

基于 OpenCV 的落石轨迹识别方法及预警设备研究

张 鑫^{1,2},马春辉^{1,2},孟康平^{1,2},张程宇^{1,2},石俊奇^{1,2},吴雨澄^{1,2}

(1. 西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室,陕西 西安,710048;

2. 西安理工大学水利水电学院,陕西 西安,710048)

摘 要:落石灾害对水利工程的人员与设备安全、工程整体运行安全均造成极大威胁,因此研究高效准确的落石监测方法对保证山区水利工程运行安全十分重要。针对传统监测方法人力成本高、效率低下的问题,通过 OpenCV 中的各种特征提取算法获取落石特征信息,从算法、硬件层面改进落石灾害监测方法。在算法层面,利用 OpenCV 中的目标检测与跟踪算法检测和跟踪落石的运动轨迹,通过提高算法的计算速度和内存使用效率,提高落石灾害识别的准确性与计算效率;在此基础上,通过与霍夫圆法和光流法等方法的识别效果进行对比,进一步验证基于 OpenCV 与卡尔曼滤波的落石识别算法准确性;在硬件层面,以专业摄像头、单片机作为核心硬件搭建落石预警系统,实现现场监测图像的实时传输、处理和存储。上述研究证明:该系统表现出良好的可行性和稳定性,能够有效捕捉落石运动轨迹实现预警预报,从而为水利工程、道路工程、隧洞工程等山区基础设施的安全运行提供更精确的信息。

关键词:落石灾害;落石监测;视觉识别;预警设备

Title: Study on rockfall trajectory recognition methods and early warning devices based on OpenCV// by ZHANG Xin, MA Chunhui, MENG Kangping, ZHANG Chengyu, SHI Junqi and WU Yucheng// State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology

Abstract: Rockfall hazards pose a significant threat to the safety of personnel and equipment at water conservancy projects, as well as to the overall operational safety of these projects. Therefore, studying efficient and accurate rockfall monitoring methods is crucial for ensuring the safe operation of water conservancy projects in mountainous areas. To address the high labour costs and low efficiency of traditional monitoring methods, this study utilizes various feature extraction algorithms in OpenCV to obtain rockfall feature information, thereby improving rockfall hazard monitoring methods at both the algorithm and hardware levels. At the algorithm level, object detection and tracking algorithms in OpenCV are utilized to detect and track the movement trajectories of falling rocks. By improving the computational speed and memory efficiency of the algorithms, the accuracy and computational efficiency of rockfall hazard identification are enhanced. Based on this, the accuracy of the rockfall identification algorithm based on OpenCV and Kalman filtering is further validated by comparing its performance with that of methods such as the Hough circle method and the optical flow method. At the hardware level, a rockfall early warning system is constructed using professional cameras and single chip microcomputers as core hardware, enabling the real-time transmission, processing, and storage of on-site monitoring images. The aforementioned study demonstrates that the system exhibits excellent feasibility and stability, effectively capturing rockfall trajectories to enable early warning and forecasting, providing more precise information to ensure the safe operation of mountainous infrastructure, including water conservancy projects, road construction, and tunnel engineering.

Key words: rockfall disaster; rockfall monitoring; visual recognition; early-warning equipment

中图分类号:TV61

文献标志码:B

文章编号:1671-1092(2026)03-0031-07

0 引言

水利工程多位于深山峡谷中^[1],而落石灾害是山区地带常见灾害之一^[2],对管理人员生命、生产设施设备与水利工程的整体安全运行构成了严重威胁(如表1所示),制约着我国基础设施建设与运维的可持续发展。随着科技的发展,遥感技术、无人机、地震监测^[3]和人工智能等众多新技术被应用于落石灾害识别,可以提高灾害识别准确性和预警预报能力,有效降低人力成本、保障水利工程安全。

在落石识别领域,现有研究已取得显著进展:陈垦等^[4]基于改进YOLOX实现了高精度的实时检测;徐成伟等^[5]结合雷达与视频分析技术有效降低了误报率;龙学军^[6]、刘林芽等^[7]学者通过优化YOLOv3网络结构,提升了对小目标落石的捕捉能力;Yu^[8]和Zhang^[9]等团队分别利用YOLOv8n和动态神经网络进一步提高了检测性能。然而,在落石监测的实际应用中,YOLO系列算法仍面临三大挑战:在场景适配性方面,复杂山地环境中的光照剧变和植被遮挡会导致对小尺寸、低对比度落石的识别率下降超过30%;在成本部署层面,依赖高性能GPU的硬件方案单路成本超过万元,难以满足规模化部署需求;在功能完整性上,现有算法侧重静态检测,缺乏对落石运动轨迹的分析能力。

