

一种城市轨道交通工务综合巡检机器人的设计及应用

李 军¹ 周 航¹ 陈昌邦¹ 唐玉平¹ 樊晓东² 高 涛³ 张宜霞³ 王丽菲³

(1. 南宁轨道交通运营有限公司, 530029, 南宁; 2. 宽衍(北京)科技发展有限公司, 100089, 北京;

3. 广西轨交智维科技有限公司, 530025, 南宁//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 我国城市轨道交通运营里程的快速增长给轨道交通工务巡检工作带来了压力,传统的人工巡检方式存在多种弊端,需要借助智能检测设备以提升工务巡检工作的效率与质量。目前用于城市轨道交通工务巡检的智能检测设备普遍存在部署灵活性低、病害实时检测与实时报警难以实现、病害管理体系缺乏等问题,很难应用于城市轨道交通的每日巡检工作中。智能巡检机器人基于模块化设计、自主动力、人员搭载、机器视觉、定位计算及先进的人工智能算法,实现城市轨道交通工务巡检相关病害的实时检测与实时报警,并使用病害数据库对已检测的病害进行数字化管理。该机器人应用于工务运维的每日巡检工作中,可大幅降低巡检人员的劳动强度;通过智能病害检测技术准确识别多类病害从而提升巡检效率,避免重大病害的形成;结合病害的定位计算将轨道交通工务运维工作中传统的人工巡检-纸质(或电子化)病害管理模式优化为机器人巡检-数字化病害管理的新模式,大幅降低工务运维成本。使用智能巡检机器人可为城市轨道交通运营降本增效,并助力智慧城市轨道交通的建设与发展。

关键词 城市轨道交通;工务运维;智能巡检;实时检测;病害管理

中图分类号 U216.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.042

Design and Application of Comprehensive Inspection Robot for Urban Rail Transit Track Work

LI Jun, ZHOU Hang, CHEN Changbang, TANG Yuping, FAN Xiaodong, GAO Tao, ZHANG Yixia, WANG Lifei

Abstract The rapidly increasing urban rail transit operation mileage has brought pressure to daily inspection of rail transit track work in China. Conventional labour inspection has various limitations and need to be aided by smart detection equipment to improve efficiency and quality. Currently, the smart inspection equipment in service are generally having shortcomings such as low rapid deployment capacity, limited real-time defect detection inspection and alarm, lack of defect manage-

ment system, which make the application in urban rail transit daily inspection work difficult. Smart inspection robot is based on modular design, self-propulsion, personnel carrier, machine vision, locating calculation and advanced artificial intelligence algorithms. Real-time detection and alarm of relevant defects in urban rail transit track work inspection is realized and digitalized management can be carried out on the detected defects using defect database. Applying the proposed robot in the daily inspection of track work operation-maintenance can greatly reduce inspection labour intensity; recognizing various defects accurately with smart defect detection technology can elevate inspection efficiency and prevent serious defects in advance; new mode of robot inspection-digitalized defect management can lower track work operation-maintenance cost drastically. Adopting smart inspection robot can lower cost and elevate efficiency for urban rail transit operation, assisting in promoting construction and development of smart urban rail transit.

Key words urban rail transit; track work operation-maintenance; smart inspection; real-time inspection; defect management

First-author's address Nanning Rail Transit Group Co., Ltd., Operation Branch, 530029, Nanning, China

0 引言

城市轨道交通运营的每日工务巡检工作具有天窗期作业时间短、地铁线路长、检测精度要求高、隧道内无供电装置等特点。人工巡检是目前较广泛应用的工务巡检方法,但鉴于当前人工巡检所需劳动力大、作业环境具有危害性以及检测结果不稳定等缺点,迫切需要研发智能巡检装备来优化轨道交通的每日工务巡检方法。

近年来,智能巡检装备在能源、电力、轨道交通等领域取得了长足发展,在安全性、准确性、作业条件等方面均表现出优于传统人工巡检的性能^[1]。应用于城市轨道交通工务的智能巡检装备可分为

巡检机器人和综合巡检车两大类。轻型巡检机器人使用轻型定制结构^[2]、小型电动平台机器人^[3]或轮式载具^[4]并集成单一或少量探测设备对病害进行智能检测,其缺乏如自主动力、人员搭载、数字化的病害管理等功能。综合巡检车依靠电客车或电力机车结合多节车厢的设计实现充裕空间以及强大供电能力,同时集成多种探测设备,对铁路或城市轨道交通领域多个专业的多类病害进行综合智能检测^[5],并依靠数据中心对检测结果的处理实现了巡检机器人所缺乏的数字化病害管理,但庞大的车体导致其难以应用于天窗期内的巡检工作,例如在发现扣件系统病害后巡检人员难以爬入列车底部进行病害的现场处置。

