



引文格式:杨硕洁,陈庭.一种基于无人机影像的高精度地表形变提取方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(9):1928-1938.DOI:10.13203/j.whugis20240420

Citation: YANG Shuojie, CHEN Ting. A High-Precision Method for Extracting Surface Deformation Using UAV Images[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(9):1928-1938. DOI:10.13203/j.whugis20240420

一种基于无人机影像的高精度地表形变提取方法

杨硕洁¹ 陈庭^{1,2}

¹ 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

² 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

摘要:地表形变监测对于深入探究地质灾害的成因机制、演化特征以及构建综合风险预警系统具有重要意义。针对传统摄影测量技术面临的人工识别地面控制点效率低下和精度不足的问题,提出一种基于无人机影像的高精度地表形变提取方法。首先根据环形编码标志点的图像特征开发了一套精密的自动识别算法,高效捕捉无人机影像中编码标志点的像平面坐标;然后利用编码标志点在形变前后两期无人机影像中的像平面坐标及地面控制点的物方空间坐标,通过地表形变提取算法快速、准确地解算出地表形变信息;最后设计了无人机航测实验,并将所得结果与全站仪监测结果进行对照分析,验证所提方法的可行性。实验结果显示,所提方法可达到亚厘米级精度,精度明显高于点云直接比对算法及多尺度模型到模型点云比对算法,能够提取准确的地表形变信息,具有较高的实用价值和良好的应用前景。

关键词:形变监测;无人机影像;摄影测量;编码标志点;图像处理

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2024-11-11

DOI:10.13203/j.whugis20240420

文章编号:1671-8860(2025)09-1928-11

A High-Precision Method for Extracting Surface Deformation Using UAV Images

YANG Shuojie¹ CHEN Ting^{1,2}

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: Surface deformation monitoring is of great significance for deeply studying disaster formation mechanisms and evolution characteristics, as well as for establishing an integrated risk-based early warning system. **Methods:** To address the issues of low efficiency and limited accuracy in manually identifying ground control points in traditional photogrammetric methods, a high-precision method for extracting surface deformation using unmanned aerial vehicle (UAV) images was proposed. First, a precise automatic identification algorithm was developed to obtain the image coordinates of coded targets within UAV images based on the characteristics of coded targets. Then, the deformation results were generated quickly and accurately by using the image coordinates of coded targets in the UAV images captured before and after deformation and the object space coordinates of the control points. Finally, total station survey data were used as reference values to compare and verify the proposed method. **Results:** The experiment results of UAV images validated that the proposed method can achieve sub-centimeter accuracy. The precision of the proposed method is significantly higher than that of both the cloud-to-cloud comparison algorithm and the multi-scale model-to-model cloud comparison algorithm. **Conclusions:** The proposed method can accurately extract surface deformation data, indicating strong practicality and significant application potential.

Key words: deformation monitoring; UAV image; photogrammetry; coded target; image processing

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1503605)。

第一作者:杨硕洁,硕士,主要从事地表形变监测研究。sj.yang@whu.edu.cn

通信作者:陈庭,博士,副教授。tchen@sgg.whu.edu.cn

随着城市化进程的加速以及山体滑坡^[1]、泥石流^[2]等自然灾害频发态势的加剧,地表形变监测的重要性日益凸显,不仅关乎城市规划和建设安全,直接影响人们的生命和财产安全,还有助于探究灾害形成机制^[3]和建立科学的灾害风险预警模型,有效预防潜在的地质灾害。

在遥感技术兴起前,地表形变监测主要依赖于单点监测方法,如全球导航卫星系统和全站仪等^[4-5],这些方法虽然能够提供高精度的相对或绝对位移数据,但高昂的成本严重限制了监测范围。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)^[6]、无人机摄影测量、高分辨率卫星遥感等技术的出现为形变监测提供了新的技术支持,这些遥感技术可以在不进行物理接触的情况下进行面域监测^[7],监测范围可覆盖难以布设传统形变监测设备的偏远山区。文献[8]基于小基线集 InSAR 研究古滑坡形变;文献[9]通过时序 InSAR 提取了甘肃省舟曲县泄流坡滑坡形变量。无人机可搭载高清相机、机载激光雷达系统等进行自主或半自主低空飞行作业:利用相机拍摄多角度高分辨率影像^[10];利用激光雷达系统进行激光扫描以获取点云数据。通过对影像或点云数据进行配准、滤波和去噪等处理生成高精度三维模型,对不同时期的模型进行对比可获取地表形变量,有效解释微地形特征。该方法不仅有效弥补了 InSAR 技术在方位向探测方面的缺陷,而且相较于传统地面摄影测量方法,无人机凭借其灵活调整位置的能力能最大程度上削弱前景物体对测量结果的干扰,从而展现出独特的研究价值和广泛的应用前景。文献[11]应用无人机摄影测量技术评估了 Potoška Planina 滑坡底部的活动情况;文献[12]利用该技术对阿娘寨滑坡形变进行了有效监测。

随着摄影测量技术和计算机视觉的飞速发展,许多用于无人机影像三维建模的摄影测量软件相继出现,运动恢复结构(structure from motion, SfM)、多目立体视觉(multiple view stereo, MVS)等技术的应用极大简化了软件生成低成本、高分辨率点云和数字高程模型(digital elevation model, DEM)的过程。通过分析点云、DEM 数据的变化可获取地表形变等关键信息,这些信息在解释区域活动构造、进行地貌研究及监测自然灾害等方面具有极高价值^[13-14]。基于 DEM 的差分比较法通过比较不同时期的 DEM 数据提供地形变化信息^[15],通常侧重于地表的高程变化监

测和大范围的形变监测。该方法对于水平方向上的位移变化相对不敏感,其精度受到 DEM 的分辨率、数据质量等因素的制约,难以适用于精度要求较高的场景。文献[16]利用无人机对龙木错断裂进行数据采集,得到的 DEM 数据在横向和纵向上的均方差约为 20 cm。从 20 世纪末到 21 世纪初,点云直接比对(cloud-to-cloud, C2C)^[17]、模型到模型比较、多尺度模型到模型点云比对(multi-scale model-to-model cloud comparison, M3C2)^[18-19]等三维点云比对算法相继出现,这些方法通过分析两个点云数据集或三维模型之间的差异获取形变信息,可用于监测微小形变与复杂地形。近年来,文献[20]利用 C2C 算法对矿区地表沉降进行了监测,文献[21]根据 M3C2 算法监测滑坡变形,可以捕捉到 1 cm 的水平垂直位移变化,文献[22]在 M3C2 算法基础上提出了鲁棒性滑坡位移估计方法,较 C2C 等传统点云算法准确度提升至少 8%。在实际应用中,基于无人机影像的地表形变监测精度能达到厘米级^[23],这一精度水平可以满足大多数监测项目的需求,但是对于有更高精度形变信息需求的项目,传统摄影测量方法精度仍有待提高。