针对这些技术瓶颈,本研究提出了一套创新解决方案:通过开发基于运动学分析的轨迹预测模型实现落石路径精准预判;构建软硬件协同的嵌入式监测系统,将硬件成本降低90%以上;建立动态风险评估体系,形成从风险预判到应急响应的完整技

术链条。该系列技术创新有效解决了海量数据处理中的运算效率与精度平衡问题,为水利工程地质灾害防控提供了兼顾时效性与准确性的完整解决方案,显著提升了灾害预警的可靠性和工程防护的实效性。

1 OpenCV视觉识别算法基本原理

围绕落石监测中实时探测运动目标并预估轨迹这一关键需求,OpenCV的背景减除手段(比如高斯混合模型)及轮廓检测算法能够有效地分离出落石目标。借助整合轨迹跟踪算法,对目标的运动走向展开预测分析,同时结合速度和体积参数的运算,就可以实现自动化预警功能。

通过融合背景减除、形态运算、轮廓检测及轨迹追踪等核心技术,这套基于OpenCV技术架构的监测系统能实时识别和预警落石轨迹系统。具体来说,使用高斯混合模型(MOG2)来执行动态背景建模,凭借实时更新背景模型,实现前景目标的分离,并联合运动轨迹预测模型,完成落石速度和体积参数的量化计算。以下是算法的执行流程和核心数学表达式。

1.1 背景减除

采用MOG2模型分离前景目标,公式如下:

$$P(x_t) = \sum_{k=1}^K \omega_{k,t} \cdot \eta(x_t, \mu_{k,t}, \Sigma_{k,t}) \quad (1)$$

式中: $P(x_t)$ 表示在 t 时刻像素点 x_t 属于背景的概率; K 为高斯分布个数; $\omega_{k,t}$ 是 t 时刻第 k 个高斯

表1 高陡边坡滚石灾害典型案例

Table 1 Typical cases of rockfall disasters at high and steep slopes

时间	地点	灾害详情	损失
2002年5月	四川绵竹县	一块十余吨重的巨石砸中正在行驶的客车	18人死亡,14人受伤
2004年12月	贵州省黔岭镇	暴雨引起崩塌,滚石坠落	39人遇难,13人受伤
2007年11月	湖北省宜万铁路	隧道洞口岩体崩落,一辆过路客车被埋	30余人不幸当场死亡
2009年7月	汶川彻底关大桥	山体滚落巨石砸毁,导致约100 m桥面坍塌	12人受伤,6人死亡
2014年7月	国道213线茂县境内	滚石从1 000 m的山顶砸下	19人受伤,11人死亡
2015年3月	广西桂林叠彩山景区	巨石滚落击中多名游客	7人遇难,25人受伤
2018年10月	云南省怒江州泸水市称杆乡排把村	滚石击中村民房屋	2人遇难,3人受伤
2019年7月	四川省阿坝州松潘县岷江乡	滚石击中旅游大巴	8人遇难,16人受伤

分布权重且权重和为1; $\eta(x_t, \mu_{k,t}, \Sigma_{k,t})$ 是 x_t 服从第 k 个高斯分布的概率密度; $\mu_{k,t}$ 是均值, $\Sigma_{k,t}$ 是协方差矩阵。MOG2模型通过混合多个高斯分布来进行背景建模,能够适应复杂场景中的动态背景变化。

1.2 形态学去噪

对前景掩膜进行开运算(先腐蚀后膨胀),消除噪声点:

$$\text{Opening}(I) = \text{Dilate}(\text{Erode}(I, \text{kernel}), \text{kernel}) \quad (2)$$

式中: $\text{Opening}(I)$ 表示图像 I 开运算结果; Dilate 是膨胀; Erode 是腐蚀; kernel 为结构元素。开运算能够有效去除前景中的小噪声点,同时保留较大的目标区域,确保后续轮廓检测的准确性。

1.3 轮廓检测与筛选

提取轮廓后,根据面积阈值过滤小目标:

$$\text{Area}(\text{contour}) > T_{\text{size}} \quad (3)$$

式中: $\text{Area}(\text{contour})$ 表示轮廓的面积; T_{size} 是一个预设的面积阈值。通过面积阈值筛选,系统能够过滤掉小尺寸的噪声目标,仅保留符合落石特征的轮廓。

