

小型水库大坝无人机巡检和行人定位方法

赵思曾¹, 康飞², 何丽娜^{3,4}, 李俊杰^{1,2}

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;
3. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100;
4. 地理信息工程国家重点实验室、测绘科学与地球空间信息技术自然资源部重点实验室, 北京 100036)

摘要:针对小型水库大坝缺少准确的坐标转换参数, 无人机识别的行人目标难以精确三维定位的问题, 提出无人机坐标系与坝体局部坐标系的转换方法。实际工程应用结果表明, 坐标转换后生成的点云与激光扫描点云基本一致, 对坝顶目标的非接触测量精度优于10cm。提出方法可以从任意角度和位置准确测量小目标行人在坝体结构上的位置, 为小型水库大坝无人机常规巡检和建立电子围栏等提供高效且经济的方法。

关键词:无人机; 小型水库大坝; 摄影测量; 运动恢复结构(SfM); 三维坐标转换; 小目标检测
中图分类号: [TV123] **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2024)06-0012-0007

Unmanned aerial vehicle inspection and pedestrian location method for small reservoir dams

ZHAO Sizeng¹, KANG Fei², HE Lina³, LI Junjie^{1,2}

(1. College of water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
4. State Key Laboratory of Geographic Information Engineering, Key Laboratory of Surveying and Mapping Science and Geospatial Information Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100036, China)

Abstract: In view of the lack of accurate coordinate transformation parameters for small reservoir DAMS and the difficulty of accurate three-dimensional positioning of pedestrian targets identified by UAVs, a method of transforming UAVs coordinate system to local coordinate system of dam body is proposed. Practical engineering application results demonstrate that the point cloud generated after coordinate transformation is almost identical to the laser scanning point cloud, and the non-contact measurement accuracy for dam-top targets exceeds 10cm. The proposed method can measure small pedestrian targets on the dam structure from any angle and position, providing an efficient and cost-effective approach for routine drone inspections and establishing electronic fences for small reservoir dams.

Key words: unmanned aerial vehicle; small reservoir dam; photogrammetry; structure from motion; 3D coordinate transformation; small target detection

收稿日期: 2024-03-21

基金项目: 江苏省水利科技项目(2022062); 国家重点研发计划(2022YFB4703401, 2022YFB4703404); 国家自然科学基金(51979027, 52079022); 地理信息工程国家重点实验室、测绘科学与地球空间信息技术自然资源部重点实验室联合资助基金项目(2023-01-01)

作者简介: 赵思曾(1993—), 男, 博士后, 博士, 研究方向为基于机器视觉的大坝安全监测与病害检测。E-mail: zhaosizeng@hhu.edu.cn

1 概述

我国小型水库大坝分布广泛,部分坝体安全监测设施不完善,异常信息不能及时甄别,无法及时监控库区大坝安全^[1]。随着摄影测量技术的进步和成像设备的发展,无人机在大型结构安全监测和病害检测领域得到了广泛应用,由于其灵活且低成本的优势,可以作为小型水库大坝安全管理的重要补充。

大量的小型水库大坝难以进行高效的常规巡检,原因包括:(1)无人机巡检时飞行高度较高,导致像素尺寸较小的行人等小目标难以被识别;(2)虽然无人机自身搭载了位置和姿态系统(position and orientation system, POS),但其坐标系通常为世界大地坐标系(World Geodetic System-1984 Coordinate System, WGS-84),在地面缺少足够控制点的情况下,难以实现坐标转换;(3)无人机与目标的空间关系难以确定,在单张无人机图像上识别目标后无法确定其空间位置。因此,如何高效且经济地实现无人机巡检时,对行人等小目标在坝体坐标系中的智能识别和快速定位,是建立电子围栏、完善无人机巡检系统、保障小型水库大坝安全的重要问题。

2 无人机坐标转换方法

2.1 无人机和坝体坐标系

大地坐标采用纬度 B 、经度 L 和大地高 H 来表示,是无人机系统最常用的坐标表达方式;空间直角坐标系用于描述三维地理空间数据,采用 X, Y, Z 表示三维方向上的坐标;平面直角坐标系是大地测量等工程应用中广泛采用的一种坐标表达方式,表示二维地理空间数据 (x, y) 。目前常用的坐标系转换方法如图1所示。首先将无人机WGS-84坐标 (B, L, H) 通过投影变换转换为空间直角坐标 (X, Y, Z) ,如式(1)所示^[2-3]。随后再根据局部转换模型,将无人机空间直角坐标转换为在大坝坐标系下

的平面坐标 (x, y) 和高度 h 。

$$\begin{cases} X=(N+H)\cos B\cos L \\ Y=(N+H)\cos B\sin L \\ Z=[N(1-e^2)+H]\sin B \end{cases} \quad (1)$$

