

文章编号: 2096-1618(2016)02-0185-05

# 基于机器视觉的车载式铁路轨道智能巡检系统研究

王留军<sup>1</sup>, 张 鹰<sup>2</sup>

(1. 郑州铁路局科学技术研究所, 河南 郑州 450052; 2. 河南省科学院应用物理研究所有限公司, 河南 郑州 450008)

**摘要:**研究一种车载式铁路轨道智能巡检系统。高速运动状态下4台高分辨率摄像机实时采集、存储轨道图像,经预处理、分割定位、特征描述、数据降维及模式分类等方法实现钢轨表面擦伤和掉块、扣件断裂和缺失、轨枕裂纹和档肩掉块、轨下垫板厚度异常等4类主要轨道缺陷的机器识别。在缺陷图像数据库中进行二次识别和人工判别可提高缺陷检出的准确度,有利于提高轨道巡检和养护效率。

**关键词:**铁路运输;轨道巡检;机器视觉;缺陷检测;支持向量机

**中图分类号:**TP23

**文献标志码:**A

## 0 引言

中国铁路对铁路轨道状态的日常检查一直依赖大量巡道工的目视巡检。这种巡检方式首先难免会受到巡道工经验和责任心的影响,难以保证巡检质量且占用大量的人力资源;其次自然条件恶劣地区(如山区、长大隧道、沙漠、戈壁、青藏高原等)的轨道非常不利于人工巡检;再次是多次提速以及列车密度加大,给巡道工的人身安全带来一定威胁;且高速铁路的巡检必须在夜间天窗点进行,夜视条件下难免会发生漏检现象<sup>[1]</sup>。

车载式的铁路轨道智能巡检技术拟在利用机器视觉对铁路轨道进行动态快速检查,具有智能、高效等特点。该技术在国外已比较成熟并已应用于日常的轨道巡检。如美国 ENSCO 公司在 20 世纪 90 年代末开发的轨道视觉检查系统 TVIS (track vision inspection system),可检查扣件是否完好,轨枕有无断裂,钢轨是否有擦伤、剥离掉块或折断,道床有无翻浆冒泥,路基是否有影响行车安全的较大沉陷等<sup>[2]</sup>;德国 Atlas Electronic 公司研制的 Rail Check 系统可对钢轨、扣件、轨枕和道床进行伤损检测和分类处理<sup>[3-4]</sup>。在识别算法研究方面,Clelia Mandriota 和 Stella 等长期进行基于图像的钢轨扣件状态识别方法的研究,使用小波变换 WT (wavelet transform) 和主成分分析 PCA (principal component analysis) 两种方法进行图像预处理,利用 BP (back-propagation) 和 RBF (radial basis function) 两种神经网络进行模式识别<sup>[5-11]</sup>。中国在此领域的研究起步较晚,青藏铁路通车后才引进轨道动态巡检设

备用于高原恶劣自然条件下的轨道巡检。近年来多家科研机构 and 高等院校开展了这方面的研究工作,如西南交大采用交叉法定位分割出扣件区域,采用 Haar-Like 矩形特征建立扣件的特征描述,设计了弱分类器和 Adaboost 强分类器,利用决策理论实现扣件状态的分类,包括扣件缺失和扣件断裂状态。北京交大研究道床状态和扣件状态的检测算法,采用边缘检测方法预处理扣件,提取边缘检测图像的不变矩特征作为特征向量,采用 PCA 算法提取扣件特征,最终都利用 BP 神经网络实现扣件状态的识别<sup>[12-16]</sup>。但这些多为理论方面的探索研究,未见应用于实际轨道巡检中。文中基于机器视觉的车载式铁路轨道智能巡检系统,通过机器识别并辅助人工判别方式,初步解决了钢轨、轨枕、扣件等轨道主要部件相关缺陷的快速检出。特别是对行车安全影响较大的轨下垫板超垫情况,采用附加里程信息的二次识别方法探索出一种有效的快速检出途径。