1.4 轨迹跟踪与预测

基于历史轨迹预测当前位置,采用加权平均法计算:

$$\text{Predicted Position} = (1 - \alpha) \cdot P_{t-1} + \alpha \cdot (P_{t-1} + \Delta P_{t-1}) \quad (4)$$

式中: $\text{Predicted Position}$ 表示预测的位置; α 为历史权重; P_{t-1} 是目标在上一时刻($t-1$ 时刻)的位置, ΔP_{t-1} 是目标在上一帧($t-1$ 时刻到 t 时刻)的位移。通过加权平均法,系统能够平滑轨迹预测结果,减少目标丢失或跳变的情况。

1.5 速度与体积计算

垂直速度通过相邻帧位移计算:

$$v = \frac{\Delta y \cdot \text{scale} \cdot \text{fps}}{\Delta t} \quad (5)$$

式中: v 是垂直方向的速度; Δy 是目标垂直方向上的位移; scale 是将图像中的像素距离转换为实际物理距离的尺寸因子; fps 是帧率; Δt 是时间间隔。

体积估算基于轮廓尺寸与预设深度:

$$V = w \cdot h \cdot d_{\text{assumed}} \quad (6)$$

式中: V 是目标的体积; w 是目标的宽度; h 是目

标的高度; d_{assumed} 是预设深度。

算法完成对体积和速度的计算后,与所设的阈值进行对比,可以判断落石的风险大小。

2 基于OpenCV的落石轨迹识别方法构建

2.1 落石轨迹识别难点分析

我国山区广布、气候特殊,落石灾害随机性、突发性强,影响范围广,在水利、公路、铁路、桥梁、隧道等基础设施建设工程中十分常见^[8]。

(1)“研究真空地带”: 水工结构落石灾害研究缺乏系统性的定量分析理论和方法。

(2)落石识别算法的难点: 落石识别需处理几何及动态特征数据,现有算法存在效率低、内存占用大等问题。

(3)基于不完整轨迹的早期外推预测难点: 如何在落石轨迹刚被识别出前几帧时,就快速、准确地预测其未来运动轨迹和可能的影响范围。这涉及到运动模型的建立和预测算法的不确定性。

(4)预警时效性与准确性的平衡难点: 过早预警可能误报,如飞鸟误判引发不必要的恐慌或行动;过晚预警则失去意义。如何设置合理的置信度阈值和预警触发机制是巨大挑战。

(5)系统实时性难点: 预判和预警要求算法必须在极短的时间内完成处理,这对计算效率和系统架构提出了苛刻要求。

因此,本项目基于OpenCV算法模拟识别落石轨迹并提取落石特征,以期在水利工程中避免落石灾害和减小落石灾害造成的损失。

2.2 OpenCV算法在落石轨迹识别研究中的优势

针对落石轨迹识别的技术难点,研究通过整合OpenCV的图像处理算法、卡尔曼滤波的状态估计理论及目标检测跟踪技术,实现复杂背景下的落石形态特征提取与噪声抑制,进而完成运动轨迹的实时检测与跟踪精度优化,最终构建边坡落石运动的轨迹识别系统。该系统依托OpenCV的核心支撑,具备三大优势:毫秒级实时处理满足时效性需求,MOG2背景减除算法适配复杂野外环境,参数化配置可灵活应对多场景监测。

综上所述,本研究搭建的落石轨迹识别系统通

过将 OpenCV 与卡尔曼滤波相结合,为落石检测与跟踪提供了可靠的技术保障。首先,通过边缘检测和角点检测提取落石轮廓和关键点,其次利用目标跟踪算法对落石运动状态进行实时监测,最后结合卡尔曼滤波对轨迹数据进行优化处理,计算出落石运动速度、轨迹及撞击点。基于 OpenCV 的落石轨迹识别方法流程见图 1。