鉴于此,本文设计了一种智能工务综合巡检机器人系统,该系统实现了人员搭载、综合病害检测和数字化病害管理等多种功能的结合,为巡检人员带来高效的病害检测及管理,并减少了巡检人员的劳动强度;另外,系统的灵活部署设计和实时报警功能也为巡检人员提供了便捷的现场病害处置方式。

1 综合巡检机器人系统架构

城市轨道交通工务综合巡检机器人(以下简称“该机器人”)系统架构设计如图1所示。该机器人由主服务端、多个检测模块和多个辅助模块构成,各检测模块与主服务端、同步定位模块分别进行独立的模块化数据交互,可根据实际工务巡检需求对检测模块进行功能调整和数量增减。主服务端由多个基于边缘计算的工控机构成,各工控机对该机器人进行整体控制,为工务巡检工作提供智能病害识别、病害分割提取、实时报警、病害数据库等功能;检测模块使用相机或其他设备(根据检测任务需求而定)进行隧道内的数据采集,再将采集到的数据交由主服务端进行病害识别;辅助模块在主服务端的控制下为该机器人提供里程计算、同步控制、行进动力、电力供应以及图形界面交互等功能。

该机器人具有整体装配、硬件集成和软件编程等功能的模块化设计。首先,整体装配的模块化设计确保了该机器人的整备质量低于240 kg,拆卸后的各部件质量均低于45 kg,可存储于地铁站内仓库中,避免了因载具体积庞大影响病害现场处置工作的开展,从而实现灵活部署的特点。其次,硬件集

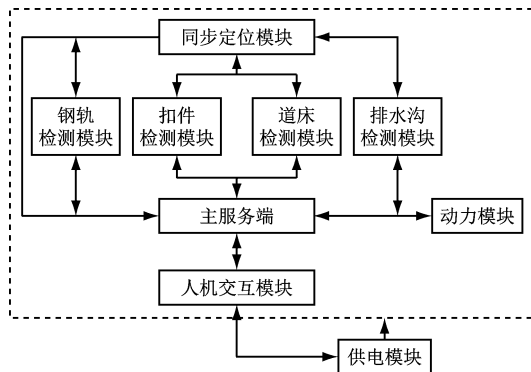


图1 综合巡检机器人系统架构

Fig. 1 Architecture of comprehensive inspection robot system

成的模块化设计确保了产品的长寿命周期、多寿命周期,允许客户根据实际使用情况调整硬件配置以适应不同的使用环境,实现产品及服务的商业模式。最后,软件编程的模块化设计将多个可单独替换的功能模块相结合,确保了各功能模块的可维护性并适应不同的硬件集成方案,例如对算法的持续更新以满足用户的多种需求。

2 病害检测处理

该机器人系统病害检测处理流程包括病害检测、实时报警及数字化管理,其流程图如图2所示。首先,该机器人的同步定位模块对各设备进行同步控制以确保设备输出的各类数据均处于同一时间轴,并使用多重定位手段计算机器人的行驶里程;其次,位于主服务端的实时报警功能除了发送激光报警信号,还通过人机交互界面向操作人员展示检测到的病害图片信息和方位信息,由于安全规章的限制,城市轨道交通隧道内不能放置实物标记或喷涂标记,因此该机器人采用激光器向地面投射光斑的形式指示病害的里程位置,结合病害图片和环向信息为操作人员提供引导,对病害进行检查和处置,该引导模式仅需单个运动机构对激光器进行俯仰动作的控制,简化了设备校准步骤并提升了病害检测可靠性;最后,病害数据库则存储多项关于病害的信息,通过增、删、查询等功能为巡检工作提供高效的数据管理服务。

2.1 定位方法

因城市轨道交通隧道内无法接收到卫星定位信号,该机器人使用编码器、双目视觉和百米标进行复合式定位计算,为病害实时报警与数字化病害管理提供里程信息。编码器可达到10 bits以上的