地面控制点作为间接地理参考,为无人机影像数据的校准和验证提供了必要依据^[24],确保形变监测结果的精确性和可靠性^[25-26]。将地面控制点纳入空三解算后,航测成果精度可由亚米级提升至厘米级^[27];结合监测区域的地形,对地面控制点的部署方案进行优化,可进一步提高监测结果准确性^[28];文献[29]探讨了地面控制点数量对正射影像精度的影响;文献[30]发现将地面控制点沿研究区域的边缘分布时监测精度最高。随着摄影测量软件的不断升级与自动化,特征提取、点云重建等流程处理效率显著提高,然而当前传统的地面控制点识别工作仍高度依赖人工操作,这不仅限制了数据处理的整体效率和自动化水平的提升^[31],还可能在识别过程中产生人为的失误,对监测结果的准确性造成不利影响。

为了获取高精度地表形变信息,本文依据一种新型环形编码标志点^[32]设计并提出了一种高效且精确的地表形变提取方法。首先根据编码标志点的图像特征开发了一套精密的自动识别算法,通过算法处理形变发生前后的两期无人机影像,获取精确的像平面坐标;然后根据像方坐标及地面控制点的物方空间坐标,通过地表形变提取算法处理生成地表形变结果。

1 编码标志点的设计与识别

1.1 编码标志点设计

本文将一种可自动识别的新型环形编码标志点用于高精度地表形变提取中。编码标志点由三大核心部分组成:一个醒目的外部黑色大圆,作为整体标识的轮廓;一个带有编码条带的内圆环,用以承载特定的身份信息;一个位于中心的内部白色小圆。对于编码位数为 n 的编码标志点,其内圆环被分割为 n 个等面积的部分,每个部分为白色或黑色,其中白色段表示二进制数中的1,而黑色段表示二进制数中的0。从内圆环的不同起点顺时针旋转可以获取不同的 n 位二进制序列,将其中最小的二进制序列转换为对应的十进制数值,该值为编码标志点的解码值。图1为一个编码位数为10的编码标志点,其中 $R1\sim R5$ 表示不同部分的半径长度,半径之间的比例关系为 $R1:R2:R3:R4:R5=1:2:3:4:5$,这个比例可以根据实际应用场景的具体要求进行调整。此编码标志点的最小二进制序列0000001001对应的十进制数值为9,即可确定该编码标志点的解码值为9。

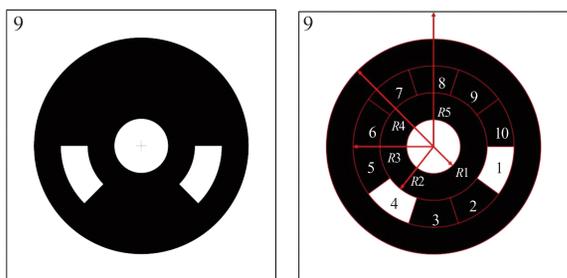


图1 编码标志点结构示意图

Fig. 1 Structural Diagram of the Coded Target

1.2 编码标志点识别

编码标志点的识别过程涉及图像预处理、轮廓筛选、灰度筛选和解码定位4个核心步骤。首先,进行图像预处理操作以优化图像质量;其次,基于周长、圆度等参数对从图像中提取的轮廓进行初步筛选;然后,依据拟合得到的椭圆中心点坐标和图像灰度值分布情况对图像进行精细筛选;最后,根据编码信息准确识别编码标志点的身份信息并提取标志点中心点的像平面坐标,为后续的地表形变提取提供关键的数据支持。

为了提高图像质量,对原始图像进行预处理是必不可少的环节。鉴于彩色图像中包含信息量庞大,首先将彩色图像转换为灰度图像以提高图像识别效率并减轻计算负载,转换后的图像如

图2(a)所示。无人机航测所获得的图像往往包含由环境因素及传感器特性引起的噪声,因此对灰度图像进行滤波和去噪十分关键。采用 3×3 的高斯核对图像进行高斯滤波,这一方法可有效平滑图像、减少高频噪声。针对在强光条件下拍摄的图像可能存在的在白色区域膨胀问题,利用侵蚀技术可有效收缩这些膨胀区域,预处理后的图像如图2(b)所示。

使用Canny边缘检测算法对图像中的轮廓进行提取,所得编码标志点轮廓如图2(c)所示。该算法可有效地识别并整合弱边缘和强边缘的位置关系,从而全面且详尽地提供整幅图像中的边缘信息。对于Canny算法处理后的图像进行初步筛选,并计算各轮廓的圆度和紧凑度,计算式为:

$$\begin{cases} r = \frac{4\pi S}{C^2} \\ c = \frac{4S}{\pi L^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, r 和 c 分别表示轮廓的圆度和紧凑度; S 和 C 分别表示轮廓的面积和周长; L 表示轮廓区域的最长轴。完美的圆轮廓的圆度和紧凑度都为1,基于这一特性,可通过设定合理的阈值将编码标志点轮廓从众多轮廓中准确地区分出来。

对这些近似椭圆的轮廓,采用最小二乘法进行椭圆拟合以优化其轮廓形态。随后对椭圆的最小外接矩形进行等比例放大,并利用透视变换将椭圆转换为标准圆,最终得到尺寸为 300×300 像素的正方形图像,如图2(d)所示。计算拟合所得标准圆的圆心与该图像中心之间的距离,滤除距离大于设定距离阈值的图像。

