人工测量的方法^[2],如扫描线法^[3-4]和窗口采样法^[5-6]。这些方法受限于地形地貌等客观条件限制,效率低,工作强度高,风险大,难以满足高陡边坡岩体结构快速勘查需求,为此,非接触测量技术(激光扫描、摄影测量)在工程地质领域的应用备受关注。学者们利用 3D 激光扫描^[7]和近景摄影测量技术^[8-10]进行了相关研究,这两种方法依靠免接触和可视化优势在岩质边坡和隧洞等场景的勘测中取得了相应进展,在此基础上的结构面自动识别和参数解译算法已经较为成熟^[11-12]。然而,对于大面积复杂岩体出露的高陡边坡场景,激光扫描和近景摄影测量技术也存在实施困难的情况。

无人机技术因其免接触、信息获取便捷等优势,

近年来逐步应用于岩体结构勘查。无人机摄影测量的发展经历了传统的竖直摄影测量^[13]和搭载五镜头的倾斜摄影测量,到目前的贴近摄影测量。由于岩体结构面发育的随机性和空间展布的复杂性,前两种方法在针对高陡边坡的应用中存在一定的弊端:传统无人机竖直摄影测量技术存在局部信息采集不全及信息投影压缩等问题;五镜头的倾斜摄影测量虽有效地克服了单镜头垂直摄影获取地表信息的不足^[14-15],但存在大量的数据冗余。针对高陡边坡的贴近摄影测量^[16-17]由张祖勋院士团队于 2019 年提出,其在一定程度上抑制了信息的投影压缩和数据冗余问题,随着对高陡边坡三维重建精细化程度要求的提高^[18],以及旋翼无人机搭载能力的提高和云台技术的飞速发展^[19],贴近摄影测量得到了很大的发展。但是该方法在应用时也存在以下问题:一是单一摄影光轴垂向坡面摄影,无法解决高陡边坡岩体复杂展布导致的摄影死角和纹理拉花现

象^[18];二是航线规划依赖于边坡粗模^[20],获取边坡粗模的过程耗时费力^[21]。综上,针对复杂展布高陡边坡的高质量影像采集和岩体结构关键参数的精细解译仍然存在重大挑战^[22]。为此,亟需研究一种针对高陡边坡的高质量多角度影像快速采集方法^[23],进而建立边坡三维模型解译岩体结构参数,供岩体稳定性分析评价^[24]。

本研究以吉林省长春市净月区某复杂高陡边坡为研究对象,提出了基于无人机多姿态贴近摄影测量的高陡边坡快速航线规划方法,旨在为快速高效获取复杂地形条件下高陡岩质边坡模型及岩体结构参数提供关键的技术支持。

1 研究区概况

研究区位于吉林省长春市净月区某高陡边坡(图 1),边坡高约 40 m,由两个坡面组成,两个坡面呈约 70°的锐角连接,坡长分别约为 60 和 90 m,倾角约 60°。边坡节理、裂隙发育,出露的岩体大小不一,完整性较差,存在崩塌、滑坡等风险隐患^[25],危及周边道路及行人安全,亟需进行岩体结构勘查,评

判灾变风险,以进行科学防治。

2 多姿态贴近摄影测量快速航线规划方法

单镜头多姿态贴近摄影测量快速航线规划方法(图 2)通过编程将目标坡面影像采集与多姿态航线规划全部集成于遥控器内,以快速实现无人机多姿态贴近摄影测量。首先通过现场关键点测量结合建立的边坡概化模型进行边坡概化;然后根据不同边坡条件进行航线与姿态控制设计并进行遥控器端的多角度影像采集;最后通过与现场人工测量结果对比,验证方法的可靠性。

本方法主要分为以下四步:1)边坡概化;2)航线规划设计;3)姿态控制设计;4)航线文件生成与航飞实施。具体步骤见图 3。

2.1 边坡概化

本文方法是通过无人机在拍摄现场直接获取对象的关键点坐标以及概略形状、高程、倾角等信息,获取边坡概化空间模型,并在其上规划多姿态贴近摄影航线。

边坡概化是航线规划与姿态控制设计的基础。

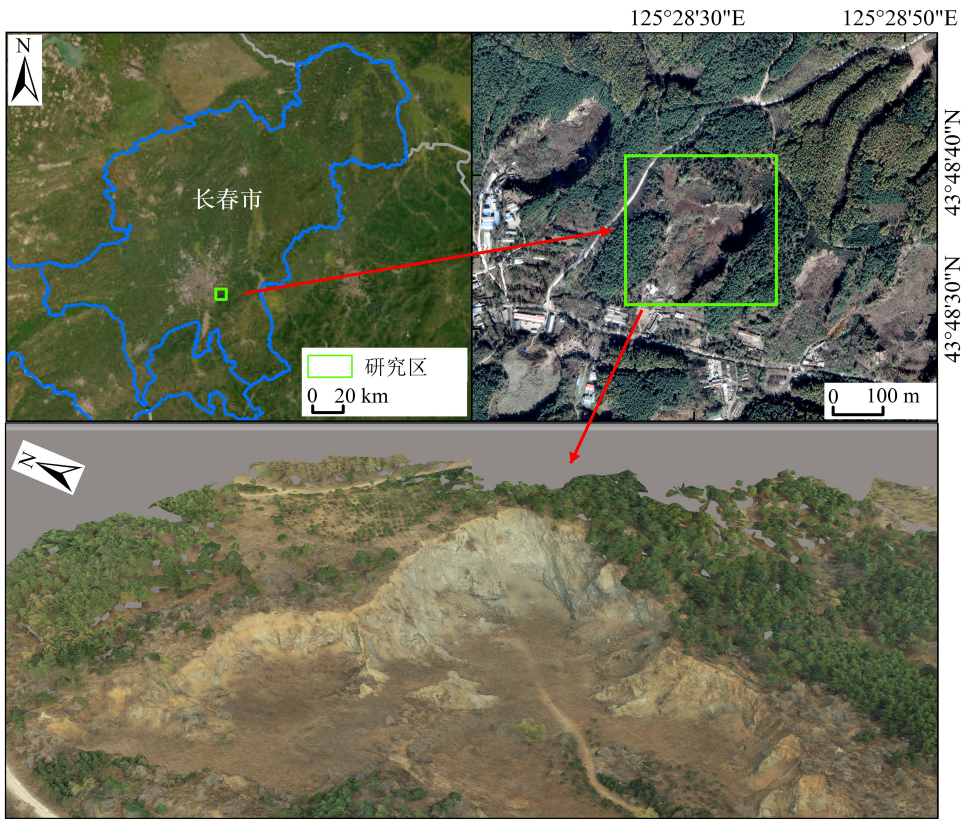


图 1 研究区概况
Fig.1 Overview map of the study area

边坡概化方法分为两种:1)直接获取边坡的三个关键点坐标,以此来计算坡面的长度、高度、走向等数据;2)仅获取坡面的两个底角点坐标及坡面的高度、倾角信息,再计算长度、走向等信息。方法 1 适用于目标坡面人工难以到达的地点,采用无人机快速获取三个关键点坐标进行边坡概化,速度快,效率高,需要的数据较少,但精度略低;方法 2 适用于可以人工到达测量的地方,对高度、倾角单独进行测量,速度稍慢但精度较高。本文主要介绍方法 1。