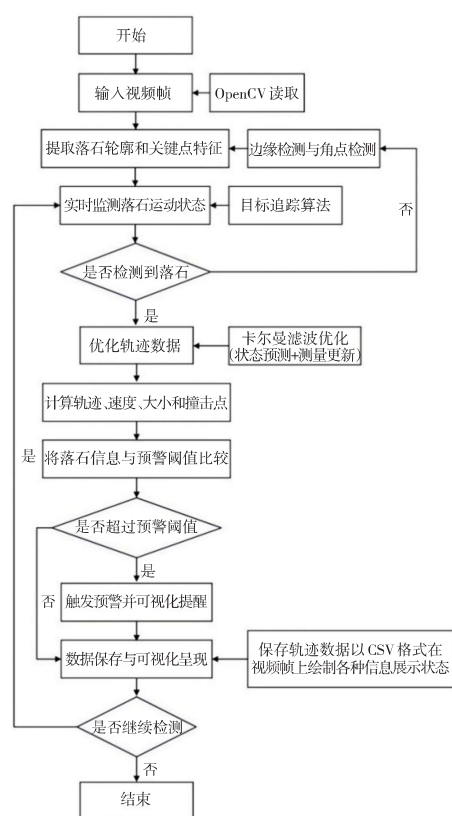


图 1 基于 OpenCV 的落石轨迹识别方法流程

Fig. 1 Flow chart of OpenCV based rockfall trajectory identification method

2.3 视觉识别效果优化方法

本研究针对传统落石识别方法存在的轨迹预测失衡、单一阈值误判率高、多线程处理延迟等局限,通过动态参数配置增强环境适应性,优化轨迹预测模型以提高跟踪准确性,采用多线程处理降低系统延迟,并引入双阈值决策机制减少误判。这些措施有效提升了系统在复杂环境下的鲁棒性与计算效率,同时通过完善数据管理机制加强历史数据利用,为风险评估和模型优化提供了可靠支撑,最终实现了高精度的落石探测与轨迹跟踪。

为提升落石轨迹识别系统在复杂山区环境下的精度与实时性,针对动态目标跟踪中存在的环境

适应性差、计算延迟高及预警可靠性不足等问题,本研究从参数配置、模型优化、数据处理及决策机制四个维度构建多级优化策略,具体设计如下。

2.3.1 动态参数自适应配置策略

针对传统算法参数固定的场景适配局限性,设计基于“config.json”的动态参数配置机制,通过预设面积阈值 T_{size} (范围 250~500 px^2) 自适应筛选目标,设置消失帧数阈值(默认 30 帧)清除冗余轨迹,动态分配历史权重 α 平衡运动趋势,提升复杂环境下的目标分离精度。由表 2 可知,在低对比度试验(岩块与边坡颜色接近)中,OpenCV+卡尔曼滤波法的准确率达 70%~90%,较霍夫圆法提升 3 倍以上,证实了动态参数对环境干扰的抑制作用。

2.3.2 轨迹预测模型的分阶段优化

针对落石碰撞弹跳过程中的非线性轨迹跟踪难题,在传统加权平均法基础上,结合卡尔曼滤波构建分阶段预测模型。①初始阶段(轨迹长度<2):直接采用上一帧位置 P_{t-1} 作为预测值,避免数据样本不足导致的误差放大;②稳定阶段(轨迹长度 ≥ 2):先通过公式(4)计算基础预测值,再引入卡尔曼滤波进行二次优化。

状态方程:

$$X_{t|t-1} = F \cdot X_{t-1} + w_t \quad (7)$$

式中: $X_t = [x_t, y_t, v_x, v_y]^T$; T 为状态向量(包含位置与速度); F 为状态转移矩阵; w_t 为过程噪声(服从高斯分布)。

测量更新:

$$K_t = P_{t|t-1} \cdot H^T \cdot (H \cdot P_{t|t-1} \cdot H^T + R)^{-1} \quad (8)$$

式中: K_t 为卡尔曼增益(用于权衡预测值与观测值的置信度,决定观测值对最终估计的修正程度); $P_{t|t-1}$ 为预测误差协方差矩阵(表示基于 $t-1$ 时刻信息对 t 时刻状态预测的不确定性); H 为观测矩阵(将状态向量映射到观测空间); R 为观测噪声协方差矩阵(描述摄像头等传感器的测量误差,通常通过标定试验确定)。通过卡尔曼增益 K_t 融合预测值与实测值,修正因遮挡或检测噪声导致的轨迹偏移。

该模型有效解决了落石碰撞阶段的轨迹丢失问题,即使在落石短暂撞击树木的遮挡场景中,轨迹仍保持连续。

2.3.3 多线程与异步通信架构设计

为满足单帧处理延迟<100 ms 的实时监测需求,采用“多线程+ZeroMQ 异步通信”架构优化数据处理流程:采集线程实时读取摄像头视频流至共享缓冲区,检测线程执行背景减除、形态学去噪及轮廓筛选并输出落石质心坐标,决策线程计算速度与体积并触发警报。线程间通过 ZeroMQ 的 PULL/PUSH 模式实现异步通信,减少数据传输阻塞。