## 1 系统方案

系统从功能上分为图像采集与存储、图像识别和缺陷图像数据库管理 3 个子系统。4 台像机和多台 LED 频闪光源安装在轨道运行车辆下部,在车下的布置如图 1 所示,用于采集轨道状态图像。系统组成框图如图 2 所示,6 台刀片计算机和 4 台像机组成千兆以太网,完成图像采集存储、机器识别并将识别结果存入缺陷图像管理数据库。主控计算机完成有关参数的设置,像机和网络状态显示,监控整个系统的正常运行。缺陷管理计算机用于处理经机器识别的“疑似缺陷图像”的人工判别以及“真缺陷图像”的数据库管

理。计算机1~计算机4分别对应一台像机,按不同侧重点处理该像机采集的图像。光电转速传感器与从机车运行监控记录装置(LKJ)解析的公里标和速度信息相互验证,建立所采集图像与里程的对应关系并为图像采集提供距离基准。综合控制器执行主控计算机命令并向像机和LED频闪光源提供电源和外同步脉冲。

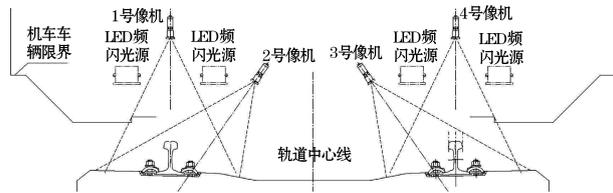


图1 像机及LED频闪光源在车下布置示意图

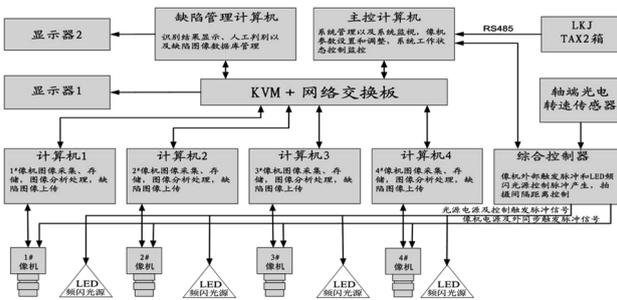


图2 系统组成框图

## 2 图像采集与存储子系统

图像采集与存储部分主要完成对钢轨、扣件、轨枕及轨下垫板等轨道外观特征高清数字图像的采集和不丢帧存储。

### 2.1 图像采集

在高速运行状态下要使所采集图像不“拖尾”,要求像机的曝光时长与实时速度和拍摄间隔相适应,并要求LED频闪光源除有足够的光强外还应满足:具有频闪功能、光谱范围与像机靶面对发光波长的敏感度一致,以提高光源的效率。系统所用摄像机靶面的敏感感光区域波长为:500~800 nm,与红色光波长 $660 \pm 100$  nm相一致,故选用红色大功率LED作为发光元件。为减轻太阳光对所采集图像的干扰并使所采集图像中轨道主要部件特征突出,必须对光源合理布置并进行光源数量、位置和角度调整。

综合控制器依据光电转速传感器输出的脉冲信号由微控制器运算处理得到实时速度,并与从机车运行监控记录装置(LKJ)广播信息中解析出的列车实时速度值验证,得到准确可靠的实时速度;与主控计算机交互读取拍摄间距、机车轮径、像机纵向间隔距离、转速

传感器每转脉冲数、光源输出提前或滞后量,像机外同步脉冲和频闪光源控制脉冲高电平宽度等参数并实时计算用于图像采集的像机外同步脉冲和频闪光源控制脉冲的周期;根据主控计算机的命令控制两类脉冲的输出,以驱动像机和频闪光源进行同步拍摄。所采集图像如图3~4所示。



图3 从轨道内侧拍摄的图像(2,3号像机)



图4 从钢轨上部拍摄的图像(1,4号像机)

### 2.2 图像存储

在数据存储方式设计上,考虑到虽然每帧图像只有0.5 MB,但连续采集得到的是海量的图像数据(单台像机880 MB/km)。利用铁路轨道连续延伸的特性并在计算机内存中开辟同样大小的两块图像缓存区,交替采集等距离图像并将其封装为一个大的单体文件,将基本信息作为文件头信息保存,可大大提高磁盘写入速度,满足连续采集不丢帧存储的设计要求。

采用内存读取、写入磁盘和从磁盘读取、图像分析处理等工作的多线程并行模式,由线程交互管理完成数据流通讯和协同交互工作,最大限度地挖掘系统的数据吞吐能力,提高处理速度。将单台摄像机的控制操作、采集存储、模式识别、数据流程控制等进行模块化对象化编程,确保在系统资源允许的范围内,根据运用需求裁剪或增加像机和光源数量,提升系统的可扩展性。