以拟合椭圆的中心为圆心,半径从1开始逐渐增加,依次绘制拟合圆直至触及图像边缘。沿各拟合圆的边缘进行环形采样,采样点的数量为编码位数的5倍,通过对这些采样点的灰度值进行计算获取每个半径对应的灰度平均值。灰度值是衡量图像亮度差异的重要指标,数值范围设定在 $0\sim 255$ 之间,其中255代表白色,0代表黑色。图3展示了图2中编码标志点的灰度分布情况。由编码标志点的图形特征可知:中心圆区域(I区)及最外环的外部区域(V区)的灰度平均值均应近似于255(白色);编码环带两侧的环带(II区、IV区)灰度平均值则应近似于0(黑色),而编码环(III区)的灰度平均值则应处于这两个极端值之间。根据灰度分布差异,可清晰地区分编码标志点的各个部分,剔除那些未展现出相似灰度变化的图像。

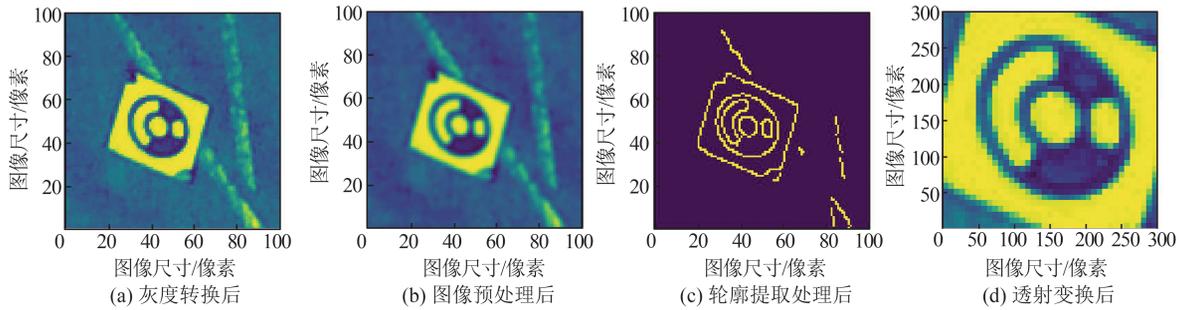


图 2 识别处理步骤后的图像

Fig. 2 Images After the Identification Processing Steps

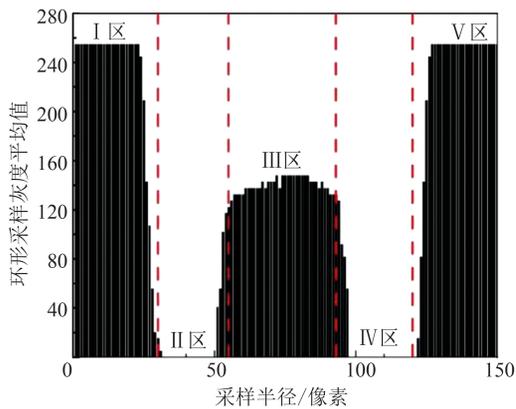


图 3 编码标志点的灰度分布图

Fig. 3 Grayscale Distribution Map of the Coded Target

通过图像的灰度平均值变化可准确获取编码环带内外边界半径,取这两个半径的平均值用作采样半径。对于 n 位编码标志点,从特定点开始以 $360^\circ/n$ 的间隔收集样本以生成 n 位二进制序列,其中白色段对应于二进制数值1,黑色段对应于二进制数值0。对序列进行 n 次循环移位,将其中最小的二进制序列转换为对应的十进制数值。上述采样与解码过程须重复 $360/n$ 次,且每次重复时起始点沿环形路径递增 1° ,总共获取 $360/n$ 个十进制数值,当其中某个值出现频率超过80%时,该值即为该编码标志点的解码值。提取编码标志点中心点的像平面坐标分为3步:首先利用Zernike矩提取椭圆轮廓的亚像素边缘;然后采用最小二乘法进行椭圆拟合,初步确定中心点的坐标;最后利用交比不变原理进行圆心偏移校正,获取准确的编码标志点中心点坐标。

2 高精度地表形变提取算法

像片外方位元素通常通过单像空间后方交会来确定,这个过程主要通过3种方法来实现:共线条件方程、角锥法和直接线性变换。本文实验采用共线条件方程求取外方位元素,利用至少3

个地面点的物方空间坐标及对应像点坐标,根据共线条件方程确定像片外方位元素。

空间前方交会利用像片已知的内外方位元素以及像片上的编码标志点的坐标来计算编码标志点的物方空间坐标。首先根据相机位置之间的欧氏距离对像片进行筛选,确保此距离不小于设置阈值。假设在 m 张图像中识别了一个编码标志点 A ,其图像坐标为 $A_i(x_i, y_i)(i=1, 2, \dots, m)$ 。每个图像对应一组旋转矩阵和平移向量, m 张图像可以列出 m 组共线方程,根据最小二乘法即可确定其物方空间坐标。

本文提出的高精度地表形变提取方法用高精度的编码标志点取代了传统的低精度特征点,根据形变前后的无人机影像与地面控制点坐标信息对编码标志点的物方空间坐标进行计算,根据两次坐标差值求取地表形变数据,整个流程实现了数据的自动化处理,极大地提高了地表形变监测的效率。基于无人机影像的高精度地表形变提取算法包括4个步骤:

1) 在相机位姿未知的影像中,筛选出含4个及以上已知坐标的编码标志点的影像,根据单像空间后方交会计算其位姿和重投影误差,舍弃所有平均重投影误差超过10个像素的解;

2) 对物方坐标未知的编码标志点进行筛选,筛选出在已知位姿的影像中出现频率不低于两次的点,利用空间前方交会求解其位置;

3) 重复执行前两步操作,直至所有满足条件的图像位姿以及编码标志点的物方空间坐标均被准确解析。为确保结果的精确度,每次迭代结束后都会进行一次光束法平差处理,以最大程度地减少误差累积;

4) 针对形变前后的两个时期所获取的无人机影像,分别执行了从步骤1)~3)的处理流程,获取了形变发生前后两期编码标志点的物方坐标或相对坐标,分别为 (x, y, z) 和 (x', y', z') ,则该