采用方法 1 进行边坡概化时,首先在现场目视确定高陡边坡的坡面数量;然后对目标坡面对象的位置与形态进行概化,获取坡面目标关键点,即图 4 中坡面两个底角点 A、B 及坡面的一个顶点 C。具

体为先获取坡面起始点 A、B、C 的位置,再确定边坡的长度 s 、高度 h 、走向 θ 、倾角 α 。

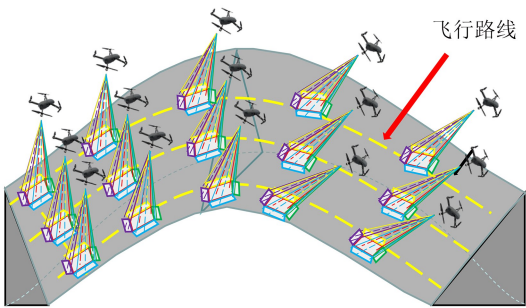


图 2 摄影方式展示

Fig.2 Comparison of photography methods

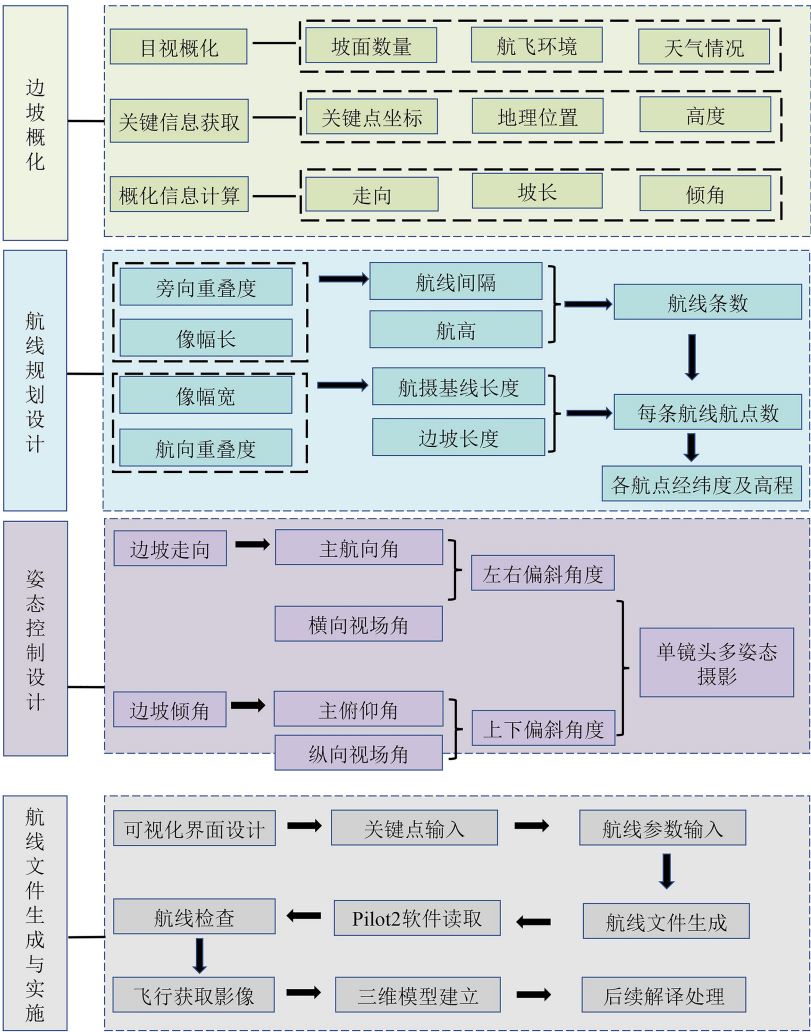


图 3 贴近摄影测量快速航线规划方法流程

Fig.3 Process flow of rapid flight path planning for nap-of-the-object photogrammetry

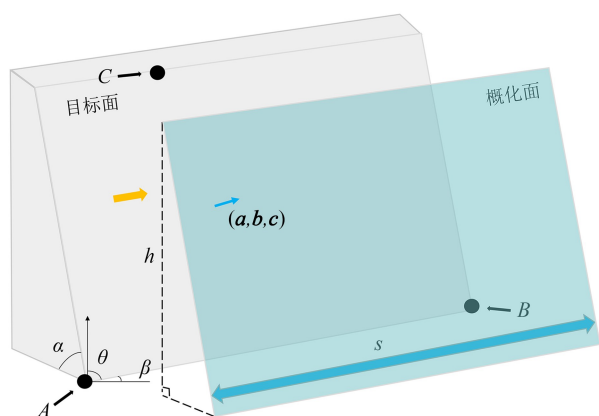


图 4 坡面对象示意图

Fig.4 Schematic diagram of surface objects

通过无人机获取关键点的经纬度(l, v)及高度 h 数据,依据经纬度(l, v)采用高斯坐标正算公式获取高斯投影坐标(x, y),计算两个底角点坐标差 Δx_{AB} 、 Δy_{AB} ,及高度差 h_{AB} ,依据三个关键点坐标获取坡面的 x 、 y 、 z 轴的法向量(a, b, c),进一步计算 s 、 θ 、 α :

$$s = \sqrt{x_{AB}^2 + y_{AB}^2 + h_{AB}^2}; \quad (1)$$

$$\theta = \arctan(\Delta y_{AB} / \Delta x_{AB}); \quad (2)$$

$$\alpha = \left| \arctan \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{c} \right|. \quad (3)$$

对于多坡面高陡边坡,针对坡面连接处摄影重叠度低导致后续建模难以拼接问题,增加了连接处的航线设计(图 5),有助于坡面拐角处三维重建。

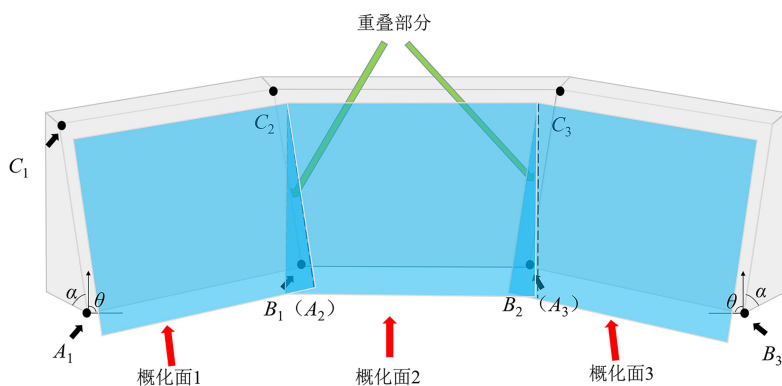


图 5 多坡面概化

Fig.5 Conceptual diagram of multi-slope surfaces

2.2 航线规划设计

在高陡边坡位置与形态概化的基础上进行航线规划设计。要求其不仅需符合无人机飞行控制的路径规划,还需要进行多姿态贴近摄影设计,以满足高陡边坡精细三维建模需求。

根据高陡边坡位置与形态概化数据及影像地面的分辨率要求,确定航高和重叠度,进行航线规划设计。航线规划设计包括以下步骤:

1) 计算航线条数及每条航线的航点数

根据无人机相机焦距和影像地面分辨率要求,确定无人机航高 H (无人机与坡面的垂直距离)。设相机焦距为 f ,地面分辨率为 d ,影像的像元尺寸为 a ,则 d 与 H 的关系式为

$$\frac{f}{H} = \frac{a}{d}. \quad (4)$$

依据边坡的位置及形态概化数据,结合摄影的重叠度进行航线规划设计,设像幅长和宽的像素分别为 u 和 w ,航向重叠度和旁向重叠度分别为 p 和 q ,摄影比例尺为 $1:M$,计算航线条数 m 和每条航线的航点数 n 。

