

铁轨扣件检修机器人设计及其关键技术分析

陶锦龙 郑溢涵 任悦 周智超 吴晨杰

石家庄铁道大学安全工程与应急管理学院

DOI: 10.12238/ems.v6i10.9360

[摘要] 本文以铁轨检修工作为研究对象,分析了铁轨扣件检修工作的现状,提出可结合人工智能、大数据、区块链等信息技术,开发铁轨扣件检修机器人,降低检修人员劳动强度,提高维修工作质量与精度。笔者从设计思路、功能模块、关键技术三方面分析了铁轨扣件检修机器人的设计方法。详细介绍了机器人检修铁锅扣件的工作流程;电动扳手模块、滑台与机械臂模块、物料运输模块的设计方法;三维视觉定位技术智能识别技术的逻辑算法。旨在为铁路检修工作者提供数字力量,建设智慧城市。

[关键词] 铁轨扣件检修; 机器人设计; 扣件拆装; 智能化; 三维视觉

Design of rail fastener maintenance robot and its key technology analysis

Tao Jinlong, Zheng Yihan Ren Yue Zhou Zhichao, Wu Chenjie

School of Safety Engineering and Emergency Management, Shijiazhuang Tiedao University

[Abstract] This paper takes the maintenance work of rail as the research object, analyzes the current situation of the maintenance work of rail fastener, puts forward the combination of artificial intelligence, big data, block chain and other information technology, develop the maintenance robot of rail fastener, reduce the labor intensity of maintenance personnel, improve the quality and precision of maintenance work. The author analyzes the design method of railway fastener maintenance robot from three aspects of design thinking, functional module and key technology. This paper introduces the design method of the electric wrench module, the sliding platform and the material transport module, and the logic algorithm of the intelligent identification technology of 3D visual positioning technology. It aims to provide digital power for railway maintenance workers and build a smart city.

[Keywords] rail fastener maintenance; robot design; fastener disassembly; intelligent; 3D vision

前言:

铁轨扣件是铁路系统中十分重要的组成元件之一,负责铁轨与轨枕的固定与连接,具有保持轨距、阻止铁轨横向纵向移动、避免轨道变形损坏、减振缓冲的作用。铁轨扣件的松紧度直接影响乘客的乘坐舒适度,发挥着保证铁路安全运行的关键职能。传统铁轨检修工作大多采取二维图像法,依赖检修人员的工作熟练度,存在精度低、效率低的问题。为提高作业精度,避免脱轨事故,减轻作业人员压力,紧跟时代脚步,优化创新现有检修技术,十分有必要。

1 铁轨扣件检修工作现状

随着科技的提高,国力的增强,我国铁路建设领域发展迅猛,新建铁路里程数量逐年递增。截至2023年,投入使用的新铁轨扣件已高达7700w套。高基数带来高维护次数,我国每年维修工作中更换下来的铁轨扣件大约在3.5亿套。螺栓松动、螺栓过紧、扣件丢失、扣件损坏已经成为常见问题。视觉检测法是最常用的传统检修方法之一,主要由检修人员使用螺栓扳手、塞尺等工具敲击铁轨,根据铁轨发出的声音,判断扣件是否发生故障。该方法依赖肉眼,精度不高。再加上检修时间大多放在夜间,使工作效率与检测精度进一步降低。为提高维修工作质量与效率,业内人士相继开发出推巡检小车法、三点检测法、超声波法、漏磁法、电涡流法等

检修技术。然而,这些技术各有优缺点,或操作复杂,或效率不高,或检测准确率受人为因素影响。信息化时代,人工智能、大数据、区块链等技术不断更迭,计算机的算力得到大幅度提升,各行各业都逐渐向智慧化、自动化转型。机器人与人类并肩工作已经并不罕见。铁轨扣件检修机器人逐渐成为业内发展的新方向。该类机器人以人工智能技术中的深度学习算法为核心,拥有自主导航、智能识别等功能,能代替人类完成拧紧螺栓,涂抹防护油等检修工作,降低检修工作强度。同时机器人所具备的数据分析功能还能为检修人员提供溯源分析,预测扣件剩余使用寿命,降低安全事故发生概率^[1]。