编码标志点在前后两次无人航测之间发生的形变 D 为:

$$D = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2} \quad (2)$$

3 编码标志点识别实验

3.1 环境条件

为了验证编码标志点在不同环境条件下识别

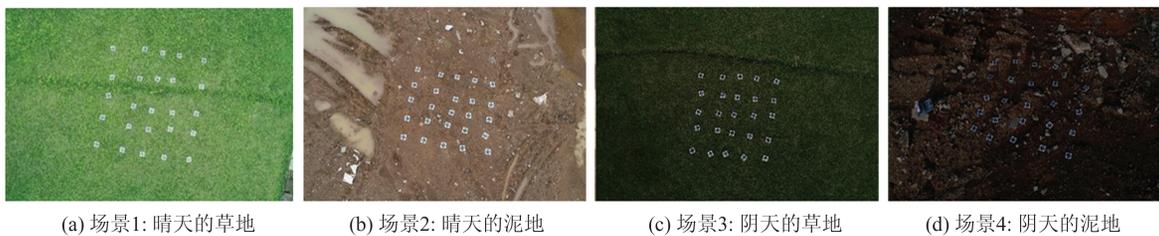


图4 4种不同场景

Fig. 4 Four Different Scenarios



图5 大疆精灵4 RTK

Fig. 5 DJI Phantom 4 RTK

解码率指被正确解码的编码标志点数量在该图像所包含的全部编码标志点数量中所占的比例,本实验利用该指标可对各组编码标志点的识别效果进行评估,解码率越高,表明在该飞行高度下编码标志点的识别效果越好。4个场景下编码标志点的解码率分别为99.2%、99.4%、98.1%、98.5%。其中,4个场景的编码标志点解码率均稳定保持在98%以上,但是场景1和场景3的编码标志点解码率分别略低于场景2和场景4,场景3和场景4的编码标志点解码率分别略低于场景1和场景2。由此可知,编码标志点在不同的光照条件和背景环境下能保持识别效果良好且稳定,这充分体现了编码标志点对不同应用场景都具有较高的适应性,在光照充足和背景为泥地的环境中其识别效果尤为出色。

3.2 成像尺寸

为确保编码标志点识别的准确性,设计本实验以检验成像尺寸对编码标志点识别情况的影响。由摄影测量原理可知,成像尺寸与无人

机的准确性,实验设置了晴天和阴天两种不同的光照场景,草地和泥地两种不同的环境场景,组合为4种不同场景,如图4所示。在这4种场景中分别布设25个尺寸为0.15 m×0.15 m的编码标志点。本实验采用大疆精灵4 RTK无人机,该无人机以便携性高、航测效率高等特性著称,在距地面13 m处从不同角度对编码标志点进行拍摄,每个场景拍摄40张高分辨率正射影像,总样本数为1 000。

机飞行高度、地面目标的大小有关,本实验通过改变无人机飞行高度与编码标志点尺寸进而改变编码标志点的成像尺寸。实验区域为武汉大学校内一处平坦且开阔的废弃操场,该环境可保障无人机飞行的顺畅无阻。实验场地面积约为15 000 m²,平均坡度为13.1°,平均海拔高度为15.59 m。

实验分为3组,每组均设置了一个由16个尺寸相同的编码标志点构成的标靶,标靶材质为哑光泡沫板,如图6(a)所示。各标靶上的标志点编码位数均为10,具有不同的尺寸规格(0.3 m×0.3 m、0.375 m×0.375 m、0.5 m×0.5 m),在实验过程中严格确保标靶的平整度和稳定性以排除外部因素对实验结果的干扰。为获取原始影像数据,无人机关闭畸变矫正功能。同时对无人机飞行路径进行科学规划,无人机从标靶中心起飞垂直上升,从距地面26 m开始每上升2 m进行一次拍摄,每个标靶重复飞行3次,样本数量共计为3 312。随后,对无人机拍摄的影像进行处理,识别结果如图6(b)所示。

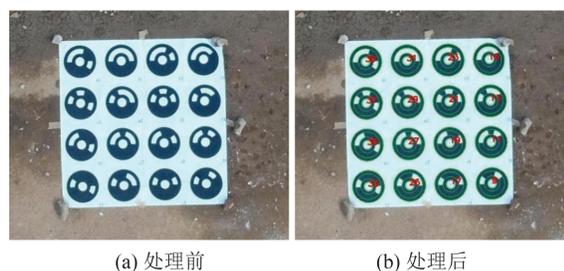


图6 编码标志点布置图

Fig. 6 Arrangement of a Group of Coded Targets

利用识别算法对无人机影像中的编码标志点进行识别,并系统统计了每张像片中编码标志点成功识别及正确解码的数目。结果显示,同一像片中编码标志点成功识别及正确解码的数目的重合率达到 96%,这一数据有力地证明了本文提出的识别算法在成功识别后具备极高的解码能力,解码错误的情况极少,从而验证了算法在编码标志点解码方面的可靠性。图 7 详细展示了 3 组编码标志点在不同飞行高度下解码率的变化。对于 3 种不同尺寸的编码标志点,在要求解码率不低于 98% 的条件下,无人机的最大飞行高度分别为 34 m、44 m 和 64 m。实验结果表明,在确保高解码率的基础上,编码标志点的尺寸越大,无人机执行拍摄任务的最大飞行高度也会相应提高。

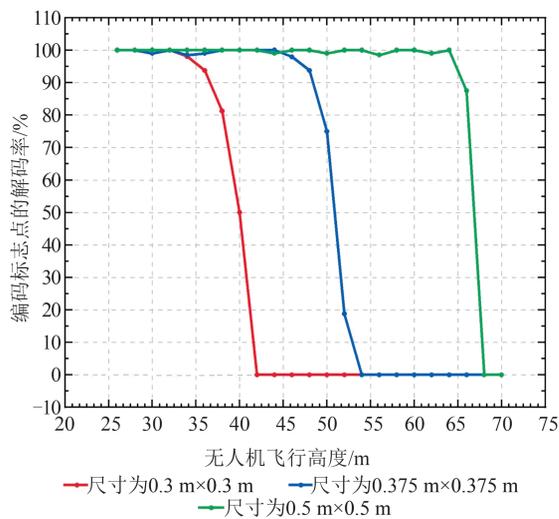


图 7 编码标志点的解码率

Fig. 7 Decoding Rates of Coded Targets

编码标志点在影像中的成像为 $k \times k$ 像素,而编码标志点实际尺寸为 $d \times d$,无人机影像的地面采样距离为 p ,相机传感器的单像元大小为 s ,光学系统焦距为 f ,无人机飞行高度为 h 。由摄影测量原理可知:

$$\begin{cases} k = \frac{d}{p} \\ \frac{p}{h} = \frac{s}{f} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,为了确保编码标志点的解码率不低于 98%,成像尺寸应不小于 29 个像素。