式中: N 为卯酉圈的半径; e 为参考椭球的第一偏心率。

2.2 坐标转换模型

为了实现不同坐标系间的坐标转换,需要采用一些转换参数。目前,常用的坐标转换方法主要包括平面四参数转换和布尔莎模型转换方法(七参数转换)。四参数模型具有计算简单的优势,在小范围测区内可以保持较高的精度,如图2(a)所示,表达式如下:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + (1+k) \begin{bmatrix} \cos \chi & -\sin \chi \\ \sin \chi & \cos \chi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: χ 为坐标轴的旋转角度; k 为两坐标系间的尺度因子; Δx 和 Δy 分别为平移参数。此外,WGS-84坐标系与常规坝体坐标系间高程的转换关系可以表述为

$$H_{84} = H_{水准} + \zeta \quad (3)$$

式中: H_{84} 和 $H_{水准}$ 分别是WGS-84坐标系下的大地高和正常高; ζ 为两坐标系间高程异常。通过对同一控制点进行高精度水准测量,即可计算出高程异常 ζ ,进而实现不同坐标系间高程的转换。

不同地心空间直角坐标系间的转换,或是转换的范围较大时,一般采用七参数模型,如图2(b)所示,其表达式如下:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + (1+k) \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $[\Delta X, \Delta Y, \Delta Z]$ 和 k 同样为平移参数和尺度因子; $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$ 为两坐标系间的3个欧拉角旋转参数。参数的求解精度与公共点的精度密切相关,为

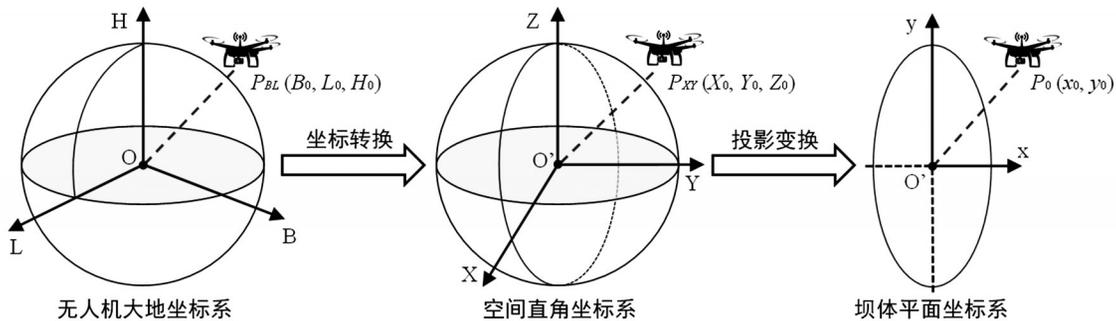


图1 常规无人机与坝体局部坐标转换过程

为了提高参数精度,通常会选择测区内分布均匀且精度较高的公共点^[4]。

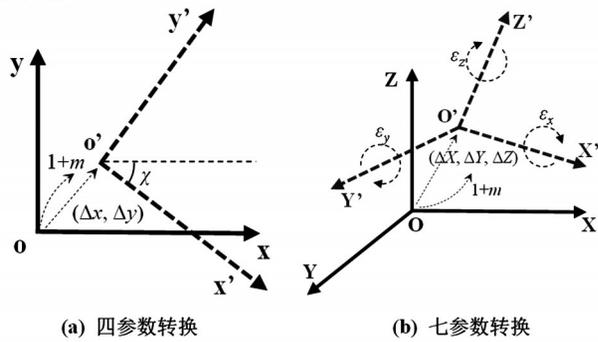


图2 两坐标系间不同转换模型

3 小型水库大坝行人识别和三维定位

3.1 基于 SfM 和地面控制点的坐标修正

无人机摄影测量是通过拍摄地面图像后,经 SfM (Structure from Motion) 等算法处理得到带有实际坐标的目标点云和模型的方法,点云的空间位置主要由共线方程计算得出^[5]。为了提高模型的精度,或者将模型转换到特定坐标系中,很多研究选择引入地面控制点^[6]。利用已知的地面控制点坐标值求解出无人机图像的外参数,并对 POS 中位置元素和地面控制点进行坐标转换,将二者统一到大坝坐标系中,建立外参数的改正模型。对于采用同一相机拍摄的 n 张图像,经过地面控制点计算出的外参数和无人机自身数据的差值如式(5)所示:

$$\begin{cases} X' = \left[\sum_{i=1}^n (X_i - X_{p_i}) \right] / n, Y' = \left[\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{p_i}) \right] / n \\ Z' = \left[\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_{p_i}) \right] / n, \varphi' = \left[\sum_{i=1}^n (\varphi_i - \varphi_{p_i}) \right] / n \\ \omega' = \left[\sum_{i=1}^n (\omega_i - \omega_{p_i}) \right] / n, \kappa' = \left[\sum_{i=1}^n (\kappa_i - \kappa_{p_i}) \right] / n \end{cases} \quad (5)$$

