

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221180

# 基于图像识别技术和轨道机器人的大坝安全 智能移动巡检技术研究

李倩<sup>1</sup>, 季 昀<sup>2</sup>, 孙辅庭<sup>1</sup>, 刘雨佳<sup>1</sup>, 李君军<sup>2</sup>, 刘西军<sup>2</sup>

(1. 国家能源局大坝安全监察中心, 浙江 杭州 310000; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 为实现大坝远程移动监视、重要缺陷的自动识别和重点监测设备测读, 开展了基于图像识别技术和轨道机器人的大坝安全智能移动巡检技术研究。首先基于轨道机器人构建了大坝安全智能移动巡检系统, 在此基础上, 基于图像识别技术实现了大坝典型缺陷的自动识别和重点监测设备测读。结合某水库大坝进行实际应用, 取得良好的应用效果, 实现了大坝安全远程、大范围巡检, 可显著减少人工巡检工作量, 并可在极端自然条件下取代人工巡检及时掌握大坝等水工建筑物运行情况。研究结果可为水库大坝的安全监控提供重要参考和技术支撑。

**关键词:** 智能巡检; 轨道机器人; 图像识别; 大坝安全; 裂缝; 析钙渗水; 表盘读数

**中图分类号:** TV698.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)04-0107-03

## 1 引言

近年来, 监测技术已有较大进步, 但受仪器监测在时空上不连续特性的限制, 目前尚无法仅依靠仪器监测实现大坝安全的全面监控, 因此做好巡视检查具有重要意义<sup>[1]</sup>。近年来, 水库大坝安全巡检技术的发展主要侧重于研发基于掌上电脑(PDA)、RFID 标签、近场通信(NFC)、智能手机终端等技术的智能巡检系统, 但巡检基础信息的获取仍为传统模式, 即主要通过人工现场查看、拍照、记录获得<sup>[2,3]</sup>。传统人工巡查方式存在依靠肉眼观察或无人机巡航观察而使巡查范围和对象受限、巡检不及时、在暴雨和地震等极端工况下难以到达重要巡视点、高坝大库人工巡检工作量较大等不足。随着水利信息化的逐步推进, 视频监控技术在水利行业得到了一定应用, 但侧重于图像视频的采集、通讯和查询等<sup>[4,5]</sup>, 且采用固定摄像头进行远程监视的应用较多, 而采用轨道机器人进行大范围移动巡检的研究和应用相对较少。尤其是与大坝结构安全相关的视频监控技术(特别是视频图像深度处理)研究较少<sup>[6,7]</sup>。因此, 开展基于图像识别技术和轨道机器人的水库大坝安全远程移动巡检技术研究, 旨在实现大坝远程移

动监视、重要缺陷的自动识别和重要监测设施测读等, 进而为大坝安全监控提供重要支撑。

## 2 大坝安全智能移动巡检关键技术

轨道机器人是巡检机器人的一种重要型式, 可铺设配套轨道进行自由移动, 利用搭载的摄像机进行多角度、多方位拍摄获取视频图像信息, 具有移动速度快、巡视范围大、适用环境广等特点, 目前主要应用于变电站巡检及煤炭、矿山巡检等<sup>[8]</sup>, 在水库大坝安全巡检方面尚未见应用案例。目前大部分水电站仍采用传统的人工“纸+笔”进行现场记录, 不仅效率低、容易错漏、工作量大, 且不易形成数字化的成果, 不利于充分发挥巡视检查在监视大坝运行安全中的作用。安装轨道机器人可显著减少现场巡视检查的人力投入, 特别是针对修建年代较早、未安装电梯、巡检范围广的高坝大库, 具有较强的实用性。此外, 当前轨道机器人相关的技术研发和应用方兴未艾, 在应用技术持续改进的同时, 使用成本已大幅降低, 具有较好的经济性。

### 2.1 基于轨道机器人的巡检技术

#### 2.1.1 轨道机器人的设计选型

智能轨道式巡检机器人主要由控制中心、电

收稿日期: 2022-06-02, 修回日期: 2022-07-06

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3090103)

作者简介: 李倩(1990-), 女, 工程师, 研究方向为水工结构、大坝安全监测与监控, E-mail: 582706402@qq.com

机驱动、轨道总成、升降机构等四大部分组成,通过挂载各类摄像机和拾音器实现音视频采集,通过本机器进行数字或模拟传输给监控中心后台,实现设备的在线控制功能。轨道机器人系统架构见图1。采集层主要为轨道机器人、轨道及供电系统,再通过通讯平台将采集到的巡检信息传输到服务器,包括采集存储服务器和图像处理服务器,并可通过局域网在客户端进行管理、控制、查看和设置等操作。