4 形变提取实验

4.1 实验材料与方法

为了验证本文所提高精度地表形变提取方

法的可行性,本文以全站仪测量结果为对照组进行无人机航测实验,实验场地与预实验一致,采用尺寸为 $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 的编码标志点,其编码位数为 10 位,这些标志点由哑光泡沫板制成,该材料不易变形且质量较轻,可有效保障编码标志点在实验过程中的稳定性和便携性。将其中 4 个编码标志点作为目标点分别粘贴在 4 个长方体纸箱上,纸箱尺寸为 $0.4 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 。

为了获取地面控制点的坐标并对本文方法的精度进行验证,采用徕卡 TM50 高精度测量机器人搭配徕卡 GMP101 迷你棱镜对编码标志点的位移进行测量,这种新型全站仪具有高精度、高效率的特点,如图 8 所示。利用大疆精灵 4 RTK 无人机搭配 GL300N 遥控器获取实验区域影像。



图 8 徕卡 TM50 全站仪

Fig. 8 Leica TM50 Total Station

实验分为以下 5 个步骤:

1) 将编码标志点分为 6 行均匀且牢固地固定在实验场地内,各编码标志点间保持大概 10 m 的间距,保证标志点充分展平且不受灌木遮挡。编码标志点的分布情况如图 9 所示,其中包含黄色标记的地面控制点 8 个、绿色标记的检查点 8 个以及红色标记的目标点 7 个,其他编码标志点作为连接点在形变提取过程中起到辅助作用。7 个目标点分为两组:4 个贴在纸板箱上,它们的解码值分别为 31、95、155 及 151;3 个直接固定在实验场地上,解码值依次为 45、69 和 167。两组目标点高度存在差异,用来模拟监测地表不同高度的形变情况。

2) 运用徕卡 TM50 全站仪的自动目标识别功能实现对目标点、地面控制点及检查点的相对坐标进行精确测定。

3) 设计两组航测路线,影像重叠率均设为

80%,无人机飞行高度分别为25 m和30 m,均低于编码标志点识别实验验证的最大飞行高度34 m,可保障图像中编码标志点的识别效果,依据路线规划执行无人机摄影测量任务并获取正射影像572张。

4) 通过移动目标点来模拟地表变形,并利用全站仪重新测量各目标点的相对坐标,根据两次坐标差值计算目标点位移参考值。

5) 重复执行步骤3)的无人机航测以获取模拟变形后的影像数据。

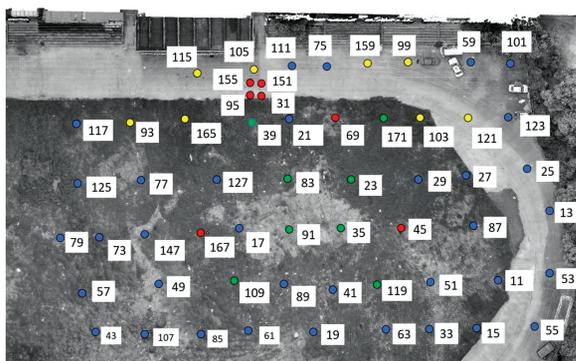


图9 编码标志点排布图

Fig. 9 Layout of the Coded Targets

4.2 实验结果

利用徕卡 TM50 全站仪对两次无人机航测期间目标点的位移进行精密监测,监测结果见表1。对模拟变形前后拍摄1 144张正射影像进行识别,成功在其中822张影像中识别出编码标志点,获取含像方坐标在内的编码标志点投影信息44 512条。经高精度地表形变提取算法处理成功获取了58个编码标志点的位移信息,计算所得目标点位移结果与全站仪监测结果间的误差以评估本文方法的准确性,如表2所示。纸箱上和地面上的目标点误差均不超过0.5 cm,这一结果充分验证了所提形变提取算法的可行性和准确性。

表1 全站仪测量的目标点位移

Table 1 Displacements of the Target Points Measured by Total Station

位置	点号	x方向 位移/cm	y方向 位移/cm	z方向 位移/cm	总位移/ cm
纸箱	31	-9.42	-10.07	0.35	13.79
	95	-0.36	-12.81	0.48	12.82
	151	-5.60	11.17	0.56	12.51
	155	1.83	-13.35	-0.11	13.49
地面	45	2.12	-3.6	0.26	4.19
	69	2.22	2.5	0.02	3.34
	167	-2.94	-1.99	-0.07	3.55

表2 本文方法计算的目标点位移的误差

Table 2 Errors of the Displacement of Target Points Calculated by the Proposed Method

位置	点号	x方向 误差/cm	y方向 误差/cm	z方向 误差/cm	总误差/ cm
纸箱	31	-0.20	0.21	0.20	0.35
	95	0.18	0.03	0.21	0.28
	151	0.11	0.21	0.25	0.34
	155	0.13	0.17	0.23	0.31
地面	45	-0.10	0.11	0.17	0.23
	69	0.16	0.15	0.18	0.28
	167	0.12	0.14	-0.22	0.29

在实验过程中,地面控制点和检查点均保持严格固定,未遭受任何人为因素的移动干扰,且全站仪监测形变均不超过0.1 cm,根据《GB 50026—2020 工程测量标准》,该形变可忽略不计。图10为本文算法计算所得地面控制点与检查点位移结果的误差情况,前8个点代表地面控制点,而后8个点则代表检查点。地面控制点的最大误差为0.3 cm,最大水平误差和最大垂直误差均为0.22 cm;检查点的最大误差为0.36 cm,水平和垂直方向上的最大误差则分别为0.2 cm和0.23 cm。地面控制点位移的均方根误差为0.27 cm,其中水平和垂直方向的均方根误差分别为0.19 cm和0.20 cm;检查点的均方根误差为0.31 cm,水平和垂直方向上的均方根误差分别为0.22 cm和0.21 cm。地面控制点在水平与垂直方向上的误差均显著小于检查点,且地面控制点和检查点的最大误差均不超过0.5 cm,这一结果有效验证了所提方法的可行性和准确性。