式中: $X', Y', Z', \varphi', \omega', \kappa'$ 为相机外参修正系数; $X_i, Y_i, Z_i, \varphi_i, \omega_i, \kappa_i$ 为计算出的第 i 张图像外参数值; $X_{p_i}, Y_{p_i}, Z_{p_i}, \varphi_{p_i}, \omega_{p_i}, \kappa_{p_i}$ 为第 i 张图像的初始外参数值,利用修正系数即可对无人机自身的 POS 数据进行修正,进而得到目标点在空间中准确的位置。

3.2 无人机与坝体坐标系转换及目标点三维测量

为了建立无人机坐标系与坝体坐标系间准确的转换关系,从而实现无人机巡检时对目标在坝体结构上的准确测量,本文提出采用四参数转换和高程修正的方式,结合 SfM 算法建立的无人机图像与控制点的空间关系,在水平和高程方向上分别进行坐标转换,转换过程如图3所示。

首先将无人机 WGS-84 坐标的纬度 B 和经度 L 投影到平面直角坐标系中,随后基于 SfM 算法,构建无人机投影平面坐标 (x_{GK}, y_{GK}) 和控制点坐标 (x_{loc}, y_{loc}) 的对应关系,并采用四参数法,建立无人机坐标系与坝体局部坐标系的转换关系,得到相关参数用于巡检时的坐标转换;而对于高度方向除了无人机采用的大地高与坝体坐标系正常高 $H_{坝}$ 间的高程异常 ζ 外,还引入了坝体局部坐标系基准面与正常高基准面间的高度差 ν ,如式(6)所示:

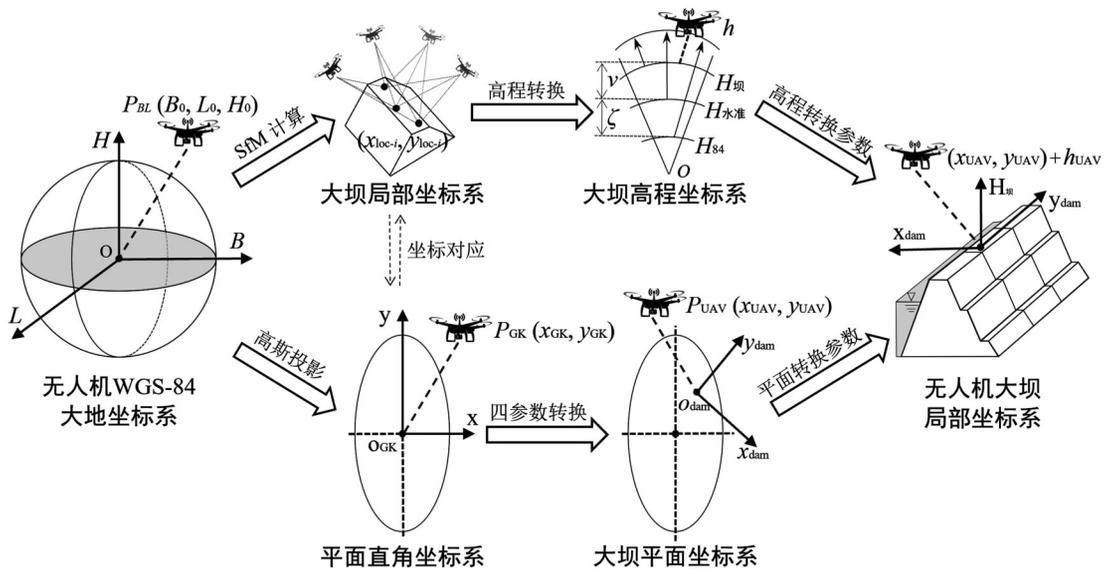


图3 无人机坐标系与坝体坐标系间的转换过程

$$H_{s4} = H_{坝} + \zeta + \nu \quad (6)$$

同时考虑参考椭球面和大地水准面间的高程异常会随着地形而改变,以及无人机自身定位误差产生的影响,因此在小范围水库大坝环境下,采用高程拟合法对高程异常 ζ 进行多项式拟合,引入修正系数($a_0 \sim a_5$),式(6)展开为^[7]

$$H_{s4} = H_{坝} + a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 + \nu \quad (7)$$

此时,可以通过四参数和高程转换参数计算出无人机在坝体局部坐标系中的平面坐标(x_{UAV}, y_{UAV})和高程 h_{UAV} , 随后即可以重新生成高精度三维模型。同时由于无人机相机可配备激光测距仪,在已知无人机相机方位角和坐标的情况下,如图4所示,采用极坐标法得到目标点三维坐标表示为:

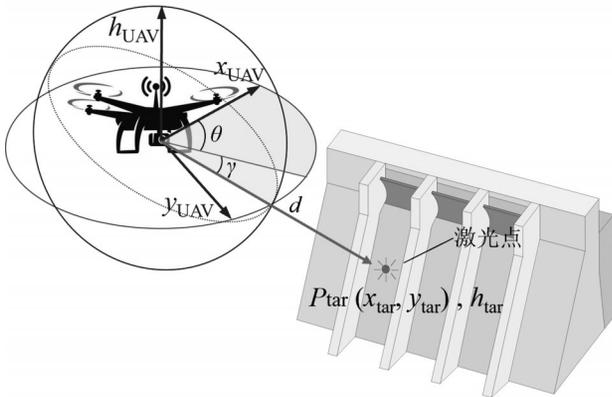


图4 无人机对坝体目标点的快速点位

$$\begin{cases} x_{tar} = x_{UAV} + d \times \cos \gamma \times \sin \theta \\ y_{tar} = y_{UAV} + d \times \cos \gamma \times \cos \theta \\ h_{tar} = h_{UAV} - d \times \sin \gamma \end{cases} \quad (8)$$

式中, d 为激光测距仪测的结果; γ 为相机与高程方向的夹角; θ 为相机与坝体坐标系中 x 向的夹角。测

量结果的均方根差 $RMSE$ 如式(9)所示:

$$\begin{cases} RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{N_{um}} \sum_{i=1}^{N_{um}} [x_m(i) - x_r(i)]^2} \\ RMSE_y = \sqrt{\frac{1}{N_{um}} \sum_{i=1}^{N_{um}} [y_m(i) - y_r(i)]^2} \\ RMSE_{xy} = \sqrt{\frac{1}{N_{um}} \sum_{i=1}^{N_{um}} [x_m(i) - x_r(i)]^2 + [y_m(i) - y_r(i)]^2} \\ RMSE_h = \sqrt{\frac{1}{N_{um}} \sum_{i=1}^{N_{um}} [h_m(i) - h_r(i)]^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中, N_{um} 为测点数量; x_m, y_m, h_m 为测量结果; x_r, y_r, h_r 为全站仪测量的实际值。

3.3 行人智能识别方法

与常规目标检测不同的是,无人机在巡检时飞行高度通常较高,以避免撞树等危险情况,这就会导致拍摄的行人目标较小,降低识别准确率。本文提出了改进的YOLOv5s网络,在主干网络以及小目标检测通道中引入轻量注意力机制 Triplet Attention (TA),其结构如图5(a)所示,在不降低检测速度的同时,提高了网络对小目标行人的敏感性。同时引入了广泛采用的swin-transformer (STR) 模块,其结构如图5(b)所示,通过抑制无用特征并增加目标区域与背景的对比度,解决行人目标像素占比较低导致漏检的问题。

4 坐标转换与目标测量方法验证

4.1 无人机非接触测量实例验证

为了分析本文提出的方法在小型水库大坝的适用性,以某小(2)型水库为研究对象,该坝为均质土石坝,如图6(a)所示。为了建立坝体局部坐标系以实现坐标转换,在坝顶布设了14个控制点,并采用全站仪进行局部坐标测量,如图6(b)所示。