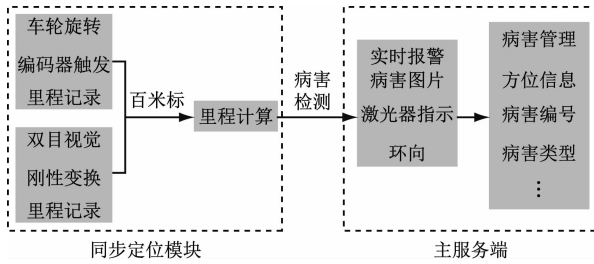


图2 病害检测处理流程图

Fig. 2 Flow chart of defect detection and disposal process

高精度触发从而精确记录里程信息;机器人的车轮旋转可为触发器提供持续的触发信号,但在机器人加减速时容易产生误差,例如车轮打滑编码器无法准确记录机器人的实际行驶距离;依靠双目视觉进行二次校准可实现稳定的定位计算,双目视觉可将拍摄图像的像素坐标转化为现实世界的空间坐标,但要计算相邻两帧图像在现实世界移动的距离则需要计算两帧图中的特征点并计算已匹配特征点之间的刚性变换。

在对比多种特征表述器后,该机器人选用AKAZE(加速KAZE算法)算法实现快速的特征计算与匹配^[6]。设 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 和 $S' = \{s'_1, s'_2, \dots, s'_n\}$ 分别代表 n 对已匹配的 AKAZE 特征点集合,根据刚性变换公式可计算变换误差 r_i 。

$$r_i = s_i - (R s'_i + t), \quad i \in n \quad (1)$$

式中:

R ——旋转矩阵;

t ——变换向量。

全局最小 R, t 的目标方程为:

$$\min_{R, t} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \|(s_i - (R s'_i + t))\|^2 \quad (2)$$

由式(2)可得出相邻两帧图像中移动的像素数量,根据相机的像素当量可进一步计算出机器人的实际移动距离。然而 R, t 的最小化存在高度非线性化和整数规划问题,所以根据 ICP(迭代最近点)算法的多次迭代思路对高度重复的特征进行计算可快速获得最小化的 R, t ^[7]。针对该机器人的应用场景,城市轨道交通中轨枕是特征重复度最高的元素,故使用轨枕区域的图像进行机器人里程定位计算。在得到机器人实际移动距离后,根据城市轨道交通隧道内的百米标可将该移动距离转化为隧道内的实际里程数值。

2.2 激光指示与病害记录

根据不同客户的检测需求,设该机器人集成了

若干部相机 $X = \{(x_1, \theta_1), (x_2, \theta_2), \dots, (x_j, \theta_j)\}$ 用于检测若干种类型的病害 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ 。各相机具有其光轴(即视场中心线) θ_j 。将各个已发现的病害 b 归类为 $B = \{b_{1f_m}, b_{2f_m}, \dots, b_s\}$ 。在同步定位模块的控制下对实时拍摄的图像 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ 记录其里程信息 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_j\}$ 。该机器人标定后的定位精度为 2 mm,其像素当量为 0.5 mm,并具有 5 120 像素 \times 5 120 像素的分辨率,则第 k 帧图像 p_k 可包含若干 l_j ,定义集合 L_{p_k} 为第 k 帧图像 p_k 提供定位信息,则:

$$L_{p_k} = \{l_j | (p_k, l_j)\} \quad (3)$$

若在相机 (x_j, θ_j) 所拍摄的第 k 帧图像 p_k 中发现了病害 b_s ,则可定义操作符 $o_\theta((x_j, \theta_j))$ 返回对应的相机光轴 θ_j 以便向机器人操作人员指示病害 b_s 在隧道内的环向方向。在获得病害的环向方向后可根据式(3)确定病害 b_s 在隧道内的里程 $l_{b_s} = \|L_{p_k}\|_\infty$ 和机器人完成制动的里程 $l_r = \|L_{p_r}\|_\infty$,得到激光指示器的俯仰角 α :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{l_d}{H}\right) \quad (4)$$

$$l_d = |l_r - l_{b_s}| \quad (5)$$

式中:

α ——激光器与地面的夹角;

H ——激光器的安装高度;

l_d ——病害与机器人之间的距离。

由此可得到病害 b_s 的方位信息 a :

$$a = (o_\theta(x_j, \theta_j), l_{b_s}) \quad (6)$$

将各病害的方位信息汇集得到 $A = \{a\}$,从而可对全部病害信息以 $\{A, B\}$ 的形式进行记录,实现包含相机序号、环向方向、病害里程、病害序号、病害类型等多类信息的数字化病害管理。