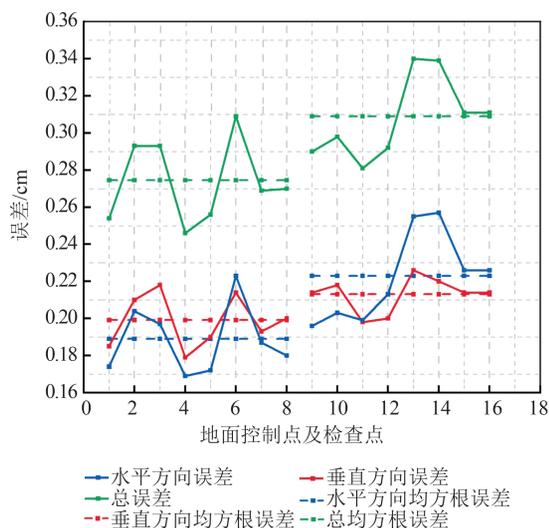


图10 地面控制点和检查点的误差

Fig. 10 Errors of Ground Control Points and Check Points

5 讨论与分析

5.1 地面控制点分布的影响

地面控制点的分布是影响无人机航测结果精度的关键因素。参考徕卡 TM50 全站仪测量的地面目标点位移结果(见表 1),共设置 8 种地面控制点分布方案以探讨地面控制点分布对该方法监测精度的影响。

8 种地面控制点分布方案如图 11 所示,其中黄色标记点为地面控制点,红色标记点为地面目标点。方案 1~方案 5 分别设置 8 个地面控制点,方案 6~方案 8 分别设置 16 个地面控制点。方案 1 和方案 2 的地面控制点为四点式分布,分别放置在实验场地的南部和北部;方案 3 的地面控制点成块分布,位于实验场地的南侧;方案 4 和方案 6 的地面控制点分布在实验场地的东西

两侧;方案 5 和方案 7 将地面控制点分别设置在实验场地的南北两侧;方案 8 的地面控制点为四点式分布,分别位于实验场地的 4 个方向。

不同地面控制点分布方案对应目标点的位移结果的均方根误差见图 12,所有方案的结果误差均在 1 cm 以内,最小不超过 3 mm。其中方案 4 和方案 6 的结果误差明显大于其他方案,这表明将地面控制点设置在编码标志点布局的长边比短边所得监测结果更准确。比较方案 6、方案 7 和方案 8 的结果可知,在控制点数目充足的前提下,将地面控制点分布于四边可进一步降低监测误差。方案 6 和方案 7 的均方根误差远远小于方案 4 和方案 5,这表明在一定程度上增加控制点数目可提高监测方法的精度。此外,比较方案 1、方案 2 和方案 3 的结果可知,地面控制点呈四点式分布比成块分布更有利于提高地面形变监测精度。

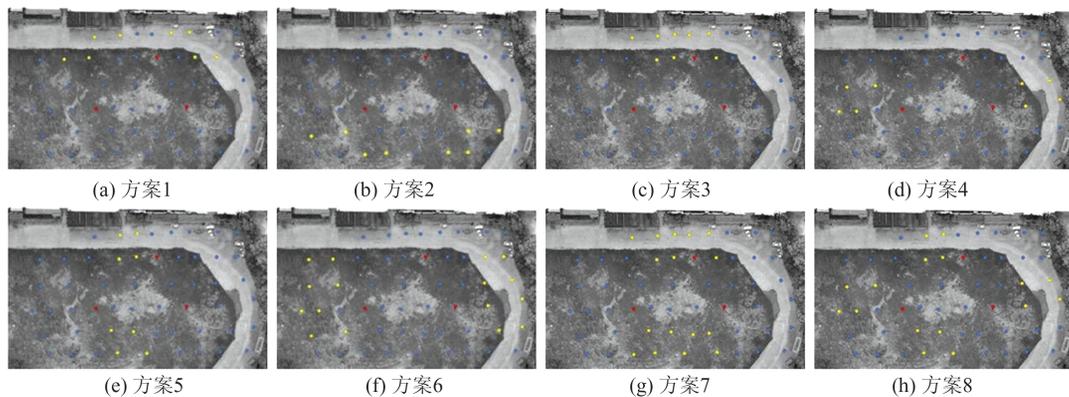


图 11 8 种地面控制点分布方案

Fig. 11 Eight Ground Control Point Distribution Schemes

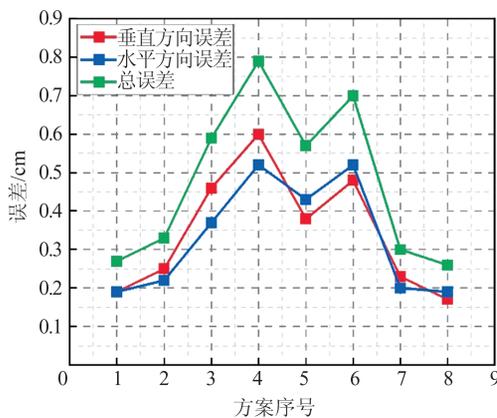


图 12 不同地面控制点分布方案的结果误差

Fig. 12 Errors in Results of Different Ground Control Points Distribution Schemes

在进行地面控制点的布设时,首先尽量选择地势较高且视野开阔的区域,避免建筑物或其他遮挡物对像片质量的影响。同时保证地面控制点

牢固可靠,在监测过程中位置不发生改变。地面控制点应在研究区域内均匀分布,最好 4 个点为一组,不宜过于集中。此外,地面控制点的数量要适中,增加地面控制点可以在一定程度上提高结果精度,但过多的地面控制点会给测绘工作带来负担。

5.2 方法对比与分析

在实验过程中对移动前后的纸箱目标点从不同角度进行拍摄。图 13 展现了 4 个纸箱的排列位置,自图像左上角起顺时针方向观察,各纸箱上编码标志点的解码值依次为 31、95、155 及 151。基于 SfM、MVS 等算法获取两期三维点云模型,对点云模型进行裁剪、对齐,保留重点区域。采用 M3C2 算法和 C2C 算法对纸箱位移前后的两期点云进行比对,获取区域位移变化。

控制位移显示范围为 11~14 cm, M3C2、C2C 算法得到的位移结果如图 14 所示。可见, C2C 算法计算出的位移分布与 M3C2 算法相比更

加离散。C2C算法结果显示区域与目标点31、95和155号重合,在目标点151号所处区域没有观察到相应位移;M3C2算法结果显示区域与4个目标点重合。与全站仪监测结果对比可知,M3C2算法准确度明显强于C2C算法。