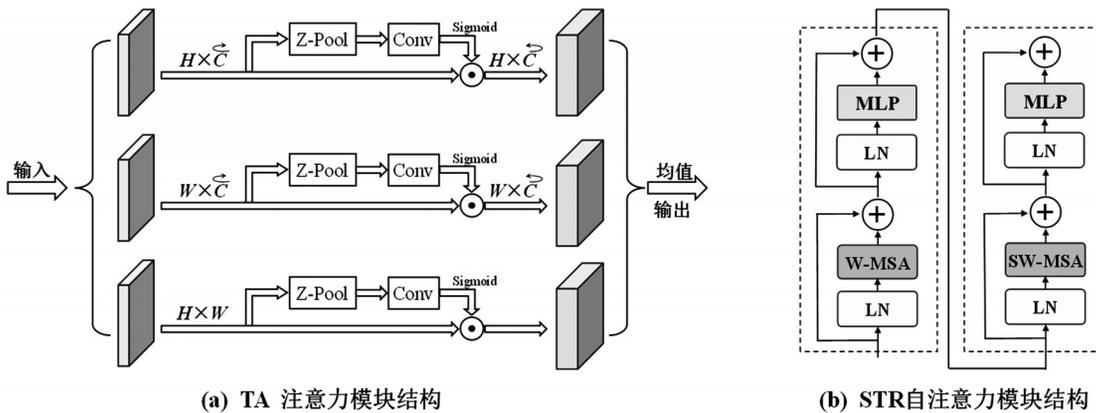


图5 引入模块的结构

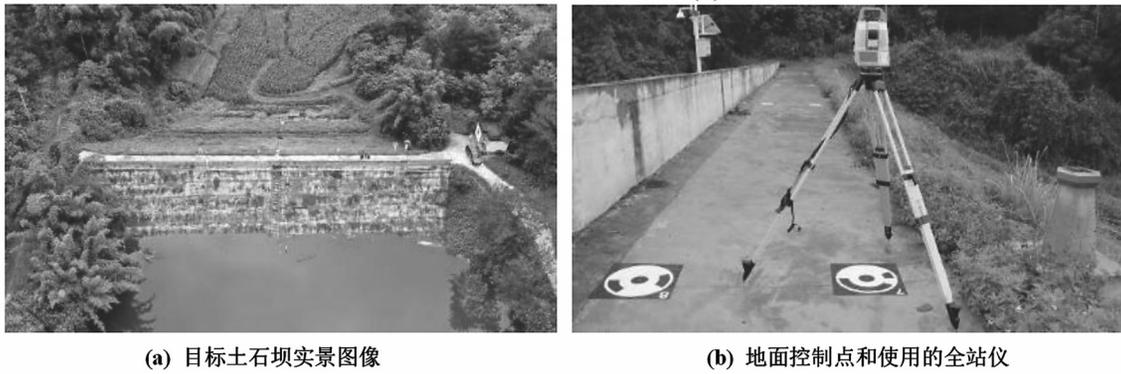


图6 提出方法应用区域和采用的设备

共计采用了356张坝体图像,为了进一步验证提出方法的准确性,采用机载激光扫描仪对坝体区域进行扫描并生成点云作为参考点云,分别与未经坐标转换后的模型点云和转换后的点云进行对比,通过计算点云间的距离分析生成点云的误差范围,结果如图7所示。

从图7可以看出,经过坐标转换后生成的坝体点云与激光扫描结果更加接近,大部分点云距离在10 cm以内,如图7(b)所示。由于SfM算法对如图7(d)中下游面上的杂草点云生成效果较差,导致

与图7(a)中激光扫描生成的点云距离较大。此外,未转换坐标的无人机图像生成的点云与激光扫描对比结果如图7(c)所示。点云对比的结果表明,本文提出的方法在小型水库大坝的常规巡检和目标定位任务中可以提供准确的坐标转换方式。

在实现无人机坐标转换后,还需要验证当结合激光测距仪数据时,无人机对坝体目标三维测量的精度。采用无人机从任意角度和位置对坝顶的控制点进行定位分析,如图8所示。具体的定位结果如图9所示,水平方向上的定位误差大多在6 cm以内,

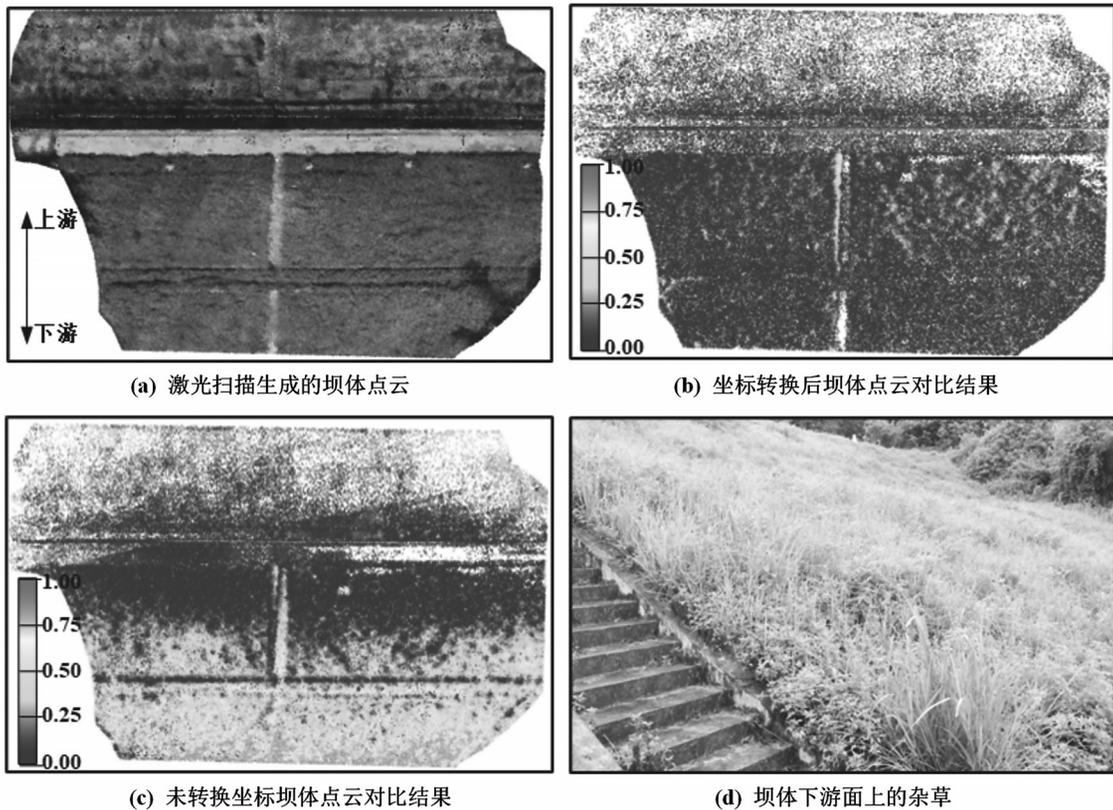


图7 坝体三维点云对比结果(单位:m)