## 3 图像识别子系统

图像识别子系统完成从采集的所有图像数据中通

过机器视觉技术找出轨道主要部件的缺陷图像。采用软件识别为主,人工判别为辅的工作模式,可大大提高从海量图像中找出缺陷图像的效率 and 准确度。

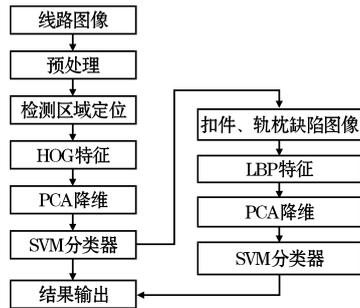


图5 轨道缺陷识别流程

鉴于待识别轨道主要部件缺陷特征差异较大,对每一类缺陷采用不同的算法形成不同识别模块,在工控计算机上有侧重地为计算机1~计算机4分配不同的识别项目完成对各类缺陷的自动识别。识别工作流程如图5所示,包括图像预处理、图像分割定位、特征描述、数据降维和模式分类等环节,采用SVM(支持向量机)实现缺陷的识别。由于铁路轨道中的扣件与轨枕等目标除正常工作状态外,还存在多种可能的缺陷,如针对扣件缺陷,除扣件断裂外还可能存在着扣件缺失、扣件被遮挡等,故在系统中使用两级分类方法处理。

对经过预处理的图像数据采用sobel边缘检测算子后,采用基于钢轨和轨枕宽度的区域亮点统计-投影方法精确定位待检测对象区域。对精确定位后的钢轨、扣件、轨枕和轨下垫板各区域图像,分别提取各自HOG(梯度直方图)特征。针对HOG特征维度较大问题,利用PCA(主成分分析)法进行降维处理。最后应用SVM对降维后的特征数据进行第一级缺陷检测。在第一级检测中只区分待检测对象的正常与有缺陷两种状态,并将检测出有缺陷的扣件、轨枕图像进行第二级检测。试验中发现单独利用HOG特征很难区分出扣件的断裂与缺失等不同种类的缺陷,利用LBP特征能够表现图像局部细微纹理的特点<sup>[17]</sup>,将图像进行分块,计算各子区域的LBP特征后,统计每个区域的直方图特征,并将其串联进行归一化处理得到图像整体特征向量。随后利用PCA进行降维处理,应用SVM对降维后的特征数据进行第二级的分类检测。

检测前使用人工挑选的分类样本图像训练出相应的SVM分类器,其中SVM核函数采用径向基函数,通过交叉验证确定出最优的支持向量机参数。实际检测时,根据待检测对象选择对应的SVM分类器进行分类识别。对先验典型缺陷特征进行归纳,形成初级特征

样本库并训练获得各检测对象SVM分类器。随着各类新缺陷特征数量的累积,将新特征进行分析归纳后对特征样本库进行更新,重新训练以获得新的SVM分类器。使系统具备获取新信息并改进自身性能的学习能力,有助于不断提升机器识别的准确性和鲁棒性。

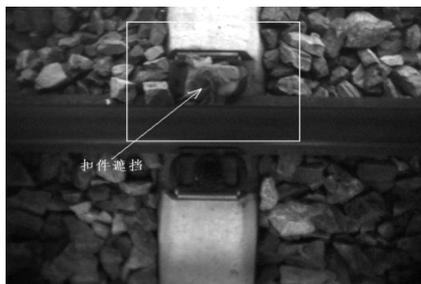
## 4 缺陷图像数据库管理子系统

缺陷图像数据库管理子系统由“疑似缺陷图像”和“真缺陷图像”管理两部分组成。经机器模式识别的“疑似缺陷图像”以及附加信息,通过以太网自动存入缺陷管理计算机的“疑似缺陷图像”数据库中,为了避免突发网络堵塞,在此数据库入口加入流量自动控制模块。数据库中的“疑似缺陷图像”可由两种工作方式进行人工判别,其一是在线识别实时人工判别方式;其二是事后回放识别人工判别方式,采用这种方式主要是针对图像采集速度与图像软件识别速度不匹配问题,另外可通过回放检测,灵活选择里程范围,输出感兴趣的某一区段巡检结果。经人工判别后的缺陷图像存入“真缺陷图像”数据库中,可按巡检日期、时间,里程范围,管辖范围,缺陷类型,左右股等条件任意组合进行缺陷检索,有针对性地查看缺陷图像并形成各种电子报表和图表,方便线路养护工区进行轨道养护。