像幅长 v_x 和宽 v_y 计算式为:

$$\begin{cases} v_y = a w; \\ v_x = a u. \end{cases} \quad (5)$$

航摄基线长度 o 与航线间隔 k 计算式为:

$$\begin{cases} o = v_x (1 - p) M; \\ k = v_y (1 - q) M. \end{cases} \quad (6)$$

航线条数 m 与航点数 n 计算式为:

$$\begin{cases} m=(h/\sin \alpha+k)/k; \\ n=(s+2o)/o. \end{cases} \quad (7)$$

2) 计算飞行斜面上任一航点的高斯坐标 (x, y, H) 和经纬度坐标 (L, V, H)

航点高斯坐标计算式为:

$$\begin{aligned} x_{i,j} &= x_A + o(j-1)\cos \beta \cos \theta + \\ &\quad k(i-1)\cos \alpha \sin \theta - h \sin \alpha \sin \theta; \\ y_{i,j} &= y_A + o(j-1)\cos \beta \sin \theta - \\ &\quad k(i-1)\cos \alpha \cos \theta - h \sin \alpha \cos \theta; \\ H_{i,j} &= h_A + o(j-1)\sin \beta + \\ &\quad k(i-1)\sin \alpha + h \cos \alpha. \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $x_{i,j}, y_{i,j}, H_{i,j}$ 分别为第*i*条航线上第*j*个航点的经、纬度和高程坐标; x_A, y_A, h_A 为关键点*A*的坐标。

依高斯反算公式,换算各航点 (x, y) 为经纬度坐标 $(L, V), L$ 为经度, V 为纬度,获取航点坐标 (L, V, H) 。

2.3 姿态控制设计

无人机摄影姿态主要受航向角 φ 和俯仰角 ω 控制。结合目前多旋翼无人机航向角和相机俯仰角的值域范围,通过建立航向角与边坡走向、俯仰角、倾角之间的关系模型,在单一航点一共拍摄五张照片:先确定主航摄方向为正对坡面,拍摄主相片;再根据相机镜头的视场角与实地情况,确定其余四张

相片的上下、左右偏斜角度,以实现高陡边坡单镜头多姿态贴近摄影测量的姿态控制设计。方法如下:

1) 航点单一姿态贴近摄影的姿态控制模型

根据边坡走向(图 6a)及无人机航向角(图 6b)的定义及值域范围,建立边坡走向 θ 与主航向角 φ_0 之间关系:

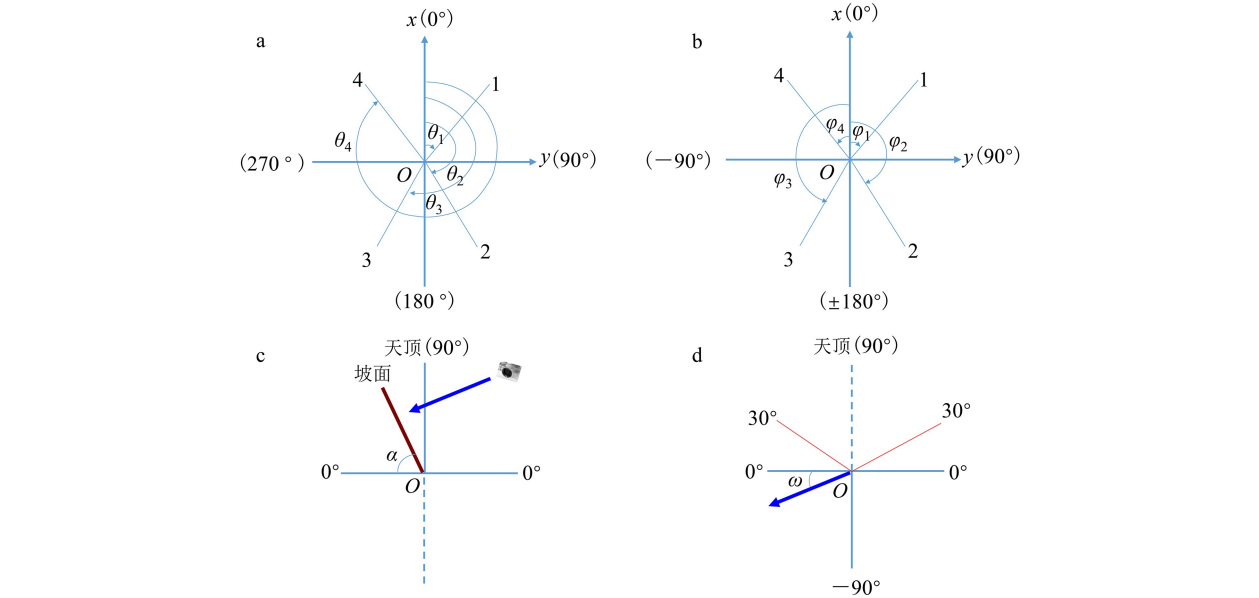
$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \\ &\begin{cases} \theta - 90^\circ \quad (90^\circ \leq \theta < 270^\circ); \\ \theta - 360^\circ \quad (270^\circ \leq \theta < 360^\circ \cup 0^\circ \leq \theta < 90^\circ). \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

根据边坡倾角 α (图 6c)及相机主俯仰角 ω_0 的定义及值域范围(图 6d),建立 α 与 ω_0 之间关系:

$$\omega_0 = \alpha - 90^\circ. \quad (10)$$

2) 航点多姿态贴近摄影的姿态控制模型

在垂向坡面的单一姿态贴近摄影基础上,增加上、下、左、右四个偏斜姿态,摄取边坡多角度影像,以消除或减弱因边坡形态及露头空间展布复杂性产生的摄影盲区,提高摄影重叠度。主要通过设计航向角 φ 和俯仰角 ω ,控制相机在垂直坡面及上、下、左、右偏斜共五个姿态摄取高陡边坡多角度影像(图 7),并给出偏斜角度(设左右和上下偏斜角度分别为*e*和*g*)与主姿态的关系式(式(11))。研究中,根据相机视场角,设置多个不同偏斜角度($\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_5, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_5$)的对照实验组,寻求最优偏斜角度,作为最终的多姿态贴近摄影角度。



a. 边坡走向 θ 的定义及范围;b. 航向角 φ 的定义及范围;c. 边坡倾角 α 定义及范围;d. 相机俯仰角 ω 定义及范围。1、2、3、4代表四个象限。

图 6 边坡产状及无人机镜头姿态范围

Fig.6 Schematic diagram of slope orientation and drone camera pose ran

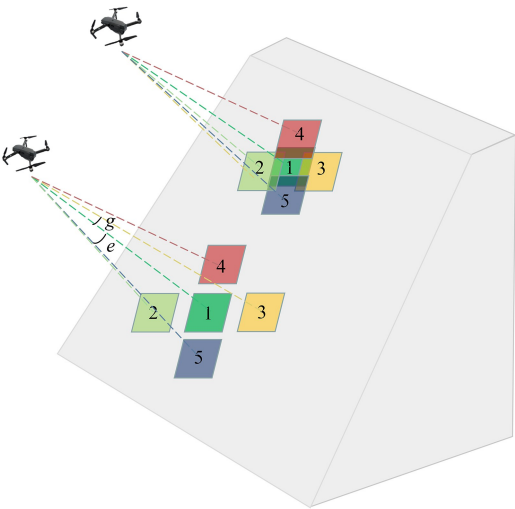


图 7 单一航点设置不同偏斜角度对比

Fig.7 Comparison diagram of different inclination angles for a single waypoint setup