而高程方向上误差相对较大,平均值为6.111 cm。

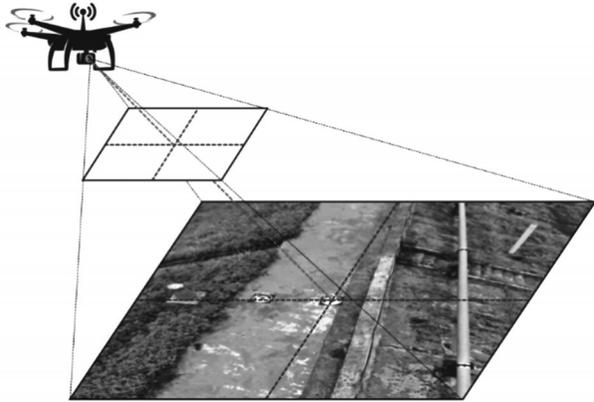


图8 对图像中心控制点三维测量

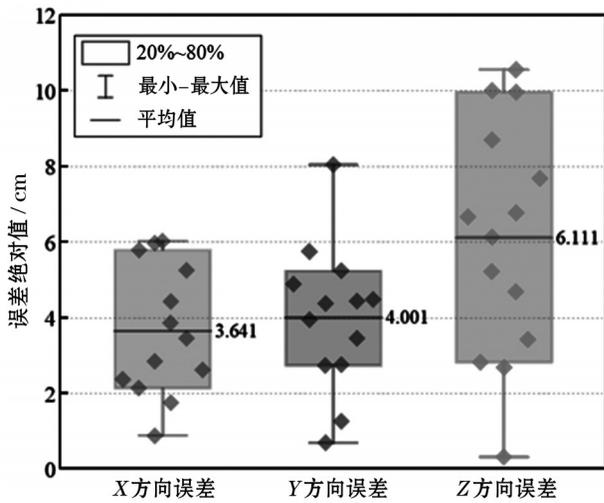


图9 控制点三维定位测量误差(单位:cm)

4.2 行人检测模型训练结果

模型训练的数据集主要包括 WiderPerson、VisDrone2019、COCO 等公开数据集中尺寸较小的行人目标以及采用无人机拍摄的实际行人图像。共计 8 000 张图像用作训练,其中训练集 6 400 张、验证集 1 200 张、测试集 400 张。为评价提出网络的精度,

还引入了 Coordinate Attention (CA)、Convolutional Block Attention Module (CBAM)、Efficient Channel Attention (ECA)代替TA 进行对比,所有网络初始参数保持一致。

在测试集上的评价指标如表 1 所示,提出网络有着最高的精度值, mAP 值达到了 87.17%,相对于原始 YOLOv5s 提高了 3.02%。此外,其推理速度 FPS(Frames Per Second)值达到了 70,满足常规无人机视频数据最低 30 FPS 的要求。提出网络的部分测试结果如图 10 所示,在不同背景和角度下,小目标行人可以被提出的网络准确检测出。

4.3 小型水库大坝行人三维定位

在分析无人机对目标的测量精度后,结合提出的行人检测方法,对小型水库大坝附近的行人进行三维定位,以此确定行人出现的位置并判断是否处于危险区域。对坝上不同位置出现的行人定位结果和坝体相关危险区域如图 11 所示,根据测量的三维坐标可以推导出行人所在坝体表面的具体位置,进而判断是否进入危险区域。此外,由于提出的坐标转换方法计算简单,且行人检测算法具有实时性,因此可以在视频图像中持续分析行人是否进入或离开危险区域,如图 12 所示。

根据行人的位置和设定的区域,可以构建电子围栏,及时发现危险情况。与人工巡检相比,提出的方法具有高效且低成本的优势,由于可以通过设置航线的方式实现自动化,更适用于分布广泛且缺少自动化监测设备的小型水库。

5 结 论

针对无人机在小型水库巡检时缺少高效的坐标转换方式,无法实现对行人准确三维定位的问题,本文提出了无人机大地坐标系与坝体局部坐标系的转换方法。将无人机坐标投影到平面坐标系后,基于 SfM 算法建立坝体局部坐标系与平面坐标

表 1 不同网络在测试集上的评价结果

| 采用模型 | Precision / % | Recall / % | F1 | mAP后 / % | FPS 值 |
|-----------------|---------------|------------|-------|----------|-------|
| 原始 YOLOv5s | 79.79 | 77.17 | 78.46 | 84.15 | 75 |
| 改进 YOLOv5s | 80.64 | 77.32 | 78.95 | 85.35 | 71 |
| 改进 YOLOv5s-CA | 83.22 | 78.16 | 80.61 | 86.82 | 70 |
| 改进 YOLOv5s-CBAM | 82.99 | 76.39 | 79.55 | 86.25 | 68 |
| 改进 YOLOv5s-ECA | 82.42 | 77.21 | 79.73 | 85.91 | 67 |
| 改进 YOLOv5s-TA | 83.37 | 78.90 | 81.07 | 87.17 | 70 |