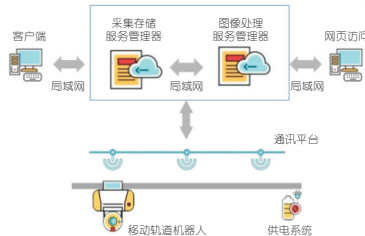


图1 轨道机器人系统架构图

Fig. 1 System architecture diagram of orbital robot installed

针对水电站大坝这一特殊应用场景,轨道机器人设计选型时首先要考虑供电、信号传输方式的选择,滑触供电式和充电式轨道机器人优缺点见表1,充电式轨道机器人相关设计参数见表2。

表1 滑触供电式和充电式轨道机器人优缺点分析对比

供电、信号传输方式	优点	缺点
滑触供电式	不受电量影响,可实现长距离、长时间的连续巡检	滑触点是暴露的金属构件,耐久性和长期在潮湿环境下的运行效果不佳
充电式	受制于锂电池的供电时间,长巡检距离只能达到300 m	防水等级通过特殊处理后,整套设备均可达到IP66级,更适用于水电站大坝坝顶、边坡、大坝廊道等环境

表2 轨道机器人设计参数

项目	要求
供电方式	蓄电池取电,
通讯方式	光纤(充电箱到控制室)、无线环网 AP(轨道机器人到充电箱)
防护等级	IP66
轨道形式	曲线、直线均可,吊杆安装。轨道结构设计如图1所示
避障功能	通过搭载雷达传感器实现移动方向上的避障功能,对于某些狭窄的环境,可采用雷达波定向消减技术对避障方向进行限制
搭载云台选型	机器人通过搭载接口对搭载云台进行供电和信号传输。搭载云台可实现水平360°,垂直±90°的旋转,并提供高清的图像和视频,防护等级IP66,自带补光灯,自带雨刷

2.1.2 巡检策略和信息存储、分析、展示策略

轨道机器人巡检作为一种智能巡检手段,可以实时提供现场音视频信息,并通过智能分析识别裂缝、渗水析钙缺陷,进行特定宽度计算(裂缝、结构缝等)及仪表读数。利用该套系统巡检时,可进行定期日常巡检,亦可与监测监控数据联动分析,通过数据和规则驱动特殊工况巡检。具体策略见图2。

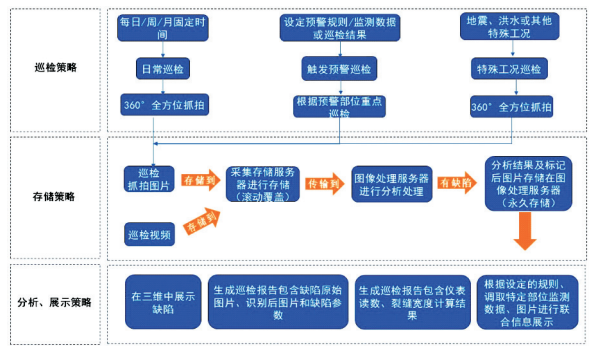


图2 巡检策略和信息存储、分析、展示策略图

Fig. 2 Patrol inspection strategy and information storage, analysis and display strategy diagram

全方位智能巡检需要通过轨道提供的实时位置定位、垂直升降杆的伸缩长短和云台的旋转角度、焦距值等参数组合计算结果,对整个巡检场景进行分割。巡检时,利用这些参数控制轨道机器人进行整个场景的全方位智能巡检。轨道机器人在巡检过程中可实现全程视频录像,针对整个巡检范围进行全方位抓拍并进行智能分析,并将结果进行联合展示。

2.2 基于图像识别技术的巡检成果解析

智能巡检成果最初为图像数据,解析的内容包括缺陷(本次研究主要针对裂缝和析钙渗水)识别、裂缝(或横缝)开合度计算、表盘自动读数。图像解析技术路线见图3。

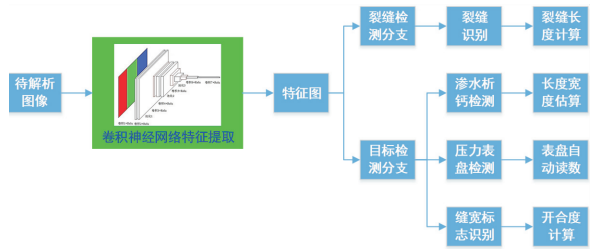


图3 巡检图像解析技术路线

Fig. 3 Patrol image analysis technology route

对于任意巡检得到的待解析图像,先通过卷积神经网络<sup>[9]</sup>进行图像特征提取以得到高维的特征图,本次研究构建了一个具有7个卷积层和3个池化层的轻量化模型。基于特征图,进一步开展裂缝识别和感兴趣的目标检测。

(1)裂缝识别分支。裂缝识别的具体方法是训练分类卷积神经网络,并通过网格覆盖法得到有裂缝分布的区域集(区域大小取为256×256像素)<sup>[10]</sup>。在此基础上,针对每个含裂缝的小区域通过数字图像分析方法进行裂缝提取以形成二值图,最终将多区域提取的裂缝进行融合以形成最终的裂缝并通过像素统计,结合凸透镜成像原理将像素长度换算为实际裂缝长度<sup>[11]</sup>。图4为裂缝识别示意图。

