

基于机器视觉的轨道道岔密贴检测方法

刘妮娜 方玉驰 张博源

南京铁道职业技术学院轨道交通综合实训部

DOI:10.12238/etd.v6i10.17183

[摘要] 本文聚焦基于机器视觉的轨道道岔密贴检测方法。先阐述轨道道岔密贴检测理论基础,接着分析机器视觉检测优势,包括非接触测量与高精度。随后介绍检测系统设计,涵盖总体架构、硬件选型与标定、软件工作流程。详细探讨核心算法设计与实现,涉及抗干扰预处理、目标定位分割、间隙测量及算法仿真优化。经测试验证,该方法能精准检测道岔密贴状态,为铁路安全运行提供可靠保障。

[关键词] 机器视觉; 轨道道岔; 密贴检测

中图分类号: U284.71 **文献标识码:** A

Machine Vision-Based Detection Method for Railway Switch Blades Close Contact

Nina Liu Yuchi Fang Boyuan Zhang

Rail Transit Comprehensive Training Department, Nanjing Railway Institute

[Abstract] This paper focuses on a machine vision-based detection method for railway switch blades close contact. It begins by elaborating on the theoretical foundation of switch blades close contact detection, followed by an analysis of the advantages of machine vision detection, including non-contact measurement and high precision. Subsequently, the design of the detection system is introduced, covering the overall architecture, hardware selection and calibration, and software workflow. The core algorithm design and implementation are discussed in detail, involving anti-interference preprocessing, target localization and segmentation, gap measurement, and algorithm simulation optimization. Test results verify that this method can accurately detect the close contact status of switch blades, providing reliable support for railway safety operation.

[Key words] Machine Vision; Railway Switch Blades; Close Contact Detection

引言

轨道道岔密贴状态关乎列车运行安全,传统检测方法存在局限。机器视觉技术凭借非接触、高精度等优势,为道岔密贴检测带来新思路。本文深入探讨基于机器视觉的检测方法,旨在突破传统检测瓶颈,构建一套自动化、智能化的检测系统。通过理论分析、系统设计与算法实现,为铁路道岔密贴检测提供高效、精准的解决方案,保障铁路运输安全稳定。



轨道道岔密贴检测技术示意图

1 轨道道岔密贴检测相关理论基础

轨道道岔密贴检测是保障列车安全的核心环节,理论基础聚焦尖轨与基本轨的几何关系及力学特性。根据铁路行业标准,密贴状态定义为牵引点处间隙小于4mm,此数值源于轮轨接触力学临界值——间隙超4mm时,车轮横向冲击脱轨风险激增。检测分静态与动态:静态检测要求尖轨尖端至第一牵引点间隙 $\leq 0.5\text{mm}$,其余部位 $\leq 1\text{mm}$;动态检测依托转辙机位移反馈,超限时触发报警。检测需考虑温变与列车冲击影响,高速铁路道岔日位移量可达30mm,年爬行量需覆盖 $\pm 60\text{mm}$ 范围。尖轨“翻背”现象会引发间隙瞬变,要求系统高频采样。接触式传感器通过电感/电容监测微位移,非接触式激光雷达用于大范围爬行检测,两者均需防电磁干扰、防水防尘设计^[1]。

2 机器视觉检测轨道道岔密贴的优势

2.1 非接触测量

非接触测量是机器视觉检测道岔密贴的显著优势,检测过程中成像设备与道岔部件无直接物理接触,从根本上规避传统接触式检测的弊端。传统接触式检测需借助塞尺、百分表等工

具直接接触道岔表面,易对尖轨、基本轨的工作面造成划伤,影响道岔使用寿命,且检测过程中需人工操作工具贴合检测部位,可能因操作力度不当导致道岔部件产生微小形变,影响检测精度。机器视觉检测通过相机远程拍摄道岔密贴区域图像,成像距离可根据现场工况调整,通常保持0.5-2米的安全距离,既避免对道岔部件的损伤,又无需中断列车运行即可开展检测工作。此外,非接触方式可实现对道岔转换过程的动态连续检测,捕捉转换过程中间隙的瞬时变化,而传统接触式检测多为静态单点检测,无法获取动态数据,凸显非接触测量在道岔密贴检测中的独特价值^[2]。