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_0, \omega_1 = \omega_0; \\ \varphi_2 = \varphi_0, \omega_2 = \omega_0 + g; \\ \varphi_3 = \varphi_0 - e, \omega_3 = \omega_0; \\ \varphi_4 = \varphi_0, \omega_4 = \omega_0 - g; \\ \varphi_5 = \varphi_0 + e, \omega_5 = \omega_0. \end{cases} \quad (11)$$

2.4 航线文件生成与实施

传统无人机航线文件生成一般依赖于无人机遥控器,遥控器规划航线可直接生成航线文件,但规划航线较为简单,只能规划一些正射影像的航线^[26];而贴近摄影测量一般采用专门研发的软件进行航线规划,并在电脑端生成航线文件,再传输到遥控器上实施,操作复杂、耗时较长。

多姿态贴近摄影航线规划时,主要利用 python 可视化界面函数 tkinter 设计的界面(图 8),输入相关参数,包括目标面关键点经纬度、镜头姿态控制设计(镜头上下及左右偏斜角度)、航线参数设置(重叠度、地面分辨率等)。

通过界面输入参数并运行程序,生成 KMZ (keyhole markup language zipped) 格式的航线文件。本文所采用的航线规划及生成方法全部集成于遥控器内,通过遥控器内安装的 pydroid3 软件读取 python 文件,将电脑端航线规划及生成文件代码移植到该软件上,即可完成遥控器端航线规划文件生成,极大地简化了操作,节约了时间。

航飞实施是读取航线文件并指挥无人机飞行实施获取影像的过程。航线文件生成在遥控器的内部存储空间中,先打开遥控器的航飞软件pilot2,读取

关键点经纬度

点1经度(°):

125.300263812

点1纬度(°):

43.880345527

点2经度(°):

125.302268646

点2纬度(°):

43.880364303

点3经度(°):

125.302327655

点3纬度(°):

43.879970018

姿态控制设计

镜头上下偏移角度(°):

30

镜头左右偏移角度(°):

45

航线规划参数

分辨率(m):

0.01

航向重叠度(%):

70

旁向重叠度(%):

80

OK

Cancel

图 8 软件设计界面

Fig.8 Design interface diagram

已生成的航线文件,连接无人机并进行检查,之后起飞获取目标影像,供后续建模使用。

3 研究区工程应用

3.1 无人机多姿态快速贴近摄影航线规划与边坡影像采集

多姿态无人机快速贴近摄影测量航线规划目标是获取高陡边坡的高分辨率多角度影像,并建立精细的三维模型供后续岩体结构解译。

本研究采用大疆 M300 无人机,其云台可以实现三个维度的调节,包括俯仰、横滚及偏航。所搭载的大疆禅思 P1 相机,可生成 4 500 万像素(8192×5460)的图像。相机的传感器尺寸为 35.9 mm×24.0 mm,像元尺寸为 4.4 μm。

研究区有 2 个坡面裸露,共需获取 5 个关键点坐标,实地概化如图 9a。

将关键点坐标输入到遥控器的设计界面后,分辨率设置为 1 cm,旁向重叠度设置为 80%,航向重叠度设置为 70%,镜头上下偏斜角度设置为 30°,镜头左右偏斜角度设置为 45°。点击运行,生成航线文件,按以上数据设计共得到了 4 条航线,坡面 1 每

条航线有 10 个航点,坡面 2 每条航线有 8 个航点;在拐角连接处每条航线增加了 3 个航点,以增加拐角处重叠度,并生成航线规划文件(图 9b)。

同时规划了左右和上下偏斜角度分别为 30°和 20°,以及 37°和 23°的两组对照实验组(图 9c),以优化多姿态偏斜角度。

3.2 模型建立与精度验证及评估

3.2.1 三维模型建立

在采用大疆无人机多姿态贴近摄影测量获取高陡边坡多角度影像后,采用建模软件 ContextCapture 对坡面进行空中三角加密,并对空三结果进行质量检查后,生成分辨率达到 5 mm 的高陡边坡精细三维模型(图 9d)。

3.2.2 模型验证精度及评估

对模型点位精度、距离解译精度、产状解译精度进行模型精度评估与验证,从模型细部纹理展示、无参考图像指标自然图像质量评价(natural image quality evaluator, NIQE)和感知对比度质量指数(patch-based contrast quality index, PCQI)等方面来分析模型纹理细节表征情况。

1)模型点位精度评估与验证

①模型点位精度

本研究在现场使用 GPS 测量了 12 个验证点,部分验证点位置如图 10a、b。

在三维模型上进行了验证点的相应位置测量(图 10c、d、e)。表 1 给出了各验证点的现场测量坐

标与模型测量坐标,统计得出坐标差的平均值 Δx 为 0.018 m、 Δy 为 0.016 m、 Δz 为 0.033 m,表明本文方法建立的三维模型点位精度较高,结果可靠。

②距离解译精度

通过摄影时现场置放的 4 个长为 50 cm 的水准尺段(图 10f)的模型解译长度,与实际长度对比,模型解译长度平均偏差为 2.6 mm。模型上距离解译精度也说明本文方法建立三维模型的可靠性。

③产状解译精度

通过对模型上 26 个结构面的产状进行解译,并与现场罗盘测量的产状对比,分析产状解译精度^[27]。

在三维模型上进行结构面特征点量测,依据基于空间坐标的产状解译模型计算结构面产状^[28]。将模型解译产状与罗盘测量产状进行对比,可得平均倾向偏差为 3.1°,平均倾角偏差为 2.6°(表 2)。

2)模型纹理细节表征评估

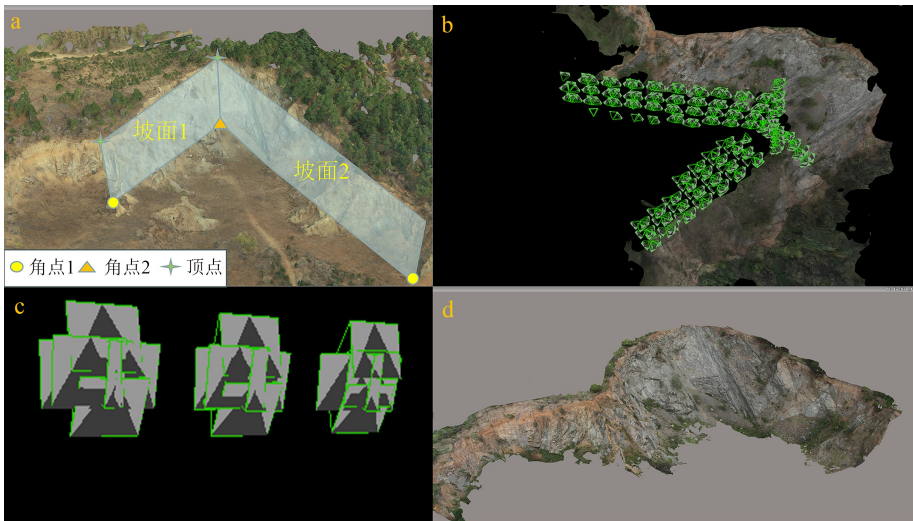
①模型细部纹理展示

选取背对拍摄面的结构面与一处存在长大裂隙处进行展示,可以看出图像中模型清晰、分辨率高,不存在纹理拉花现象(图 11)。

②模型纹理细节对比

通过不同偏斜角度的多姿态快速贴近摄影测量模型对比(图 12),从红框中的内容可以看出实验中左右偏斜 45°、上下偏斜 30°组(图 12c、f)的效果最佳,图像质量更好,拉花现象明显减少。