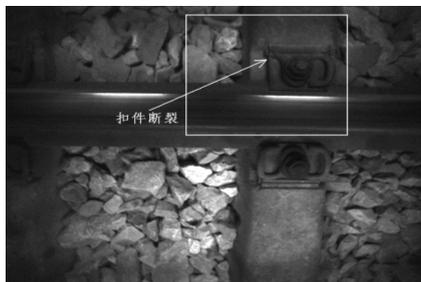
## 5 试验与验证

系统样机于2011年8月在昆明铁路局管内成昆线、广大线、大丽线、沪昆线进行巡检试验,现已在昆明铁路局试运用。试验过程中发现,晴天、雨天道床干湿不同,车辆运行时太阳光入射方向变化,像机镜头前灰尘的多少,隧道内外道床的干净程度不同等因素,会导致图像质量不同程度的下降从而影响到识别效果;轨枕和扣件上存在的异物会造成机器识别出的“疑似缺陷图像”数量增加;轨下垫板厚度异常一次检查时误检率较大,同一段轨道运用统计学原理经多次复检后误检率大大降低。通过在某一区段人为设置一定类别和数量的缺陷进行试验验证,系统对扣件断裂和缺失的检出率达98%(机器识别+人工判别),轨下垫板厚度异常检出率达96%(机器二次复检)。对比人工巡道有效检出的病害数量,检出效率和效果均远远好于人工巡道。从系统输出的巡检结果来看,较为常见的轨道缺陷是钢轨擦伤和掉块,扣件断裂和缺失,轨枕裂纹和档肩缺陷,轨下垫板厚度异常等。试运用过程中检

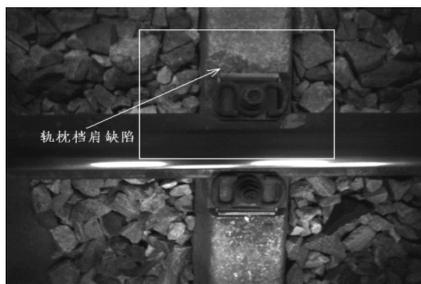
查到的轨道缺陷如图6所示。



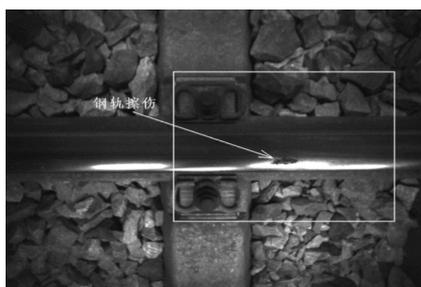
(a) 扣件异物遮挡



(b) 扣件断裂



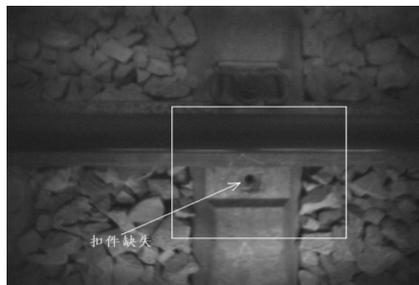
(c) 轨枕档肩缺陷



(d) 钢轨擦伤



(e) 垫板厚度异常



(f) 扣件缺失(隧道内)

图6 巡检结果-轨道缺陷实例

## 6 结束语

基于机器视觉技术研制的车载式铁路轨道智能巡检系统,实现高速运动状态下对轨道图像的采集和不丢帧存储,通过对轨道图像特征区域分割、精确定位,根据各类缺陷特征分别设计模式识别算法和机器学习模型,并建立分类病害特征库,实现了对钢轨、扣件、轨枕和轨下垫板等4类主要轨道缺陷的机器识别。通过缺陷图像管理数据库,以多种条件组合对缺陷图像进行检索并形成电子报表和图表,完成对铁路轨道主要部件状态的高效率、精细化和自动化巡检。研制本系统的目的旨在逐步替代传统人工巡道的视觉检查工作,改变铁路工务巡检作业模式,对提升铁路轨道巡检质量和效率具有积极意义。