将显示范围缩小为12~13 cm,M3C2算法的位移监测结果见图15,其中变化区域用黄色方框标注。由图15可以看出,显示区域与目标点31、95、151及155号所处范围重合,目标点31、155号观测结果与实际位移结果不相符,表明M3C2算法难以准确捕捉1 cm的位移变化。

C2C算法和M3C2算法以色值大小体现位移距离,其精度能够达到厘米级,而本文形变提取方法的精度明显高于传统算法,可以达到亚厘米

级精度。在对地面控制点的分布方案进行优化后,本文方法的误差甚至可以减少到3 mm以内。



图13 4个纸箱分布

Fig. 13 Distribution of Four Cardboard Boxes

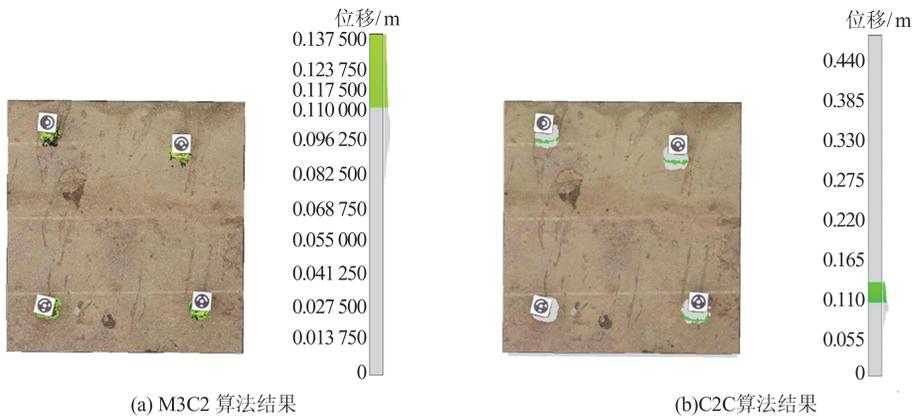


图14 M3C2与C2C算法的位移变化结果(显示范围为11~14 cm)

Fig. 14 Detected Displacement Results of M3C2 and C2C Algorithms from 11 cm to 14 cm

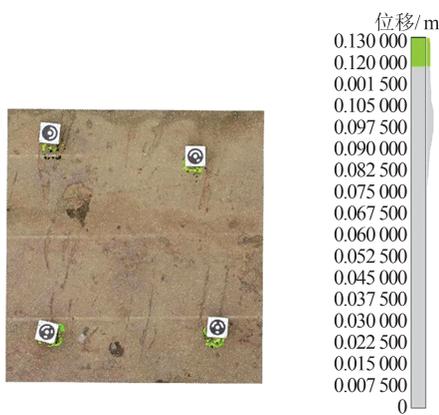


图15 M3C2算法的位移变化结果(显示范围为12~13 cm)

Fig. 15 Detected Displacement Results of M3C2 Algorithm from 12 cm to 13 cm

特征点作为连接点构建用于监测地表变形的三维点云模型。本文以可自动识别的编码标志点代替特征点,根据无人机影像提取高精度地表形变信息。首先对无人机影像中编码标志点的身份信息与中心坐标进行识别定位,然后根据编码标志点的像方坐标与地面控制点的物方空间坐标提取地表形变信息。实验结果表明,本文提出的基于无人机影像的高精度地表形变提取方法结果与全站仪监测结果差异在1 cm以内,最小不超过3 mm,相较于传统方法,本文方法在准确性上实现了显著提升。

本文仅模拟了简单的地表变形,对于复杂地质条件或实际工程中的地表形变监测效果未进行评估。未来将增加更多类型的实验场地,研究提升方法在不同场景下的适用性和准确性。

6 结 语

传统无人机摄影测量方法主要依赖低精度

参 考 文 献

[1] 范家玮, 张玉芳, 周文皎. 黄土铁路路堤滑坡破坏

- 机制与防治技术研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(4): 772-783.
- FAN Jiawei, ZHANG Yufang, ZHOU Wenjiao. Research on the Failure Mechanism and Prevention Technology of Loess Railway Embankment Landslide[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(4): 772-783.
- [2] 高路, 赵松江, 杨涛, 等. 四川龙门山强震区特大泥石流综合防控技术体系研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 13-24.
- GAO Lu, ZHAO Songjiang, YANG Tao, et al. Research on the Comprehensive Control Technology System of Large-Scale Debris Flows in the Area Affected by Strong Earthquake in Longmenshan, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(4): 13-24.
- [3] 韩军强, 黄观武, 黄观文, 等. 多种监测手段在滑坡变形中的组合应用[J]. 测绘科学, 2019, 44(11): 116-122.
- HAN Junqiang, HUANG Guanwu, HUANG Guanwen, et al. Multi-Monitoring Methods Joint Application in Landslide Deformation Monitoring[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(11): 116-122.
- [4] LI W G. Multi-GNSS Positioning for Landslide Monitoring: A Case Study at the Recica Landslide [J]. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2022, 19(3), 255-270.
- [5] CHEN Z, HUANG G W, XIE W, et al. GNSS Real-Time Warning Technology for Expansive Soil Landslide—A Case in Ningming Demonstration Area [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(11): 2772.
- [6] 许文斌, 罗兴军, 朱建军, 等. InSAR火山形变监测与参数反演研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1632-1642.
- XU Wenbin, LUO Xingjun, ZHU Jianjun, et al. Review of Volcano Deformation Monitoring and Modeling with InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1632-1642.
- [7] GUIMARÃES N, PÁDUA L, MARQUES P, et al. Forestry Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: A Review Focusing on the Data, Processing and Potentialities [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(6): 1046.
- [8] 陈宝林, 李为乐, 陆会燕, 等. 基于SBAS-InSAR的黄河干流军功古滑坡形变分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(8): 1407-1421.
- CHEN Baolin, LI Weile, LU Huiyan, et al. Deformation Analysis of Jungong Ancient Landslide Based on SBAS-InSAR Technology in the Yellow River Mainstream[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1407-1421.
- [9] 刘斌, 张丽, 葛大庆, 等. 陆地探测一号卫星滑坡大变形InSAR监测应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1753-1762.
- LIU Bin, ZHANG Li, GE Daqing, et al. Application of InSAR Monitoring Large Deformation of Landslides Using Lutan-1 Constellation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1753-1762.
- [10] MURTIYOSO A, GRUSSENMEYER P. Documentation of Heritage Buildings Using Close-Range UAV Images: Dense Matching Issues, Comparison and Case Studies [J]. *The Photogrammetric Record*, 2017, 32(159): 206-219.
- [11] PETERNEL T, KUMELJ Š, OŠTIR K, et al. Monitoring the Potoška Planina Landslide (NW Slovenia) Using UAV Photogrammetry and Tachymetric Measurements [J]. *Landslides*, 2017, 14(1): 395-406.
- [12] 陈巧, 袁飞云, 付霞, 等. 无人机摄影测量技术在阿娘寨滑坡应急调查中的应用[J]. 测绘通报, 2023(1): 77-83.
- CHEN Qiao, YUAN Feiyun, FU Xia, et al. Application of UAV Photogrammetry Technology in Emergency Investigation of Aniangzhai Landslide [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2023(1): 77-83.
- [13] JIA H, ZHU G J, GUO L N, et al. An Improved Point Clouds Model for Displacement Assessment of Slope Surface by Combining TLS and UAV Photogrammetry [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(9): 4320.
- [14] CHANG K J, TSENG C W, TSENG C M, et al. Application of Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Acquired Topography for Quantifying Typhoon-Driven Landslide Volume and Its Potential Topographic Impact on Rivers in Mountainous Catchments [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(17): 6102.
- [15] 姚顽强, 高康洲, 郑俊良, 等. 基于机载LiDAR点云C2C算法的矿山沉陷监测研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(4): 162-167.
- YAO Wanqiang, GAO Kangzhou, ZHENG Junliang, et al. C2C Algorithms Based on Airborne LiDAR Dot Clouds in the Monitoring of Mines [J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(4): 162-167.
- [16] 江晨轶, 潘家伟, 张丽军, 等. UAV SfM技术在活动构造研究中的应用: 以青藏高原西北部龙木错断裂为例[J]. 地质力学学报, 2024, 30(2): 332-347.