分别建立普通贴近摄影测量和不同偏斜角度的



a. 实地概化图; b. 航线规划图; c. 多姿态示意图; d. 三维模型图。

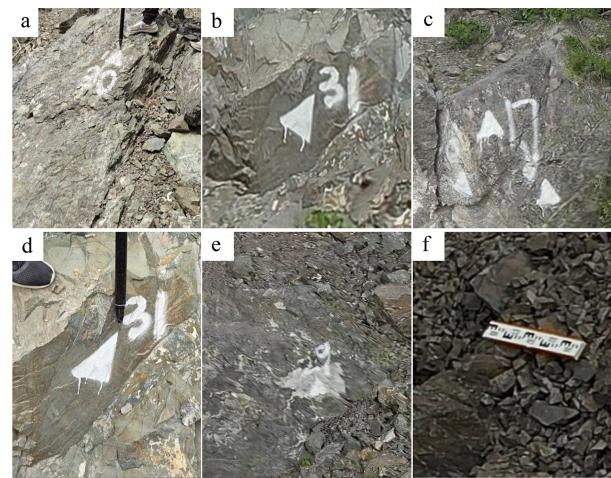
图 9 研究区规划示意图

Fig.9 Planning diagram of the study area

表 1 研究区验证点模型解译坐标与实测坐标对比表

Table 1 Validation point coordinate verification table of the study area

点号	GPS 实测坐标/m			模型解译坐标/m			偏差/m		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	Δx	Δy	Δz
Jy1	4 852 873.526	457 879.024	297.889	4 852 873.525	457 879.027	297.858	0.001	−0.003	0.031
Jy2	4 852 873.488	457 878.906	297.769	4 852 873.476	457 878.907	297.783	0.012	−0.001	−0.015
jy3	4 852 873.394	457 879.020	297.764	4 852 873.404	457 879.018	297.797	−0.010	0.002	−0.033
Jy4	4 852 867.691	457 887.439	298.317	4 852 867.733	457 887.432	298.327	−0.042	0.007	−0.010
Jy5	4 852 867.617	457 887.477	298.178	4 852 867.637	457 887.411	298.208	−0.021	0.066	−0.030
Jy6	4 852 867.618	457 887.503	298.155	4 852 867.588	457 887.529	298.140	0.029	−0.026	0.015
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Jy12	4 852 880.397	457 864.426	298.503	4 852 880.422	457 864.416	298.506	−0.025	0.009	−0.003
平均偏差							0.018	0.016	0.033



a、b、c、d、e. 验证点位置;f. 实地放置尺段位置。

图 10 研究区验证点位置

Fig.10 Validation point location of the study area

多姿态快速贴近摄影测量模型,并将二者模型进行对比,结果见图 13。从图 13 红圈内容对比可以看出,相比于普通贴近摄影测量,多姿态快速贴近摄影测量在岩体复杂出露以及普通摄影难以拍摄的位置,模型的纹理细节表现得更为细腻。

③无参考图像质量指标评价

引入评估指标 NIQE 与 PCQI 进行模型影像质量评价,影像质量越高,看起来越接近人类眼中的“高质量”图像。较低的 NIQE 值表明图像质量较高,更接近于真实场景,视觉上更自然;较大的 PCQI 说明测试图像保留了更多的原始细节、清晰度和对比度,视觉质量较好。

从不同偏斜角度的模型影像质量评估图(图 14a、b)可以看出,NIQE和PCQI两种指标都表明

表 2 研究区基于三维模型的结构面产状解译数据

Table 2 3D model features surface orientation interpretation of the study area

验证 结构面	罗 盘		模型(偏斜(45°,30°))			
	倾向/ (°)	倾角/ (°)	倾向/ (°)	倾角/ (°)	倾向偏 差/(°)	倾角偏 差/(°)
1	273	66	275	62	−2	4
2	191	41	191	40	0	1
3	161	63	159	63	2	0
4	178	78	178	70	0	8
5	228	66	220	65	8	1
6	207	57	214	57	−7	0
7	166	72	165	72	1	0
8	132	61	127	67	5	−6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27	60	51	57	49	3	2
平均偏差/(°)					3.1	2.6

左右偏斜 45°、上下偏斜 30°组的模型影像质量均优于其他两个对照组;因此,左右偏斜 45°、上下偏斜 30°组的多姿态贴近摄影测量要优于其他两个偏斜角度的多姿态贴近摄影测量。从普通与多姿态模型影像质量评估图(图 14c、d)可以看出:相较于普通贴近摄影测量,多姿态贴近摄影测量模型影像的 PCQI 较大,而 NIQE 值较低,说明多姿态贴近摄影测量效果优于普通贴近摄影测量。

3.3 结构面参数解译

本研究利用快速多姿态贴近摄影测量获取了研究区高陡边坡三维模型,并在该模型上人工量测半自动解译了 633 条结构面,给出了该边坡的结构面分组结果(表3),解译的结构面迹线端点坐标、迹长

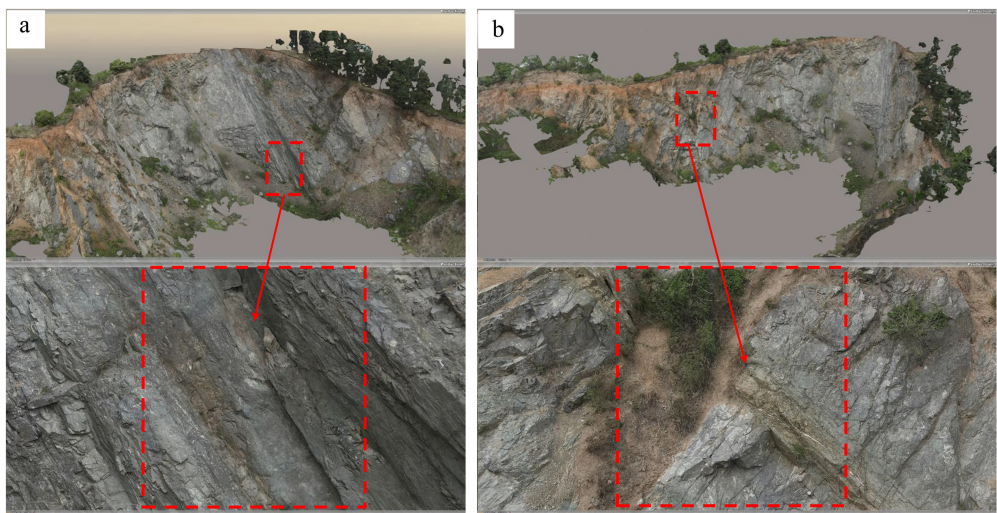
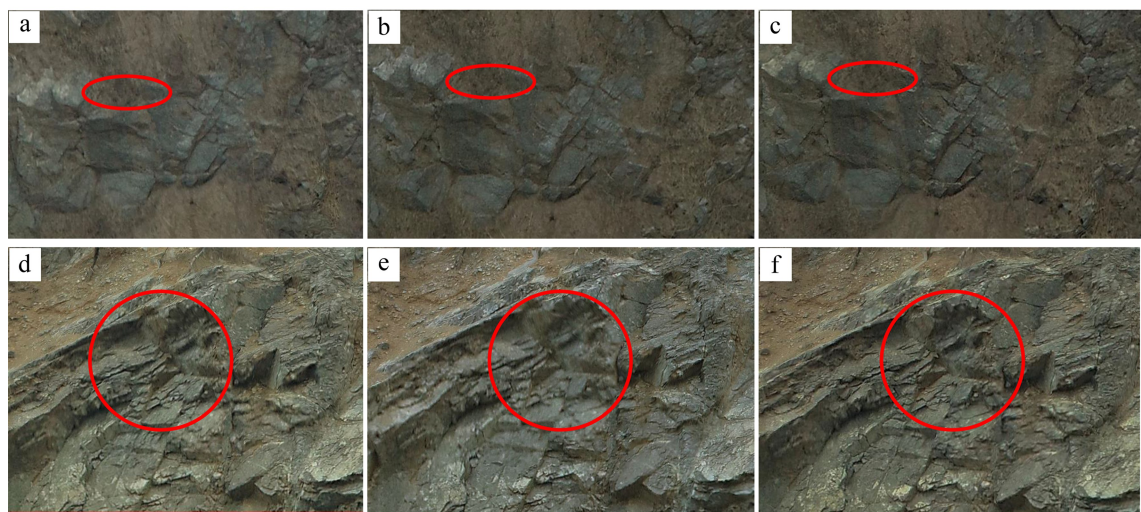