该架构显著提升了系统处理效率。现场测试表明,单帧处理时间从传统单线程的 120 ms 降至 50 ms 以内,在 2023 年某水电站试验中,成功在落石到达坝顶前 1.2 s 触发道闸防护,实时性优于霍夫圆法(平均延迟 180 ms)和光流法(平均延迟 110 ms)。

2.3.4 双阈值预警机制构建

为降低单一指标误判风险,设计基于速度与体

积的双阈值预警逻辑。①预警触发条件:当落石速度 $v \geq v_{warn}$ (默认 5 m/s) 且体积 $V \geq V_{warn}$ (默认 0.02 m³) 时,系统发出警报;②阈值动态调整:通过历史落石数据调优,支持根据工程场景修正阈值(如坝体敏感区域 v_{warn} 降至 3 m/s)。

该机制有效减少了误报与漏报。表 2 显示,系统漏检率降至 6.8%,较光流法(11.2%)降低 39%。在 2024 年秦岭水库现场测试中,成功过滤 3 次因风吹碎石(速度 7 m/s,体积 0.01 m³)导致的误报,验证了预警逻辑的可靠性。

综上,通过动态参数配置、分阶段轨迹预测、多线程架构及双阈值决策的协同优化,系统在复杂环境下的识别精度、实时性与可靠性得到显著提升,且各项优化效果均通过对比试验及现场测试得到量化验证,为落石灾害的精准预警提供了技术支持。

表 2 霍夫圆法、光流法、OpenCV+卡尔曼滤波试验对比结果

Table 2 Comparison of results by Hough circle method, optical flow, and OpenCV with Kalman filter

场景	算法	准确率度	漏检率	位置误差/px	识别效果综合评估
山地晴天场景(常规自然环境)	霍夫圆法	40%~60%	23.4%	12.5±3.2	25%~45%
	光流法	60%~80%	11.2%	8.7±2.1	55%~70%
	OpenCV+卡尔曼滤波	70%~90%	6.8%	5.2±1.3	75%~90%
背景噪声干扰较小的实验室模拟场景	霍夫圆法	50%~65%	20.2%	10.2±2.8	40%~55%
	光流法	75%~85%	10.5%	8.7±2.1	65%~80%
	OpenCV+卡尔曼滤波	85%~95%	5.8%	5.2±1.3	80%~95%
夜间无照明场景(红外摄像)	霍夫圆法	10%~25%	32.1%	18.7±4.5	10%~30%
	光流法	40%~60%	19.8%	13.6±3.4	40%~60%
	OpenCV+卡尔曼滤波	60%~80%	9.5%	7.3±1.9	70%~85%

3 基于 OpenCV 的落石轨迹识别算法验证

3.1 试验数据采集与参数调优

本研究在 PyCharm 开发环境下,采用自行构建的边坡落石图像数据集进行算法训练与调优。通过背景减除算法、优化 Canny 边缘检测算子阈值及初始化轨迹跟踪模型参数,系统提升了运动落石检测与轨迹跟踪的稳定性与准确率。

3.2 落石轨迹识别算法对比分析

为验证不同算法在低对比度场景下对岩块运

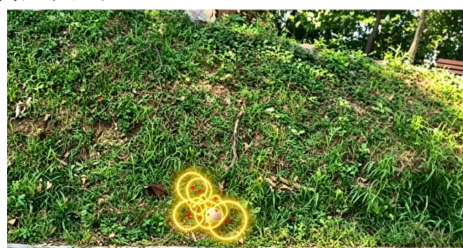
动轨迹识别的有效性,本研究构建试验边坡并以卵石模拟落石,对比霍夫圆法、光流法及 OpenCV 与卡尔曼滤波组合算法,检验结果见表 2 和图 2。结果表明,OpenCV 与卡尔曼滤波组合算法在低对比度、遮挡、光照变化等场景下具有更优的识别性能和鲁棒性。