- JIANG Chenyi, PAN Jiawei, ZHANG Lijun, et al. Application of UAV SfM Technology in Active Tectonic Research: A Case Study of the Longmu Co Fault, Northwestern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Geomechanics*, 2024, 30(2): 332-347.
- [17] HUANG H, YE Z H, ZHANG C, et al. Adaptive Cloud-to-Cloud (AC2C) Comparison Method for Photogrammetric Point Cloud Error Estimation Considering Theoretical Error Space [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4289.
- [18] JAFARI B, KHALOO A, LATTANZI D. Deformation Tracking in 3D Point Clouds via Statistical Sampling of Direct Cloud-to-Cloud Distances [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2017, 36(4): 65.
- [19] WINIWARTER L, ANDERS K, HÖFLE B. M3C2-EP: Pushing the Limits of 3D Topographic Point Cloud Change Detection by Error Propagation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 178: 240-258.
- [20] PAL A, ROVSER J, VULIĆ M. Surface Subsidence Prognosis Above an Underground Longwall Excavation and Based on 3D Point Cloud Analysis [J]. *Minerals*, 2020, 10(1): 82.
- [21] 孟永东, 袁昌纬, 田斌, 等. 滑坡表面位移的无人机航测点云比对监测方法 [J]. *测绘通报*, 2023(5): 1-8.
- MENG Yongdong, YUAN Changwei, TIAN Bin, et al. The Method of Landslide Surface Displacement Monitoring Based on UAV Aerial Survey Point Cloud Comparison [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2023(5): 1-8.
- [22] HE H Q, MING Z Y, ZHANG J Q, et al. Robust Estimation of Landslide Displacement from Multi-temporal UAV Photogrammetry-Derived Point Clouds [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 6627-6641.
- [23] HUGENHOLTZ C, BROWN O, WALKER J, et al. Spatial Accuracy of UAV-Derived Orthoimagery and Topography: Comparing Photogrammetric Models Processed with Direct Geo-Referencing and Ground Control Points [J]. *Geomatica*, 2016, 70(1): 21-30.
- [24] 袁雨馨, 潘建平, 赵瑞淇, 等. 利用时序 InSAR 技术监测重庆市主城区地面沉降 [J]. *测绘地理信息*, 2024, 49(4): 93-98.
- YUAN Yuxin, PAN Jianping, ZHAO Ruiqi, et al. Monitoring Ground Subsidence in the Main Urban Area of Chongqing Using Time-Series InSAR Technology [J]. *Journal of Geomatics*, 2024, 49(4): 93-98.
- [25] MARTÍNEZ-CARRICONDO P, AGÜERA-VEGA F, CARVAJAL-RAMÍREZ F, et al. Assessment of UAV-Photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation of Ground Control Points [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 72: 1-10.
- [26] 王洪伟, 亢太波, 邓海涛, 等. 环形编码标志点鲁棒识别研究 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(9): 1734-1740.
- WANG Hongwei, KANG Taibo, DENG Haitao, et al. Robust Recognition of Circular Coded Markers [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(9): 1734-1740.
- [27] 惠伟. 无人机倾斜摄影云台倾角与三维模型详细度的关系探讨 [J]. *测绘地理信息*, 2020, 45(5): 162-164.
- HUI Wei. The Relationship Between the Dip Angle of the Tilting Photography of the UAV and the Detail Degree of the 3D Model [J]. *Journal of Geomatics*, 2020, 45(5): 162-164.
- [28] SANZ-ABLANEDO E, CHANDLER J H, RODRÍGUEZ-PÉREZ J R, et al. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1606.
- [29] AGÜERA-VEGA F, CARVAJAL-RAMÍREZ F, MARTÍNEZ-CARRICONDO P. Assessment of Photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation Ground Control Points Number Using Unmanned Aerial Vehicle [J]. *Measurement*, 2017, 98: 221-227.
- [30] MARTÍNEZ-CARRICONDO P, AGÜERA-VEGA F, CARVAJAL-RAMÍREZ F, et al. Assessment of UAV-Photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation of Ground Control Points [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 72: 1-10.
- [31] HUMMEL P. Remotely Sensed Ground Control Points [J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, 41, 797-802.
- [32] KONG L H, CHEN T, KANG T B, et al. An Automatic and Accurate Method for Marking Ground Control Points in Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 16: 278-290.