图 11 研究区不同区域三维模型纹理展示

Fig.11 3D Model texture display from different areas of the study area



a、d. 左右偏斜 30°、上下偏斜 20°组;b、e. 左右偏斜 37°、上下偏斜 23°组;c、f. 左右偏斜 45°、上下偏斜 30°组。

图 12 研究区不同偏斜角度对比

Fig.12 Comparison of different skew angles of the study area

及产状如表 4 所示。共分为 5 组,每组结构面数量分别为 35、145、140、117 和 196。解译的结构面产状极点图、三维迹线和节理走向玫瑰图如图 15 所示。从图 15 可以看出,该边坡的主节理组方向明显,部分结构面可能延展贯通。此外,基于解译的三维迹线,本研究利用三视投影法,将迹线分别投影至 xy 、 xz 和 yz 三个面,获取了该边坡岩石质量指标 (rock quality designation, RQD),最终计算得到 RQD 值为 96.5,表明该边坡岩体完整性较好。

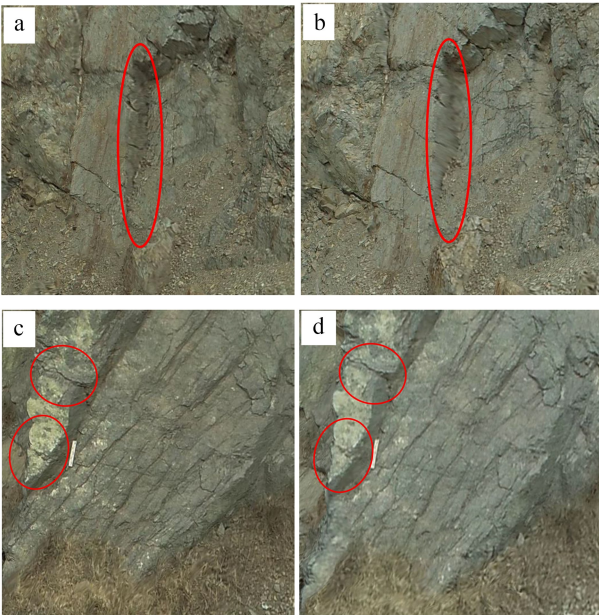
基于快速多姿态贴近摄影测量获取的高陡边坡三维模型,本研究通过人工量测解译了岩体结构面

产状、分组结果、迹线及 RQD,可为岩体质量评价以及稳定性分析提供重要数据。

4 讨论

4.1 不同摄影方法的高陡边坡三维重建效果对比

从 3.2.2 节的对比中可以看出,对于空间展布复杂、存在不规则块体出露的高陡边坡模型中较为常见的模型细部纹理拉花现象及空洞问题,多姿态快速贴近摄影测量的结果会明显优于普通贴近摄影测量。运用姿态快速贴近摄影测量,纹理拉花现象及空洞问题得到极大改善,三维模型的分辨率得到



a、c、多姿态贴近摄影测量结果;b、d、普通贴近摄影测量结果。

图 13 研究区三维模型纹理细节对比

Fig.13 Comparison of different skew angles 3D model texture detail of the study area

提高;表明多姿态快速贴近摄影测量能较好适应高陡边坡的复杂地形,从而提供高质量的高陡边坡影像和精细三维模型。

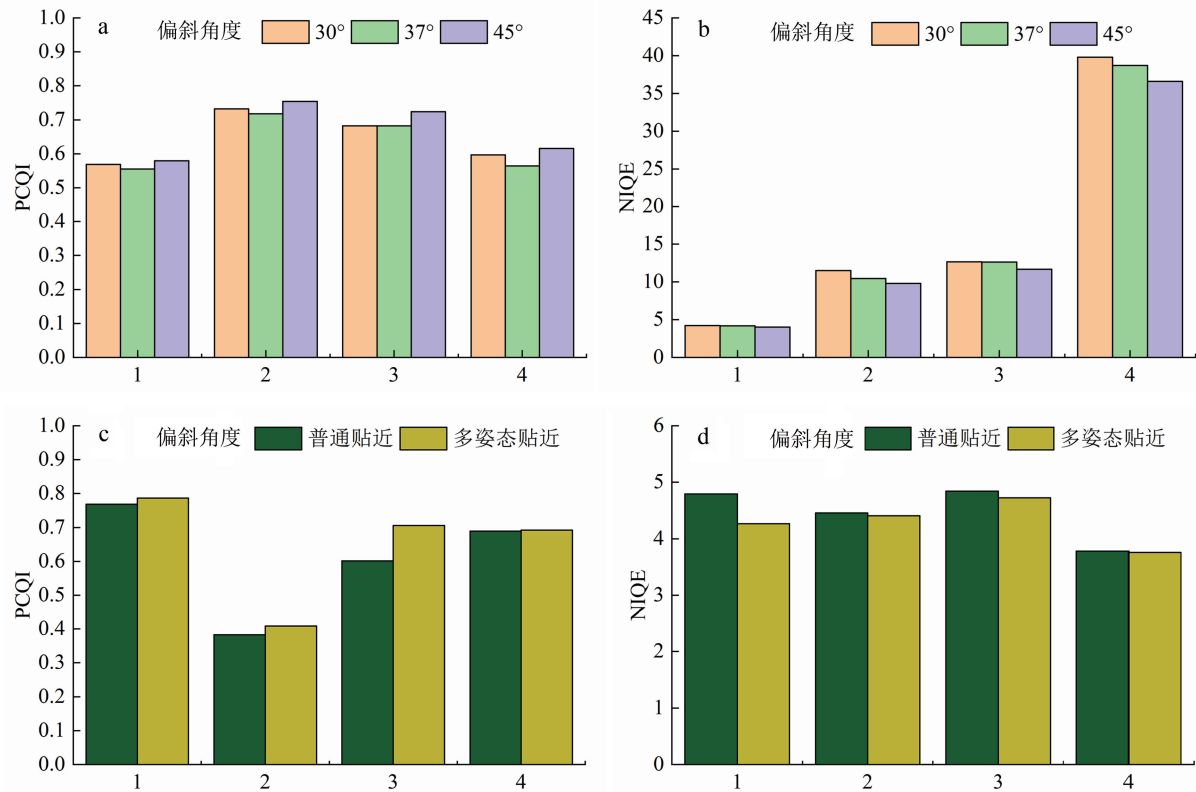
4.2 不同摄影姿态的三维重建效果对比

不同偏斜角度的多姿态设计也会影响建模质量的好坏。在本研究中,左右偏斜 45°、上下偏斜 30°的偏斜角度明显优于其他两个对照组(37°、23°组和 30°、20°组),纹理拉花现象及空洞问题得到极大改善,三维模型的纹理细节表征较好。