4 落石预警系统搭建

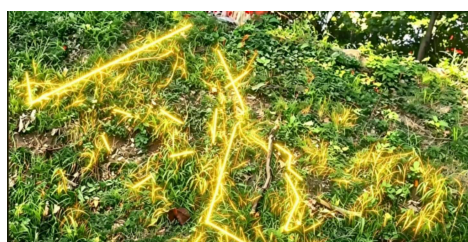
4.1 硬件开发

为了实现实时监测与数据处理,本研究搭建了高精度视觉检测平台。在硬件配置方面,采用高分

分辨率的网络摄像头与具备高速运转能力和丰富接口的单片机相结合,显著提高了系统的检测精度和运行效率。通过硬件调试,优化各模块之间的整体性,确保系统运行的稳定性和高效性。该系统的硬件架构见图3。



(a)霍夫圆法



(b)光流法



(c)OpenCV+卡尔曼滤波法

图2 霍夫圆法、光流法、OpenCV+卡尔曼滤波检验结果

Fig. 2 Comparison of results by Hough circle method, optical flow, and OpenCV with Kalman filter

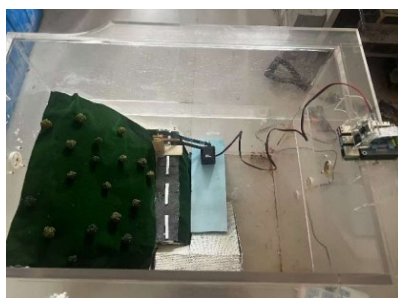


图3 落石预警系统展示

Fig. 3 The early warning system for rockfall

4.2 预警系统搭建

4.2.1 设计思路

本系统的搭建思路围绕检测方法、模型构建、算法优化与软硬件集成展开(见图4)。在检测方法

上,以边坡落石识别为核心,借助OpenCV视觉识别技术捕捉落石影像特征,结合落石判别算法对获取的信息进行分析判断,实现对落石的精准识别。基于此,搭建边坡落石模型,同时获取落石的物理力学参数,如质量、速度、碰撞恢复系数等。模型搭建完成后,需对其进行调试,在此过程中不断优化识别代码及算法,调整算法参数,提高系统对落石检测的准确性、及时性和可靠性。最后将软件、硬件集成,将经过优化的软件算法与硬件设备(如摄像头、传感器等)进行整合,形成一个完整的边坡落石预警系统。本研究将现有预警系统从实验室拓展至现实大尺寸环境(见图5),以此证明其可行性和应用前景,未来将进一步开展试验研究和实践探索。

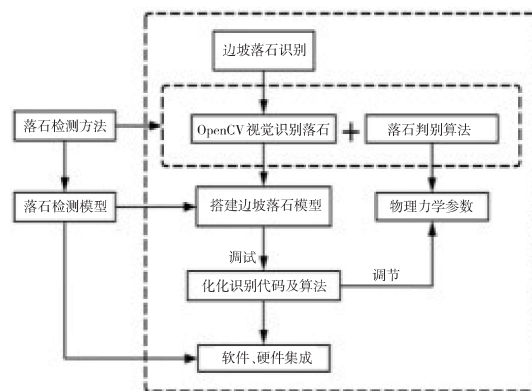


图4 预警系统设计思路

Fig. 4 Design of the early warning system

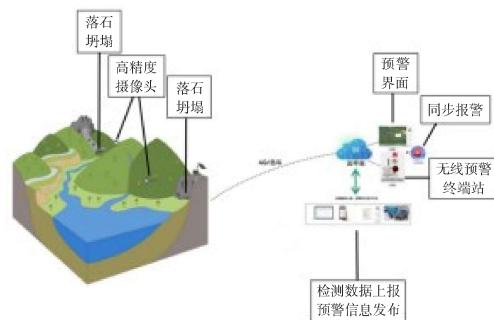


图5 预警系统实现设想

Fig. 5 Realization outlook of the early warning system

4.2.2 预警系统

预警系统由主功能界面和预警界面两部分组成。软件主界面采用模块化布局,用户点击即可进入对应模块。参数设置界面通过分区设计实现清晰分类,形成“参数设置-监控执行-数据管理”的完整闭环。系统实时反馈各环节状态,在监控界面同时显示动态轨迹图形与数值分析面板,确保操作连

贯性与数据透明度;在系统实时监测的过程中,一旦落石的相关指标(如落石的速度、大小、深度等)超过了预先设置的阈值时,显示终端切换至红色,形成强烈视觉提醒,并且预警界面自动弹出。系统内置的自校验机制可防止误报,当连续5帧数据均超限时方触发全系统报警状态,保障水利工程应急响应的准确性与时效性。