2 铁轨扣件检修机器人设计方案

2.1 铁轨扣件检修机器人设计思路

铁轨扣件检修机器人的主要工作内容为负责检测扣件的安全状态、更换安装扣件、螺栓拧紧与拧松、铁轨磨损维修、检查道床异物、紧急情况处理等。需要具有高精度、高质量、高速度、高稳定性、高可靠性。设计时应以智能化原则为主,不断提高机器人的实用性。同时加入人性化原则,结合人体工程学,给予使用者最舒适的使用感。从硬件角度来看(如图1),机器人需要具有本体结构、双爪机械臂与电动扳手。本体结构包括负责机器人移动的移动底盘,以及存储不同型号

主要用于放置不同种类的物料，以免取料时出现混乱。每个空间内部都包含一组输送滑轨。滑轨的作用是确保铁轨扣件检修时使用的物料能准确运送到指定地点，以供机械爪手拾取。为确保每次取出物料后内部空间仍然整齐有序，降低机器人运动期间产生颠簸造成物料混乱，设定卡扣凹槽与隔板，提高物料的固定效果。

2.4 铁轨扣件检修机器人关键技术

2.4.1 三维视觉定位技术

三维视觉定位技术是将相机与计算机技术相结合后形成的分析技术。该技术基于摄影测量学，通过提取图片或视频中的关键特征点，完成三维坐标的获取。首先，使用相机或传感器，将现实中的场景转换为可被计算机读取的图片或视频信息。其次，分析图像或视频中的关键特征点，如边缘、角点、颜色，完成姿态计算。在检索特征点检索时，可选择的算法种类很多，包括 Harris 算法、SIFT 算法、SURF 算法、ORB 算法等。笔者在本文中仅介绍立体匹配算法建立三维视觉模型的方法。

该算法的实施步骤为先进行粗匹配，再进行精匹配，最后建立三维视觉模型完成视觉定位。粗匹配方法如下：确定某张图片 A 作为鉴定区间。将图像 A 的特征点中心设为 $p'(o', u')$ 。围绕图像标准矩形区域中心点，开展像素搜索，获取特征点的矩形区域，完成目标识别。计算图像特征点中

$$\text{心的公式如下: } \begin{cases} o' = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 o_i \\ u' = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 u_i \end{cases} \text{。公式中的 } O_i \text{ 代表矩形区域}$$

o 轴上像素点的坐标像素值。u_i 代表矩形区域 u 轴上像素点的坐标像素值。o'u' 分别代表不同区域特征点中心坐标像素值。在开展粗匹配期间，像素误差是不可避免的事情。为缩小搜索范围，提高匹配精度，需要结合特征点区间，设定图像的初始像素搜索区域 C。区域 C 的表达公式为 $C = \{p(o, u) | u \in (u_1 - \sigma, u_1 + \sigma)\}$ 。粗匹配主要的目的是为后续的精匹配提供决策支持。

精匹配方法如下：精匹配的像素搜索区间进一步缩小，生成的特征描述子匹配性能更高。特征描述子计算公式如下：

$$u(F(a) : F(b)) = \begin{cases} 0, & \text{otherwise} \\ 1, & F(a) > F(b) \end{cases} \text{。公式中的}$$

F(a)、F(b) 分别代表图像在 F(·) 领域图像梯度时的信息描述子。随后结合目标图像之间的特征点，分析特征描述子的相似度。相似度计算公式如下：

$$d(V_i, V_{ii}) = L_i(V_i \oplus V_{ii}), i = 1, 2, \dots, m \text{。公式中的}$$

V_i 代表目标图形特征点中心的信息描述子。V_{ii} 代表像素中心描述子。m 代表像素总数量。L_i(V_i ⊕ V_{ii}) 代表逻辑函数。计算所得的相似度代指距离度量，数值越大，描述子距离越远，各个特征点之间的匹配度越低，反之越高。