4.3 不同无人机及搭载不同传感器的应用区别

本方法对于不同无人机及不同配置传感器的应用区别,主要是该无人机遥控器能否支持第三方软件。若支持安装第三方软件,则可以将全部功能集成在遥控器内;若不支持,则可以通过遥控器连接电脑,同样的步骤及过程,使用大疆制图软件来实现本方法的功能。

本方法以大疆 M300 无人机搭载禅思 P1 相机作为传感器为例进行分析,不同传感器的焦距与视场角存在差异,需根据对应的传感器参数调整偏斜



a. 不同偏斜角度 PCQI 对比;b. 不同偏斜角度 NIQE 对比;c. 普通与多姿态 PCQI 对比;d. 普通与多姿态 NIQE 对比。

图 14 研究区模型质量对比

Fig.14 Model quality comparison of the study area

表 3 研究区人工量测 633 条结构面分组结果

Table 3 Grouping results of 633 structural surfaces from manual measurements of the study area

组号	倾向/(°)	倾角/(°)	结构面数
1	340	66	35
2	153	72	145
3	51	58	140
4	207	48	117
5	303	56	196
总计			633

表 4 研究区人工量测半自动解译成果表

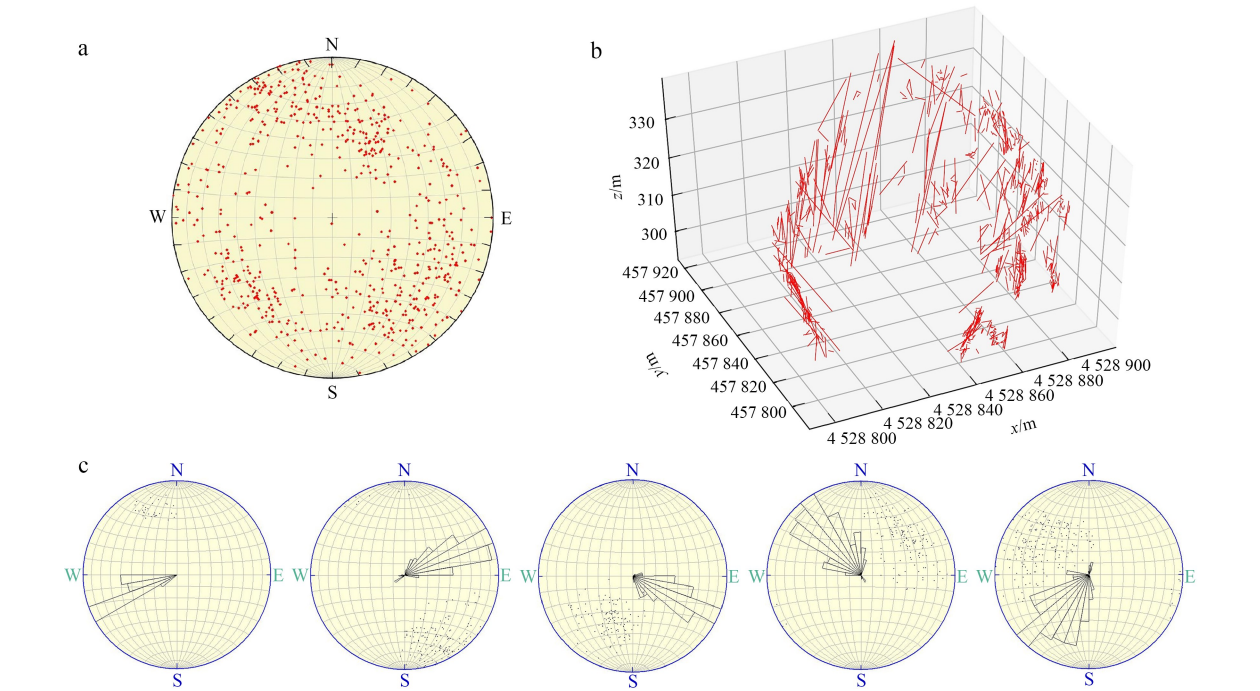
Table 4 Semi-automated interpretation results table for manual measurements of the study area

序号	x_1/m	y_1/m	z_1/m	x_2/m	y_2/m	z_2/m	迹长/m	倾向/(°)	倾角/(°)
1	4 852 812.171	457 825.456	316.16	4 852 809.769	457 823.796	318.657	3.842	331	59
2	4 852 810.297	457 823.231	315.509	4 852 811.826	457 824.765	317.328	2.828	138	84
3	4 852 813.07	457 824.567	316.427	4 852 811.405	457 823.791	317.342	2.052	331	40
4	4 852 814.151	457 825.328	314.578	4 852 812.383	457 824.934	315.154	1.901	288	76
5	4 852 812.336	457 824.908	315.23	4 852 813.442	457 824.064	313.608	2.138	347	48
6	4 852 816.385	457 823.901	311.555	4 852 813.728	457 822.402	311.016	3.098	292	51
7	4 852 815.558	457 822.574	310.314	4 852 813.592	457 822.565	309.978	1.994	92	78
8	4 852 814.128	457 823.147	313.203	4 852 813.257	457 822.079	310.858	2.72	139	87
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
633	4 852 877.196	457 791.378	316.427	4 852 872.396	457 796.806	312.389	8.296	57	62

角度设计参数。

4.4 该方法的适用性和局限性

相比普通贴近摄影测量,快速多姿态贴近摄影测量方法影像采集质量高,且具有便捷性与高时效性,能够应用于高陡边坡、古建筑物、工程项目等很多复杂场景,尤其对于一些环境条件复杂且有高分辨率要求的场景具有更好效果;但是对于一些外形过于复杂的目标物,应用快速多姿态贴近摄影测量获取高质量目标影像仍需技术突破。



a. 产状极点图;b. 三维迹线;c. 节理走向玫瑰图。

图 15 研究区产状解译图

Fig.15 Interpretation map of strata attitudes of the study area

5 结论

1)本文提出的多姿态贴近摄影测量能较好地减少摄影死角和减弱纹理拉花现象,模型经点位精度、距离和产状解译精度验证可靠。本文方法优于普通贴近摄影测量法。不同角度对照实验表明水平和垂向偏斜角度为左右偏斜 45° 、上下偏斜 30° 的多姿态贴近摄影测量最优,解译的高陡边坡岩体结构参数结果较为可靠。

2)基于所建立的航线规划和姿态控制模型,编程实现了针对多边坡多形态下的多姿态贴近摄影测量影像的高质量采集。针对高陡边坡三维模型的有效分辨率可以达到 5 mm 左右,这对获取高陡边坡结构面参数和分析岩体稳定性具有重要的工程应用价值。