## 参考文献:

- [1] 柴雪松,杨风春,罗林. 轨道视频检查系统[J]. 中国铁路,2001,6:59-60.
- [2] Singh M, Singh S, Jaiswal J, et al. Autonomous Rail Track Inspection Using Vision Based System [C]. IEEE International Conference on Computational Intelligence for Homeland Security and Personal Safety. Alexandria: IEEE,2006: 56-59.
- [3] Robin Clark. Rail Flaw Detection: Overview and Needs for Future Developments [J]. NDT and E International,2004,37 (2):111-118.
- [4] 张未. 德国 RAILCHECK 光电式自动化钢轨检测系统在轨道检查车中的应用[J]. 哈尔滨铁道科技,2001,(4): 3-4.
- [5] Stellae, Mazzeo P, Nitti M, et al. Visual recognition of missing fastening elements for railroad maintenance [C]. IEEE 5th International Conference on Intelligent T. Singapore, 2002: 3-6.
- [6] Mazzeo P L, Nicola A, Ettore S, et al. Visual rec-

- ognition of hexagonal headed bolts by comparing ICA to wavelets [C]. Proceedings of the 2003 IEEE International Symposi. Houston, Texas, 2003: 639-641.
- [7] Mazzeo P, Nitti M, Stella E, et al. Visual recognition of fastening bolts for railroad maintenance [J]. Pattern Recognition Letters, 2004, (25): 669-677.
- [8] Mazzeo P, Stella E, ANCONA N; et al. Visual detection of hexagonal headed bolts using method of frames and matching pursuit [C]. Pattern Recognition and Image Analysis. Second Ibe. Estoril, Portugal, 2005: 277-284.
- [9] Ruvo G D, Ruvo P D, MARINO F, et al. A FPGA-based architecture for automatic hexagonal bolts detection in railway maintenance [C]. Proceedings of the seventh International Workshop, 2005: 1-6.
- [10] Marino F, Distanto A, Mazzeo P L, et al. A real-time visual inspection system for railway maintenance-automatic hexagonal-headed bolts detection [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics; 2007, 37(3): 418-428.
- [11] Marino P F. A GPU-based vision system for real time detection of fastenings in railway inspection [C]. International Conference on Image Processing, IC. Cairo, Egypt, 2009: 2333-2336.
- [12] 谢凤英,吴叶芬,周世新. 基于互信息的铁路轨枕扣件自动定位算法 [J]. 中国体视学与图像分析, 2013, 18(2).
- [13] 李永波,李柏林,熊鹰. 基于 HOG 特征的铁路扣件状态检测 [J]. 传感器与微系统, 2013, 32(10): 110-113.
- [14] 范宏. 基于图像的铁路扣件缺陷检测算法研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2012.
- [15] 张洋. 巡道车视频处理系统关键技术的研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2008.
- [16] 常江. 巡道车视频检测系统的设计及关键技术的实现 [D]. 北京:北京交通大学, 2009.
- [17] 刘丽,谢毓湘,魏迎梅等. 局部二进制模式方法综述 [J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(12): 1696-1720.

## Development of a Machine-vision-based Vehicular Intelligence Patrol System for Railway Track

WANG Liu-jun<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>2</sup>

(1. Science and Technology Research Institute of Zhengzhou Railway Bureau, Zhengzhou 450052, China; 2. Henan Academy of Sciences Institute of Applied Physics Co., Ltd., Zhengzhou 450008, China)

**Abstract:** The study is done on developing a intelligence patrol system based on machine-vision for the inspection of railway track. Images of the railway track are captured and stored simultaneously by four high-resolution video cameras equipped in the patrol system. The four categories of railway track defects; burn and delamination of the wheel-rail, damage and lost of the rail fastening, crack or delamination of the sleepers and the abnormal thickness of rail pad could be recognized by the patrol system through preprocessing, tracking and location, features description, dimensionality reduction, model characterization and classification of the captured images. The combination of secondary recognition by the patrol system from defect image database and manually estimation could significantly increase the accuracy of defect detection and the efficiencies of railway inspection and maintenance.

**Key words:** railway transportation; railway track patrol; machine vision; defect detection; support of vector machine