三维视觉定位模型建立方法如下：根据粗匹配与精匹配的结果，可得目标图像的三维视觉空间坐标为 P_{sw}(X, Y, Z)。目标图像的物理坐标为 p(x_l, y_l)、p(x_r, y_r)。目标图像不同特征点坐标为 p(o_l, u_l)、p(o_r, u_r)。将目标图像的视差、物理聚焦值、摄像头准

基距离分别设为 δ、η、μ。基于三角形测量定量，三维视觉定位模型中 X、Y、Z 的计算公式如下：

$$\begin{cases} Z = \frac{\eta - (x_l - x_r)}{Z - \mu} = \frac{\eta}{Z} \\ X = Z \frac{(o_l - o_r) \delta x}{\mu} \\ Y = Z \frac{(u_l - u_r) \delta y}{\mu} \end{cases} \text{。转化坐标 Z 的计算公式，可得}$$

$$Z = \frac{\eta \mu}{\delta} = \frac{\mu \eta}{(o_l - o_r) \delta x} \text{。结合实际情况，代入相关数据，}$$

即可得出 X、Y、Z，获得较为精准的三维坐标。

2.4.2 智能识别技术

智能识别技术是一种综合性技术，融合了计算机、光电、通信、互联网等多个领域的尖端技术，致力于让物品“开口说话”。实际使用中，主要是利用电脑和相机捕捉相关物品的信息，以此完成信息的识别与标识。智能识别技术可分为条码、声音、人脸、指纹、图像、磁卡等多个类别。在铁轨扣件检修机器人的设计之中，主要是以图像识别为主，依靠点云配准算法，将扣件的变形尺度作为评判螺栓松紧的指标。该技术主要用于配合电动扳手与机械手臂完成铁轨扣件的安装与更换。点云配准算法是三维相机实现高精度检测定位的基础，通过将多个点云数据融合到统一坐标系，实现信息的精准匹配^[4]。

结论：

综上所述，我国关于铁轨扣件机器人的研究还处于较为初始阶段，相关成果不多，即便有一定产出也仅在部分地区试运行，未能全方面投入。若想利用数字技术助力经济发展，解决检修任务重、作业周期长、巡检招工难等问题，建造智慧城市，还需相关人员不断努力，积极创新，研发尖端科技。如此才能使人类与机器人之间形成良好的协作关系，发挥双方潜力，为铁路领域乃至全社会的高质量发展保驾护航。

【参考文献】

[1] 林晓函, 何朗. 铁轨扣件图像自适应分割算法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45 (05): 140-148.
 [2] 徐汝利. 基于彩色图像多阈值分割算法的铁轨扣件锈蚀识别问题研究[D]. 武汉理工大学, 2022.
 [3] 李锦珑, 马宏锋, 张维昭, 等. 基于机器视觉的铁轨扣件边缘检测研究[J]. 西北师范大学学报 (自然科学版), 2020, 53 (05): 45-48.
 [4] 杨樊, 陈建政, 吴梦. 一种基于计算机视觉的铁轨扣件缺失检测方法[J]. 电脑知识与技术, 2020, 10 (10): 2367-2370.

作者简介：陶锦龙 (2003.6-)，男，汉族人，山西太原人，本科在读，石家庄铁道大学，无职称，研究方向为交通安全工程。

郑溢涵 (2004.3-)，男，汉族，河北衡水人，本科在读，石家庄铁道大学，无职称，研究方向为安全工程。

任悦 (2005.8-)，女，汉族，河北邯郸人，本科在读，石家庄铁道大学，无职称，研究方向为应急管理。

周智超 (2004.5-)，男，汉族，四川内江人，本科在读，石家庄铁道大学，无职称，研究方向为应急管理。

吴晨杰 (2002.10-)，男，汉族，河北省石家庄市人，本科在读，石家庄铁道大学，无职称，研究方向为安全工程。