3)利用安卓端 pydroid3 软件开发了一款针对于移动端的航线设计界面,软件可直接安装在遥控器上,实时实地无需 PC 端完成多姿态快速贴近摄影测量影像采集,节约了大量时间,且可应用于人员无法到达的目标物。

参考文献 (References):

- [1] 朱合华, 潘柄屹, 武威, 等. 岩体结构面信息采集及识别方法研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(6): 1339-1360.
Zhu Hehua, Pan Bingyi, Wu Wei, et al. Research Progress on the Acquisition and Identification Methods of Rock Mass Structural Surface Information [J]. Journal of Basic and Engineering Sciences, 2023, 31(6): 1339-1360.
- [2] Lyman G J. Rock Fracture Mean Trace Length Estimation and Confidence Interval Calculation Using Maximum Likelihood Methods [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(6): 825-832.
- [3] Priest S D, Hudson J A. Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(3): 183-197.
- [4] Park H J, West T R. Sampling Bias of Discontinuity Orientation Caused by Linear Sampling Technique[J]. Engineering Geology, 2002, 66(1): 99-110.
- [5] Mauldon M. Estimating Mean Fracture Trace Length and Density from Observations in Convex Windows [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1998, 31(4): 201-216.
- [6] Eccles C S, Redford R P. The Use of Dynamic (Window) Sampling in the Site Investigation of Potentially Contaminated Ground [J]. Engineering Geology, 1999, 53(2): 125-130.
- [7] 王冬明. 基于点云数据下的三维高陡岩质边坡稳定性分析研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2023.
Wang Dongming. Study on Stability Analysis of 3D High and Steep Rock Slope Based on Point Cloud Data [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2023.
- [8] Bonilla-Sierra V, Scholtès L, Donzé F V, et al. Rock Slope Stability Analysis Using Photogrammetric Data and DFN - DEM Modelling [J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(4): 497-511.
- [9] Xu W, Zhang Y, Li X, et al. Extraction and Statistics of Discontinuity Orientation and Trace Length from Typical Fractured Rock Mass: A Case Study of the Xinchang Underground Research Laboratory Site, China [J]. Engineering Geology, 2020, 269: 105553.
- [10] Song S, Zhao M, ZHU C, et al. Identification of the Potential Critical Slip Surface for Fractured Rock Slope Using the Floyd Algorithm [J/OL]. Remote Sensing. [2023-11-02]. <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/5/1284>.
- [11] Wichmann V, Strauhel T, FEY C, et al. Derivation of Space-Resolved Normal Joint Spacing and in Situ Block Size Distribution Data from Terrestrial LIDAR Point Clouds in a Rugged Alpine Relief (Kühtai, Austria) [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(6): 4465-4478.
- [12] Wang M, Zhou J, Chen J, et al. Automatic Identification of Rock Discontinuity and Stability Analysis of Tunnel Rock Blocks Using Terrestrial Laser Scanning [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(7): 1810-1825.
- [13] Riveiro B, Gonzalez-Jorge H, Varelam M, et al. Validation of Terrestrial Laser Scanning and Photogrammetry Techniques for the Measurement of Vertical Underclearance and Beam Geometry in Structural Inspection of Bridges [J]. Measurement, 2013, 46(1): 784-794.
- [14] Zhang X, Zhao P, Hu Q, et al. A UAV-Based Panoramic Oblique Photogrammetry (POP) Approach Using Spherical Projection [J]. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,

- 2020, 159: 198 - 219.
- [15] Yang B, Ali F, Yin P, et al. Approaches for Exploration of Improving Multi-Slice Mapping Via Forwarding Intersection Based on Images of UAV Oblique Photogrammetry[J]. Computers & Electrical Engineering, 2021, 92(4): 107135.
- [16] 刘欣悦. 无人机贴近摄影测量三维航线规划研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2022.
- Liu Xinyue. Research on UAV 3D Path Planning of Nap-of-the-Object Photogrammetry [D]. Wuhan: Wuhan University, 2022.
- [17] 言司. 独辟蹊径, 不断创新贴近摄影测量: 第三种摄影测量方式的诞生: 专访武汉大学遥感信息工程学院张祖勋院士[J]. 中国测绘, 2019, 28(10): 31 - 37.
- Yan Si. Pioneering and Continuous Innovation Close to Photogrammetry: The Birth of a Third Photogrammetry Method: An Exclusive Interview with Academician Zhang Zuxun of the School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University [J]. China Surveying and Mapping, 2019, 28(10): 31 - 37.
- [18] Roberts M, Dey D, Tryong A, et al. Submodular Trajectory Optimization for Aerial 3D Scanning[C]// 16th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Venice, 2017: 5334 - 5343.
- [19] Greco L, La Cascia M. 360° Tracking Using a Virtual PTZ Camera[C]// 19th International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP). Catania: [s. n.], 2017: 62 - 72.
- [20] Song S Y, Zhao M Y, Zhang W, et al. Research on Fine Collection and Interpretation Methods of Discontinuities on High-Steep Rock Slopes Based on UAV Multi-Angle Nap-of-the-Object Photogrammetry[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(4): 83 - 104.
- [21] Wang W, Zhao W, Chai B, et al. Discontinuity Interpretation and Identification of Potential Rockfalls for High-Steep Slopes Based on UAV Nap-of-the-Object Photogrammetry [J]. Computer & Geosciences, 2022, 166: 105191.
- [22] 何佳男. 贴近摄影测量及其关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- He Jianan. Research on Close-Range Photogrammetry and Its Key Technologies [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [23] 宫晓春. 贴近摄影测量与倾斜摄影测量融合方法在建筑物立面测绘中的应用[J]. 华北自然资源, 2023, 22(4): 124 - 126.
- Gong Xiaochun. Application of the Fusion Method of Close-Range Photogrammetry and Oblique Photogrammetry in Building Facade Mapping [J]. North China Natural Resources, 2023, 22(4): 124 - 126.
- [24] Yan L, Piao S, XU F. Improved High-Precision Approach Based on Deconvolution in MIMO Sonar Imagery[J]. Journal of Engineering, 2020, 2020(5): 148 - 156.
- [25] 李哲, 刘彤, 刘路路, 等. 基于证据理论的支挡型黄土高陡边坡稳定性评价[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(3): 436 - 444.
- Li Zhe, Liu Tong, Liu Lulu, et al. Stability Evaluation of Retaining-Type Loess High and Steep Slopes Based on Evidence Theory [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2023, 53(3): 436 - 444.
- [26] Hu R, Rao B S M R, Aalee-Kerahroodi M, et al. Orthorectified Polar Format Algorithm for Generalized Spotlight SAR Imaging With DEM[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(5): 3999 - 4007.
- [27] Zhao M Y, Song S Y, Wang F Y, et al. A Method to Interpret Fracture Aperture of Rock Slope Using Adaptiveshape and Unmanned Aerial Vehicle Multi-Angle Nap-of-the-Object Photogrammetry [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(3): 924 - 941.
- [28] 王凤艳, 陈剑平, 杨国东, 等. 基于数字近景摄影测量的岩体结构面几何信息解算模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(6): 1839 - 1846.
- Wang Fengyan, Chen Jianping, Yang Guodong, et al. Geometric Information Calculation Model of Rock Mass Structural Planes Based on Digital Close-Range Photogrammetry [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(6): 1839 - 1846.