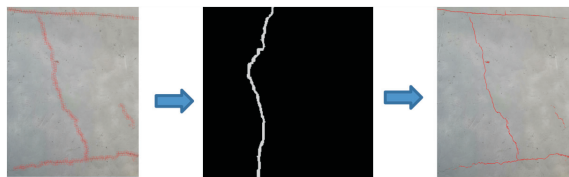


图 4 裂缝识别示意图

Fig. 4 Schematic diagram of crack identification

(2)目标检测分支。目标检测的具体方法是训练目标检测模型,即在图 1 轻量化卷积神经网络特征图后接 Fast R-CNN 目标检测分支<sup>[12]</sup>,实现图像中渗水析钙、压力表盘、缝宽标志等感兴趣目标的检测和 bounding-box 标注。①渗水析钙。得到 bounding-box 后可直接统计矩形标注框的长度、宽度,结合凸透镜成像原理直接换算得到区域的长度、宽度和面积。②压力表盘读数。先通过目标检测模型确定图像中是否存在表盘,若有则截取标注区域作为关注区域;通过 opencv-python 模块的霍夫圆变换和霍夫线变换算法检测表盘圆心和表盘指针所在区域;基于圆心和指针区域,通过直线拟合得到指针角度进而换算为表盘读数。③裂缝开合度计算。通过目标检测模型找到计算标志;通过像素分析得到两个计算标志的圆心点,继而计算两个圆心点之间的像素距离,通过凸透镜成像原理换算成实际长度;以第一次计算作为计算基点,即可得到每次拍摄时相对于第一次拍摄时裂缝的相对开合度变化情况。裂缝开合度计算示意图见图 5。



图 5 裂缝开合度计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of crack opening and closing calculation

### 3 工程应用

#### 3.1 工程背景

某水电工程挡水建筑物为混凝土双曲拱坝,最大坝高 210 m。该大坝地处偏远,廊道环境潮湿,空间狭小,结构复杂,水电站日常巡视检查工作量和难度均较大,且在极端工况下难以及时掌握廊道内运行情况。高程 940 m 廊道为拱坝基础廊道,廊道内的变形、渗流情况可直观反映拱坝坝基和坝体运行性态,其顶拱及上游边墙存在少量裂缝、渗水析钙等缺陷,廊道内设有测压管、量水堰等渗流监测设施。

#### 3.2 设备安装

在工程基础廊道顶拱布置一套智能轨道行走式挂载系统(轨道机器人),作为大坝安全智能巡检的感知设备。机器人轨道沿廊道顶拱轴线敷设,巡检范围对廊道断面进行了全覆盖,巡检重点为廊道顶拱和边墙的主要缺陷及重要监测设施。

#### 3.3 结果展示

利用该系统进行智能巡检,对现场发现的裂缝、渗水析钙缺陷进行标记和参数计算,同时将算出的缺陷大小、位置等参数标记在廊道整体模型上,可根据巡检结果,实时展示,见图 6。

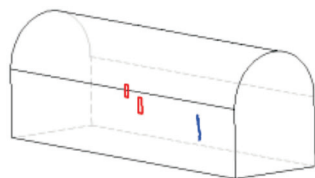


图 6 缺陷展示

Fig. 6 Defect display

对现场进行巡视检查时,对已有的裂缝进行宽度计算。计算结果同步录入自动生成的巡视检查报告,实现裂缝张开度的动态管理。对巡检范围内的仪表进行读数识别,识别结果亦可同步录入自动生成的巡视检查报告,实现仪表自动、远程读数。

### 4 结论

针对大坝运行安全智能移动巡检技术进行了有益的探索,基于轨道机器人实现了大坝安全远程、大范围巡检,在此基础上,基于图像识别技术实现了大坝典型缺陷的自动识别和重点监测设备测读,并结合某水库大坝进行了实际应用,取得了较好的应用效果,可为水库大坝的长期运行安全监控提供重要支撑。

#### 参考文献:

- [1] 王长生,马福恒,何心望,等. 基于物联网的燕山水库大坝智能巡检系统[J]. 水利水运工程学报, 2014(2):48-53.
- [2] 董永,周建波. 水电站大坝安全智能巡检系统研究与设计[J]. 大坝与安全, 2020(1):1-5.
- [3] 刘成栋,向衍,张士辰,等. 水库大坝安全智能巡检系统设计与实现[J]. 中国水利, 2018(20):39-41.
- [4] 李睿. 淮河流域视频监控平台技术应用[J]. 数字技术与应用, 2018,36(11):88-88,90.
- [5] 冉建英. 安全视频监控系统在无人值班变电站中的应用[J]. 机械装备, 2017(4):33-33.