4.2.3 实际应用

落石轨迹的识别是落石灾害发生与后续精准避险的重要连接部分,可利用落石轨迹识别的范围圈定危险区域,同时轨迹识别储存的完整运动数据可用于追溯落石的初始位置,为后续水利工程边坡加固、危石清理等防控措施提供精准依据,实现提前干预,完成落石预警。

对于公路、铁路等交通线路,需兼顾预警及时性与交通通行效率,精准判断落石是否入侵交通线路,及时预警,避免交通中断;对于水库大坝、引水渠等水利工程,需兼顾人员安全与工程运行保障,判断落石是否落入水体或堵塞渠道,保障施工人员与工程运行的安全;对于城镇、乡村等居民区,需实现预警信息全覆盖,简化预警信息,确保居民快速理解危险范围与避险方向。

5 结语

本研究针对水利工程边坡落石监测的技术瓶颈,创新性地构建了“视觉感知-智能分析-分级预警”三位一体的监测体系。通过自主研发的高精度图像采集装置与改进的目标检测算法,能精确捕捉和分析落石的运动轨迹,为预防和控制落石灾害提供科学依据,可以实现对水利工程大范围落石可能发生地点的实时监控,更高效,更快捷,实现了对水利工程边坡落石灾害的实时监测与精准识别。研究表明,该监测平台能够有效捕捉落石运动轨迹,并根据落石规模与轨迹制定分级预警措施,显著提升了水利工程的安全管理水平。未来研究将进一步优化算法精度,扩大监测范围,为山区水利工程的安全运行提供更全面的技术保障。

参考文献:

- [1] 郭吉葵.陕西省水利水电工程地质灾害风险评价研究[D].西安:长安大学,2020.
- [2] 邓建辉,韦晓,戴仕贵,等.泸定地震诱发灾害特征分析[J].工程科学与技术,2024,56(1):117-126.
- [3] 谢斌,高桂山,黄志勇,等.机器学习实现崩塌落石微震信号自动化检测和分类[J].大地测量与地球动力学,2025(6):654-660.
- [4] 陈垦,欧鸥,杨长志,等.基于改进YOLOX的落石检测方法[J].计算机测量与控制,2023,31(11):53-59.
- [5] 徐成伟,张德强,张昊,等.基于雷达与视频分析技术的铁路崩塌落石自动监测报警系统设计与实现[J].铁路计算机应用,2017,26(11):22-27.
- [6] 龙学军,高枫.基于机器视觉的高速道路落石检测[J].中国交通信息化,2021(7):131-133.
- [7] 刘林芽,吴送英,左志远,等.基于YOLOv3算法的山区铁路边坡落石检测方法研究[J].计算机科学,2021,48(S2):290-294.
- [8] Yu A J,Fan H R,Xiong Y H,et al.LHB-YOLOv8: An Optimized YOLOv8 Network for Complex Background Drop Stone Detection[J].Applied Sciences,2025,15(2):737.
- [9] Zhang X L,Fu Q,Li Y G,et al.A Dynamic Detection Method for Railway Slope Falling Rocks Based on the Gaussian Mixture Model Segmentation Algorithm[J].Applied Sciences,2024,14(11):4454.
- [10] 彭朋,高浪超,李家春.基于改进Yolov8-GCB的公路落石检测方法[J].长安大学学报(自然科学版),2025,45(2):24-35.
- [11] 高切,李登华,丁勇.基于M-DBT框架的岩质边坡落石跟踪算法研究[J].水利水运工程学报,2024(3):166-176.
- [12] 刘孜学,王富斌,虞凯.基于改进YOLOv3的铁路落石检测方法研究与实现[J].高速铁路技术,2022,13(3):52-56,80.
- [13] 姬中民,孙军红,伍法权,等.高陡路堑岩质边坡潜在落石灾害评估及防护建议[J].中国公路学报,2023,36(10):119-130.
- [14] 胡昊,史天运,关则彬.融合混合注意力和改进YoloX的铁路落石检测方法[J].电子测量技术,2022,45(20):110-116.
- [15] 赵天豪.基于离散元的滚石运动特征参数及其防护措施研究[D].西安:西安理工大学,2023.
- [16] 赵书锋.九寨沟景区某崩塌落石运动轨迹的理论预测[J].自然灾害学报,2024,33(6):48-58.
- [17] 刘飞跃,杨天鸿,朱万成,等.基于落石视频监测的露天矿岩质边坡临滑预警研究[J].岩土工程学报,2025(4):792-800.
- [18] 冯亮,张振.微震技术在崩塌落石监测预警应用的研究进展[J].工程地质学报,2024,32(2):545-564.
- [19] Cantimurova S,Parshin A.Combined Methodology for Rock-fall Susceptibility Mapping Using UAV Imagery Data[J].