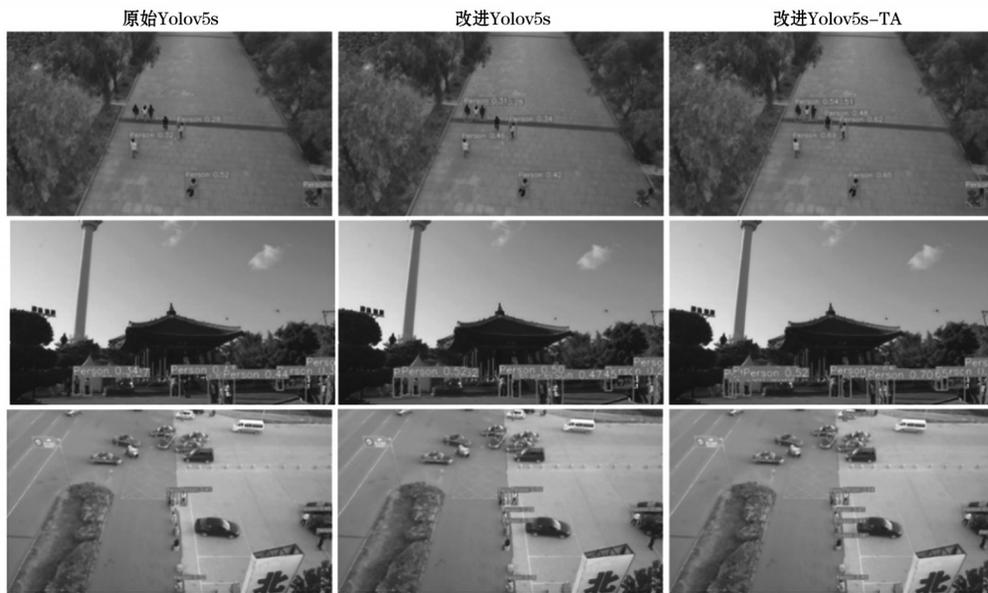


图10 提出网络对行人的检测结果

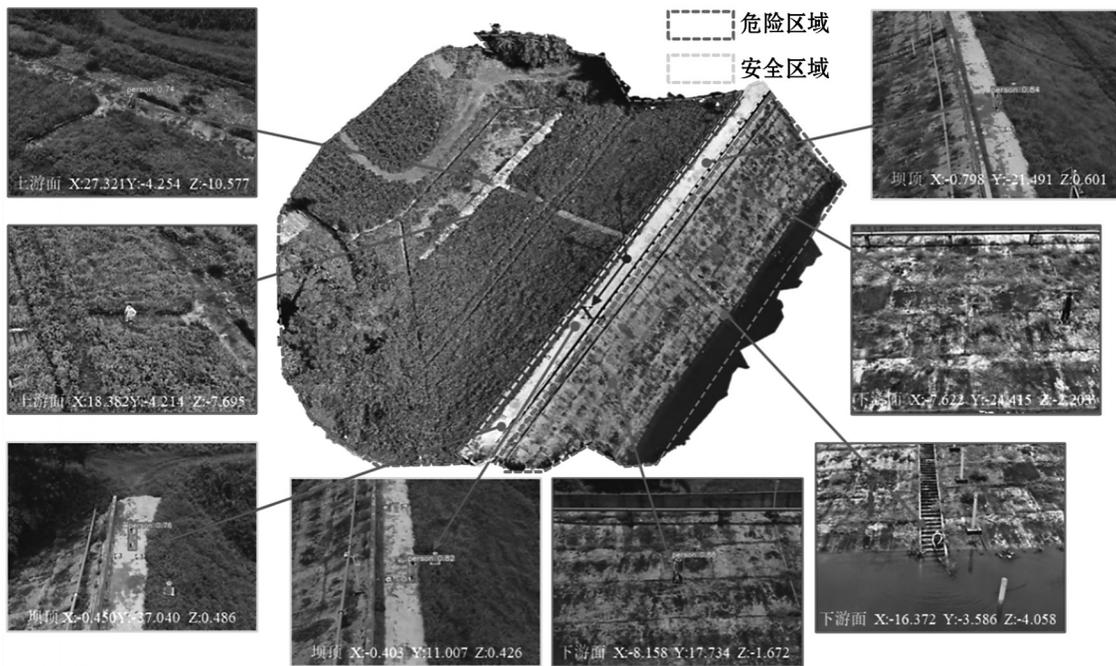


图11 行人在坝体坐标系中的测量结果及在三维模型上的位置

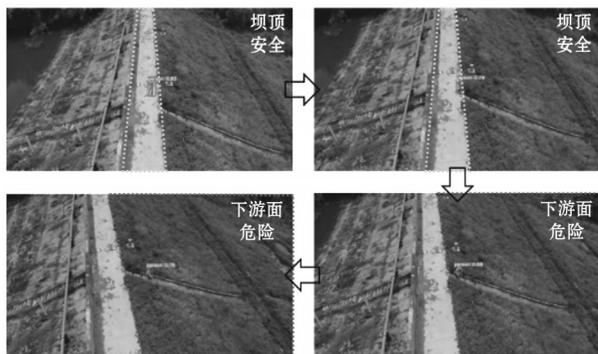


图12 行人在坝面跨区域移动三维定位

的对应关系,通过四参数坐标转换方法实现平面坐标的转换,同时引入高程拟合提高无人机高程转换精度,最终结合激光测距仪和提出的行人智能检测算法,实现对坝体表面行人的准确定位,并判断其是否出现在危险区域,为水库大坝设置电子围栏和安全报警等功能提供依据。

参考文献:

[1] 王健,王士军. 全国水库大坝安全监测现状调研与对策

(下转第32页)

2.7 埋设压浆管

在密封剂封堵的同时埋设压浆管,每个压浆管的间距在50 cm左右,压浆孔的深度在15 cm左右,保证压浆孔穿透垂直伸缩缝口封堵的密封剂。埋设压浆管保持外高内低,约成45°斜形,确保压浆密实到位。

2.8 检查缝面和注浆口

采用压风方式对缝面封闭和注浆口串通情况进行检查,孔口风压不大于0.2~0.25 MPa,发现外漏情况立即予以修补。

2.9 灌浆处理

将灌浆泵接入起始灌浆管,灌注LW水溶性聚氨酯灌浆材料。灌浆自下而上进行,从一端向另一端逐孔依次灌注,确保每条压浆管压满浆。当上一条压浆管开始出浆,显示该压浆管已压满,用扎丝扎牢后再逐次开始下一根压浆管压浆。

2.10 封堵后水下摄像

通过水下摄像保留技术资料,对比施工前后效果。

2.11 封闭刮平

全面检查封闭后的伸缩缝口,对封闭合格的缝口用MB-SXM水下密封剂进行封闭,其后用风铲进行刮平,确保表面平整。

3 几点认识

(1)聚氨酯压浆施工技术效果较好。2022年9月,盐城市斗龙港闸管理所对闸墩伸缩缝实施LW聚氨

酯灌浆修补。2023年4月,工程管理单位通过水下检查发现伸缩缝无渗水、漏水现象,水下施工修补效果良好。

(2)专业潜水员业务技能强。闸墩伸缩缝维修主要是水下作业,必须由专业潜水员承担。专业潜水员接受过水下作业专业训练,熟练掌握潜水技能,熟悉水下作业工作环境和操作要领。

(3)重装备潜水作业安全性高。闸墩伸缩缝水下作业时间长,必须使用重装备潜水作业。重装备潜水服有气体调节功能,自动控制功能强,能够帮助潜水员自由上升和下潜,使水下作业更具灵活性。