3 应用分析

为满足某城市轨道交通公司每日工务运维的智能巡检需求,该机器人集成了扣件、钢轨、道床和排水沟检测模块为城市轨道交通线路状态实现智能病害检测,该机器人的定制化装配图如图3所示。在某城市地铁2号线的试车线(长18 km)和正线(长30 km)选取了总长48 km的路段,使用人工制造的405处多类型病害模拟实际地铁隧道病害检测环境,对该机器人进行了检测测试。例如使用纸片模拟道床异物病害(机器人检测该病害结果如图4

a)所示),或移除螺栓模拟扣件系统病害(机器人检测该病害结果如图4 b)所示)。该机器人在地铁公司的支持下进行了机器人巡检与人工巡检对比分析,证明了工务智慧运维的必要性。



图3 综合巡检机器人的定制化装配

Fig.3 Customized assembly of comprehensive inspection robot



a) 道床异物病害 b) 扣件系统病害

图4 综合巡检机器人识别人工制造的病害

Fig.4 Comprehensive inspection robot detecting man-made defects

3.1 测试结果分析

该机器人在48 km全线路上共进行了11次测试,表现出了良好的病害检测与行驶性能,测试结果如表1所示。首先,在病害检测性能测试中,该机器人所使用的开发版算法存在0.49%漏检率,在对病害检测算法更新后该问题得到解决,但精度为2 mm的病害重复定位失败1次,经排查发现其原因是检测模块所使用的相机校准不到位,在重新进行设备标定与自检后成功实现病害重复定位。其次,该机器人在各次测试中依靠自主动力展现了良好的行驶性能,可达到20 km/h的实时检测速度。受限于城市轨道交通安全规章制度,该机器人在城市轨道交通隧道内的最大实时检测速度限制在15 km/h,但仍优于传统人工巡检的1 km/h平均检测速度;该机器人可在10 m内完成制动,确保了激光目标指示在隧道转弯处依旧可用,并减少巡检人员往返于病害处和巡检机器人处的劳动量;在15 km/

h的实时检测速度下该机器人的续航里程达到160 km,续航时间大于6 h,并具有60‰的最大爬坡度,可在3 h内完成该地铁2号线上行或下行的智能病害检测,满足地铁公司每日天窗期内的巡检需求。最后,为实现现场处置病害,该机器人能提供最多4 的人员搭载功能,并依靠自主动力不占用行车点,避免给地铁公司的每日运营造成额外负担。

表1 综合巡检机器人测试结果

Tab.1 Test results of comprehensive inspection robot				
项目	总量	原始算法	更新算法	备注
病害采集样本/次	11	11	11	采集样本数据
病害实时检测/个	405	403	405	每次5~7个来回
病害实时报警/次	405	405	405	每次5~7个来回
图像数据采集/次	66	66	66	每次5~7个来回
病害重复定位/次	60	59	60	每次5~7个来回

3.2 机器人巡检优势分析

以某条地铁线路为例,该线路上下行线共计长约60 km,该机器人相较于传统人工巡检的优势主要体现在以下3个方面。

1) 成本压缩。如表2所示,每条线路配备2台巡检机器人,其中巡检机器人可以覆盖线路、结构、供电、通号等专业在轨行区80%以上的巡检工作,可节省成本约177万元/年。

表2 机器人巡检与人工巡检的成本对比

Tab.2 Comparison of robot and labour inspection costs			
项目	工时/h	人数/名	年开销/万元
人工巡检	37 520	20	280(人员)
机器人巡检	3 072	2	28(人员), 60(机器人), 15(检修)
节省占比/%	92	90	63

注:① 平均每人每年1 952 工时;② 一级至五级检修工的年平均工资约为每人每年14 万元。

2) 病害检测鲁棒性。依靠人工智能算法实现了对各类病害的稳定识别,尤其是在光照条件有限的隧道环境中识别依靠肉眼难以发现的病害,例如准确识别小规模钢轨病害或颜色相似的扣件系统病害,如图5所示。

3) 工务运维模式的改变。该机器人的数字化病害管理系统为工务人员提供了高效的病害查询、比对、记录等服务,能分析病害成因并长期跟踪病害发展,判断是否存在对病害处置不当的情况(例如维修不足或过度维修等),从而实现对病害发展