(下转第52页)

经网络预测的偏差存在逐步减小的趋势。

从图7可以看出,GA-BP神经网络对从大坝沉降数据库中随机抽取的单个测点随时间变化的完整沉降数据也具有较好的预测性能,其MSE值小于BP神经网络, R^2 值大于0.97,表明GA-BP神经网络模型能够预测大坝某一位置随时间变化的累计沉降。综合来看,GA-BP神经网络所预测的结果更接近真实值。

尽管图7中存在真实值与预测值偏离的情况,但是累计沉降值随时间推移只会增加或趋于收敛,不会出现下降趋势,因此导致该现象的原因可能是原始数据在记录过程中存在误差,亦或是施工过程中大型机械对局部点位的扰动。但是GA-BP神经网络模型在预测过程中自行拟合了该位置的累计沉降量,这表明GA-BP神经网络具有较好的预测性能。

3 结 语

以新疆某土石坝施工期的沉降问题作为研究对象,通过人工神经网络对其沉降结果进行预测。试验表明,在输入参数上,将测点位置、时间参数及上下填筑参数作为神经网络学习数据,能够较为准确地预测大坝施工期特定位置的沉降。笔者分别

采用BP神经网络模型、GA-BP神经网络模型对土石坝沉降进行预测,预测结果表明GA-BPNN相比于BPNN具有更好的泛化能力,其结果也更趋近于真实值,在实际工程中能为大坝填筑施工提供参考。笔者主要探讨的是施工期沉降,填筑材料差异较小,故而未将坝料参数作为训练参数之一。对于不同的工程项目,坝料参数必然不同,但是建模方法相似,因此对于多工程联合建模分析时,坝料参数也是重要参数之一。 ■

参考文献:

- [1] 李家明,周佳兴.人工土石坝的分类及用途综述[J].四川建筑,2019,39(1):114-115.
- [2] 温青山.基于ANSYS的某水库土石坝段地基沉降及处理分析研究[J].水利科学与寒区工程,2020,3(3):37-41.
- [3] NB/T 10872—2021,碾压式土石坝设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2021.
- [4] 周中元,黄颖,张诚.深度学习原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2021.

收稿日期:2025-02-24

作者简介:姚 健(1997—),男,浙江衢州人,工程师,主要从事岩土设计工作。

作者邮箱:351434048@qq.com

(上接第37页)

Remote Sensing,2024,16(1):177.

- [20] Butcher B,Walton G,Kromer R,*et al.*High-Temporal-Resolution Rock Slope Monitoring Using Terrestrial Structure-from-Motion Photogrammetry in an Application with Spatial Resolution Limitations[J].Remote Sensing,2024,16(1):66.
- [21] Bolkas D,Walton G,Kromer R,*et al.*Registration of multi-platform point clouds using edge detection for rockfall monitoring[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2021,175:366-385.
- [22] Tian R L,Shi H M,Guo B Q,*et al.*Multi-scale object detection for high-speed railway clearance intrusion[J].Applied Intelligence,2021,52:3511-3526.
- [23] Carlà T,Farina P,Intrieri E,*et al.*On the monitoring and early-warning of brittle slope failures in hard rock masses: Examples from an open-pit mine[J].Engineering Geology,2017,228:71-81.
- [24] Pellicani R,Spilotro G,Van Westen C J.Rockfall trajectory

modeling combined with heuristic analysis for assessing the rockfall hazard along the Maratea SS18 coastal road (Basilicata, Southern Italy)[J].Landslides,2016,13(5):985-1003.

- [25] Torsello G,Vallero G,Milan L,*et al.*A Quick QGIS-Based Procedure to Preliminarily Define Time-Independent Rockfall Risk: The Case Study of Sorba Valley, Italy[J].Geosciences,2022,12(8):305.

收稿日期:2025-07-24

基金项目:国家自然科学基金项目(52409173);陕西省教育厅科研计划项目(23JY058);西安市自然科学基金项目(2025JH-ZRXX-0411);大学生创新创业训练计划项目(202410700061)

作者简介:张 鑫(2003—),男,湖北武汉人,本科在读,主要从事水利工程智能监测、计算机视觉在水利防灾减灾中的应用等方面的研究。

作者邮箱:3435889592@qq.com