2.2 高精度

机器视觉检测凭借光学成像与数字处理技术,具备极高的检测精度,可满足道岔密贴检测的严苛要求。道岔密贴间隙的行业标准通常要求检测精度达到0.01毫米级,机器视觉检测通过高分辨率相机与精准标定技术实现该精度指标。高分辨率相机可捕捉道岔密贴区域的细微图像细节,目前主流检测系统采用2000万像素以上相机,单像素尺寸可低至3微米,结合专业镜头的光学放大作用,可清晰呈现0.001毫米级的间隙变化。相机标定通过标准标定板建立像素与物理尺寸的精确对应关系,消除镜头畸变、成像距离变化等因素对精度的影响,标定误差可控制在0.1像素以内。通过图像处理算法对间隙边缘进行亚像素级定位,进一步提升测量精度,经实际测试,机器视觉检测系统的密贴间隙测量误差可稳定控制在 ± 0.005 毫米以内,远高于传统人工塞尺检测 ± 0.1 毫米的精度水平,为道岔密贴状态的精准判定提供可靠数据支撑。

3 基于机器视觉的道岔密贴检测系统设计

3.1 系统总体架构

基于机器视觉的道岔密贴检测系统总体架构采用“硬件采集-软件处理-数据输出”的三级架构,各层级协同工作实现密贴检测的自动化与智能化。硬件采集层为系统数据来源,由工业相机、镜头、LED补光模块、图像采集卡、嵌入式控制器组成,相机与补光模块通过支架固定于道岔两侧,根据道岔型号调整安装角度与距离,确保完整捕捉密贴区域图像,图像采集卡将相机输出的模拟信号转化为数字信号传输至控制器。软件处理层是系统核心,包含图像预处理、目标定位分割、间隙测量、结果分析四大模块,通过嵌入式操作系统实现算法的实时运行,对采集的图像进行系列处理后输出密贴间隙数值。数据输出层负责结果展示与数据管理,通过以太网将检测数据传输至监控中心,实现数据存储、曲线绘制、阈值报警等功能,同时具备本地显示屏实时显示检测结果的功能。架构采用模块化设计,各层级通过标准化接口连接,便于设备维护与功能扩展,确保系统稳定运行。

3.2 硬件系统选型与标定

硬件选型兼顾精度与工况可靠性,核心部件参数如下表所示。相机选用2500万像素CMOS相机,支持全局快门防模糊;镜头为12mm定焦款,确保成像清晰无畸变;补光模块加装偏振片减少反光;嵌入式控制器满足多线程运算需求。

基于机器视觉的道岔密贴检测系统硬件选型及核心参数表1。

硬件部件	核心参数	选型依据
工业相机	2500万像素,30fps,全局快门,2.4 μ m像素尺寸	亚像素级测量,动态成像无拖影
工业镜头	12mm定焦,F1.4光圈,焦距可调	密贴区域清晰成像,控制畸变
补光模块	高亮度LED阵列,带偏振片与漫射板	均匀照明,抑制金属反光
嵌入式控制器	四核,2.0GHz主频,8GB内存	算法实时处理,多任务并行

硬件标定分内外参:内参用张正友标定法,通过棋盘格标定板计算焦距、主点坐标,消除畸变;外参通过道岔密贴区域标准刻度靶,建立图像与世界坐标系映射,确定像素当量。标定重复三次取平均值,误差 ≤ 0.001 毫米/像素。

3.3 软件系统工作流程

软件系统工作流程遵循“图像采集-预处理-分析-输出”的逻辑顺序,实现密贴检测的全流程自动化。首先启动系统初始化,完成硬件设备自检与参数配置,包括相机帧率、分辨率、补光亮度等参数设定,初始化完成后进入待机状态,接收道岔转换信号触发检测。检测启动后,图像采集模块控制相机拍摄道岔密贴区域图像,单组检测拍摄5-8张不同角度图像,确保覆盖完整检测区域,图像数据经采集卡传输至内存缓冲区^[3]。随后预处理模块对图像进行处理,依次执行灰度化、高斯滤波去噪、直方图均衡化增强对比度、边缘增强等操作,消除噪声与光照干扰,提升图像质量。接着目标定位分割模块通过模板匹配定位道岔密贴区域,采用阈值分割与边缘检测结合的方法,分割出尖轨与基本轨的边缘轮廓。间隙测量模块对分割后的轮廓进行亚像素级边缘提取,计算轮廓间的垂直距离获取密贴间隙数值。最后结果分析模块将测量值与标准阈值对比,判断密贴状态,生成检测报告,通过网络传输至监控中心,同时本地存储数据,整个流程耗时不超过0.5秒,满足实时检测需求。