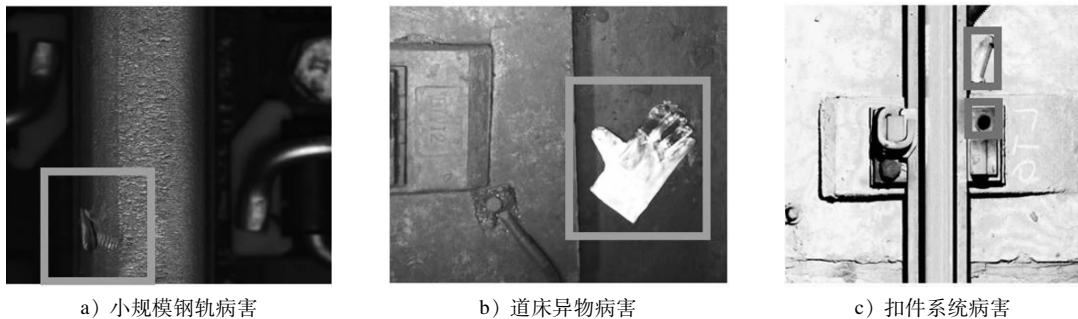


图5 综合巡检机器人病害检测结果

Fig. 5 Defect detection results of comprehensive inspection robot

的预测计算,使用体验优于传统纸质-电子化病害管理系统。因此,智能化检测装备的应用和工务智慧运维体系的建立可大幅提升城市轨道交通工务设施检修维护的质量和效率,达到降本增效的目的。

4 结语

本文介绍了一种应用于城市轨道交通工务每日巡检的智能综合巡检机器人。使用编码器、百米标、机器视觉和激光指示实现了病害实时报警与数字化管理。随着巡检工作对病害数据的积累与分析,工务巡检所需人次预计将由全年 1 600 人次降低至 800 人次;依靠数字化病害管理系统实现城市轨道交通基础设施全生命周期的智能化病害管理,将工务运维由传统“有病医病”的被动模式进化为“预测性”维修的主动模式,助力智慧工务运维体系和数字化城市的建设。在智能综合巡检机器人逐步投入使用的过程中,将通过积累历次巡检数据和增广人工样本两种途径实现样本多样性,确保病害识别的鲁棒性。此外,该机器人目前未集成衬砌层检测模块,后续可依靠模块化设计集成隧道衬砌机器视觉、断面激光扫描、空气耦合雷达等检测技术,进一步完善该机器人的智能综合巡检设计,实现工务巡检内容的全覆盖。

参考文献

[1] 维科网. 2022 中国智能巡检机器人行业发展研究白皮书[EB/

OL]. (2022-06-15) [2022-08-20]. www.ofweek.com.

Ofweek. White paper on the development of China's intelligent inspection robot industry 2022 [EB/OL]. (2022-06-15) [2022-08-20]. www.ofweek.com.

[2] HUANG H, LI Q, ZHANG D. Deep learning based image recognition for crack and leakage defects of metro shield tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 77 (3): 166.

[3] WU Y, QIN Y, QIAN Y, et al. Hybrid deep learning architecture for rail surface segmentation and surface defect detection [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37 (2): 227.

[4] GIBERT X, PATEL V, CHELLAPPA R. Robust fastener detection for autonomous visual railway track inspection [J]. IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, 2015, 98 (2): 694.

[5] 田新宇,魏世斌,赵延峰,等. 城市轨道交通基础设施综合检测列车创新技术[J]. 现代城市轨道交通,2019(8):32.

TIAN Xinyu, WEI Shibin, ZHAO Yanfeng, et al. Innovative technology of comprehensive inspection train for urban rail transit infrastructure [J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(8):32.

[6] TAREEN S, SALEEM Z. A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK [J]. International Conference on Computing, Mathematics, and Engineering Technologies, 2018, 3:1.

[7] ZHANG Z. Iterative point matching for registration for free-form curves and surface [J]. International Journal of Computer Vision, 1994,10(13):129.

(收稿日期:2022-09-30)

(上接第 219 页)

[9] ZHU S, WANG J, CAI C, et al. Development of a vibration attenuation track at low frequencies for urban rail transit [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32 (9): 713.

[10] 郭春华. 地铁运营线路既有弹性短轨枕扣件地段更换 Vanguard (先锋) 扣件施工工艺 [J]. 科技传播, 2013, 5

(4): 135.

GUO Chunhua. Construction technology of replacing vanguard fasteners in existing elastic short sleeper fasteners section of subway operation line [J]. Public Communication of Science & Technology, 2013, 5(4): 135.

(收稿日期:2022-12-12)