江苏省海岸线长达954 km,中华人民共和国成立后,为了保障工农业发展,建设了众多沿海挡潮闸,经过几十年运行,很多挡潮闸存在闸墩伸缩缝增大的问题,利用聚氨酯水下灌浆技术修补挡潮闸闸墩伸缩缝具有工期短、质量优、效益佳的特点,在沿海水利工程管理单位中具有推广使用价值。

参考文献:

- [1] 顾志鸿. 水闸水下部位除险加固方法探讨及应用实践[J]. 江苏水利, 2009(5): 27-29.
- [2] 沈万红, 陈德胜. 水闸闸门槽水下修复技术[J]. 水利建设与管理, 2006(1): 64-65.
- [3] 张心亚, 魏霞, 陈焕钦. 水性涂料的最新研究进展[J]. 涂料工业, 2009, 39(12): 17-23, 27.
- [4] 孔得兵, 夏长城. 基于水闸混凝土构件老化和加固技术剖析[J]. 江西建材, 2016(2): 122-124.
- [5] 贾鑫, 杨树文, 张志华, 等. 搭载POS数据的无人机影像提高定位精度的方法[J]. 遥感信息, 2019, 34(4): 92-96.
- [6] 黄伟, 姜三, 刘先铮, 等. GNSS约束的长航带无人机影像自检校方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(2): 197-207.
- [7] 刘先林, 邹友峰, 郭增长. 大面阵数字航空摄影原理与技术[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2013: 154-155.
- 思考[J]. 中国水利, 2018(20): 15-19.
- [2] LIU D, CHEN J, HU D, et al. Dynamic BIM-augmented UAV safety inspection for water diversion project [J]. Computers in Industry, 2019, 108: 163-177.
- [3] CHEN J, LU W, LOU J. Automatic concrete defect detection and reconstruction by aligning aerial images onto semantic-rich building information model[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2023, 38(8): 1079-1098.
- [4] 王海. 布尔莎七参数在深水港疏浚检测中的应用研究

(上接第18页)