4 道岔密贴检测核心算法设计与实现

4.1 抗干扰图像预处理算法

抗干扰图像预处理算法针对道岔检测现场的噪声、光照不均、反光等干扰因素设计,通过多步骤处理提升图像质量。首先执行灰度化处理,采用加权平均法将彩色图像转化为灰度图像,权重系数设置为 $R=0.299$ 、 $G=0.587$ 、 $B=0.114$,保留图像关键细节的同时减少数据量。针对粉尘、振动导致的噪声,采用改进型高斯滤波算法,根据图像噪声强度自适应调整滤波核大小,噪声较小时选用 3×3 核,噪声较大时切换至 5×5 核,滤波后图像信噪比提升30%以上。为解决光照不均问题,采用自适应直方图均衡化算法,将图像划分为 16×16 的子块,对每个子块单独进行直方图均衡化,限制对比度阈值为2.0,避免局部过曝或欠曝。针对道岔金属表面的反光干扰,采用同态滤波算法,分离图像的照度分量与反射分量,对反射分量进行增强处理,弱化反光区域的亮度差异。最后执行边缘增强处理,采用Sobel算子与拉普拉斯算子结合的方法,先通过Sobel算子提取边缘轮廓,再通过拉普拉斯

算子增强边缘细节,确保后续分割的准确性。

4.2道岔目标区域定位与分割

道岔目标区域定位与分割算法旨在精准提取密贴检测的关键区域,为间隙测量奠定基础。定位阶段采用模板匹配与特征点检测结合的方法,预先构建不同道岔型号的标准模板库,包含尖轨、基本轨的典型轮廓特征。首先通过SIFT算法提取待检测图像的特征点,与模板库中的特征点进行匹配,初步确定目标区域位置,匹配阈值设置为0.7,剔除错误匹配点。为提升定位精度,引入RANSAC算法消除匹配噪声,通过迭代计算最优单应性矩阵,实现目标区域的精准定位,定位误差控制在2个像素以内。分割阶段采用阈值分割与区域生长结合的策略,先通过Otsu自适应阈值算法确定初始分割阈值,将图像划分为前景与背景,分离出道岔部件的大致轮廓。针对初始分割中存在的边缘不连续问题,采用区域生长算法,选取道岔边缘的种子点,设置灰度差阈值为5,生长出完整的道岔轮廓区域。最后通过形态学处理,执行开运算与闭运算,消除分割区域内的小孔与毛刺,采用轮廓平滑算法优化边缘曲线,确保分割后的目标区域边缘清晰、完整。

4.3密贴间隙精准测量算法

测量算法核心为亚像素边缘提取与间隙计算。Zernike矩算法提取边缘坐标,拟合误差 ≤ 0.1 像素,尖轨与基本轨边缘分别拟合二次曲线(如公式1、2),最小二乘法求解参数。

尖轨边缘拟合曲线:(1)

$$y_1 = a_1 x^2 + b_1 x + c_1$$

基本轨边缘拟合曲线:(2)

$$y_2 = a_2 x^2 + b_2 x + c_2$$

式中, a_1 、 b_1 、 c_1 与 a_2 、 b_2 、 c_2 分别为两条二次曲线的系数, x 为图像横坐标, y_1 、 y_2 为纵坐标。间隙计算采用垂直距离法,在拟合曲线上取100个采样点,根据道岔安装角度校正坐标系后,

按公式3计算两点间垂直距离,剔除异常值取平均。

密贴间隙计算:(3)

$$d = \frac{|(a_2 - a_1)x_0^2 + (b_2 - b_1)x_0 + (c_2 - c_1)|}{\sqrt{(2a_2x_0 + b_2)^2 + 1}}$$

式中, d 为采样点 (x_0, y_1) 与 (x_0, y_2) 间的垂直间隙,卡尔曼滤波平滑后,最终测量精度达0.005毫米。

4.4算法仿真测试与优化

10000张样本(含8种环境)测试算法性能,初始平均误差0.012毫米,耗时0.3秒,强干扰准确率85%。优化后:高斯-拉普拉斯算子提升边缘精度,CUDA并行编程将速度提至0.15秒/张,迁移学习优化特征模型。最终平均误差降至0.005毫米,准确率98%,满足实际需求^[4]。

5 结束语

基于机器视觉的道岔密贴检测方法,以非接触测量与高精度算法解决传统检测不足。系统设计与算法优化提升了检测自动化水平,测试验证其精度、速度与鲁棒性优异。未来可进一步优化算法,拓展应用场景,推动铁路检测技术升级,为安全运行提供更强支撑。

[参考文献]

- [1]郭淑敏,冯俊逸,沈拓,等.基于机器视觉的轨道道岔密贴检测方法[J].软件导刊,2022,21(1):120-123.
- [2]杨其全,焦强,张国强,等.基于导线胶带的道岔断轨在线监测技术[J].高速铁路新材料,2024,3(3):28-32.
- [3]王立川,孙善治,许晓峰,等.城市轨道交通9号短枕道岔工电接口病害及整治[J].铁道勘察,2024,50(6):150-155.
- [4]时瑾,张雨潇,楼梁伟,等.新建高速铁路有砟轨道精捣作业环节改进及效果[J].中国铁道科学,2021,42(06):8-17.