

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106377

机车车顶设备状态及异物检测技术现状与发展^{*}

钱存元 蔡庆丰

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院 上海 201804)

摘要: 机车车顶设备状态异常和车顶异物是影响机车正常运行的因素之一,研究和运用机车车顶状态及异物检测技术对于铁路行车安全具有重要的意义。首先论述了目前运用于机车车顶设备状态检测的机械接触式、基于线性图像的非接触式以及综合性的动态监测3种检测技术,对这些技术所适合的应用场景及其优缺点进行了阐述及对比;然后在介绍传统人工进行异物检测的基础上,重点论述了基于图像处理的机车车顶异物检测技术,归纳总结了车顶成像、图像预处理、异物检测各环节中采用的技术手段和方法,分析比较了各环节的主要技术特点,并指出了今后机车车顶异物检测技术的发展趋势和需要进一步研究的主要内容。

关键词: 机车运行安全;设备状态检测;异物检测;图像处理

中图分类号: U269 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1

Present situation and progress of locomotive roof equipment status and foreign matter detection technology

Qian Cunyuan Cai Qingfeng

(Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Abnormal locomotive roof equipment status and foreign matter are one of the factors that affect the normal operation of locomotives. Research and application of locomotive roof status and foreign matter detection technology is of great significance to the safety of railway. This paper first discusses the three detection technologies in the status detection of locomotive roof equipment, which are mechanical contact type, non-contact type based on linear images, and comprehensive dynamic monitoring type. The application scenarios suitable for these technologies and the advantages and disadvantages are explained and compared. On the basis of traditional manual foreign matter detection, this paper focuses on the roof foreign matter detection technology based on image processing, summarizes the technical methods used in the locomotive roof imaging, image preprocessing, and foreign matter detection, and points out the development trend of the locomotive roof foreign matter detection technology and the main content to be studied.

Keywords: safe operation of locomotive; equipment status detection; foreign matter detection; image processing

0 引言

近年来,我国对铁路运输行业的建设投入不断加大,使其得到了飞速的发展,铁路机车、动车组及车辆上线数量逐年增加。根据《2020年铁道统计公报》,至2020年末,全国铁路机车拥有量为2.2万台。其中,内燃机车0.80万台,电力机车1.38万台。一直以来,铁路机车是我国铁路货物运输的主体,同时在特殊场景下也承担一定的旅客运输任务。保证机车车辆安全、平稳、可靠地完成运输任务是铁路运输相关行业必须面对的问题之一。

机车车顶设备的运行状态与机车的运行安全息息相

关,但在机车日常运营过程中,时常会有各种各样的不安全因素,例如器件老化失效、外来异物撞击等,这些都会导致车顶设备的工作状态发生变化,影响机车的正常运行,严重时甚至会危害到机车的运行安全。目前,国内外对于机车车顶设备状态检测技术的研究已有了一定的成果,主要将其分为精密机械接触式检测、图像线扫技术检测和动态检测3种,这3种技术在不同的场合均有一定的应用。

同时,机车车顶异物的存在同样需要引起重视。文献[1]提出车顶异物泛指的是可能损伤列车系统正常运行的某种外来物质或脱落松动的关键部件。通常意义上的车顶异物则被定义为不应出现在机车车顶的,具有一定大小

收稿日期:2021-04-13

* 基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2015BAG19B02)项目资助

尺寸的物体。车顶异物可能出现的种类很多,例如鸟类撞击车顶后的尸体、飘落在车顶的塑料袋和风筝、以及车顶工人施工后遗留的工具、手套等。这些异物若没有及时被检测清除,那么在机车运行过程中可能会猛烈撞击车顶的受电弓、瓷瓶等关键部件,造成设备的损坏,引起机车的运行故障,甚至导致严重的铁路交通事故出现。因此,实时掌握机车车顶设备的状态,实现对机车车顶异物检测,帮助运维人员及时排除安全隐患,至关重要。针对车顶异物的检测,国内外均着眼于基于图像处理的技术,但各类图像处理技术在车顶异物检测上的应用,均存在着一定的局限性。

本文首先阐述了机车车顶设备状态检测技术及其现场应用情况,然后重点阐述了机车车顶异物检测的关键技术,提出了需要重点关注和研究的问题,以期对机车车顶设备状态和异物检测技术的后续研究提供一定的参考。

1 机车车顶设备状态检测技术

1.1 精密机械接触式检测

精密机械接触式检测方式的工作原理是使用机械、电气、力学、光学等传感器对物体进行定位、速度以及其他相关数据采集。如图1所示为一种典型的基于机械接触式原理的车顶设备自动检测装置,它将多功能的三维运动机械臂作为载体,可以根据车顶表面进行自由伸缩,从而使得布置的传感器可以检测到受电弓升降弓的压力与时间、中心位置以及滑板的磨损等。车顶的其余设备状态则可以通过专用的高速光隔离数据通道进行传输,使得工作人员能够及时掌握如瓷瓶污染状况、主断路器和避雷器的绝缘性能等关键信息。

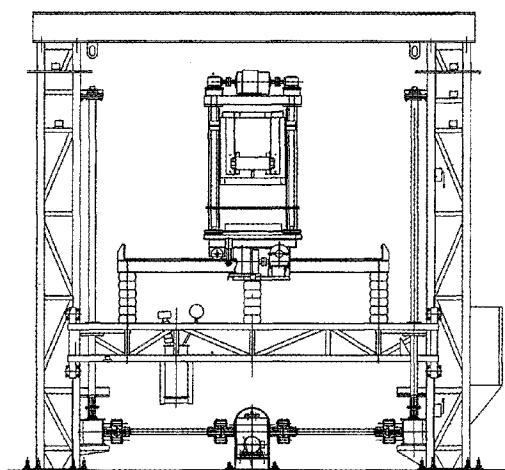


图1 车顶设备自动检测装置机架

2004年西南交通大学与成都主导科技有限责任公司合作开发的“电力机车入库受电弓状态及车顶设备自动检测装置”,便是根据上述工作原理设计的检测装置^[2]。它被安装在电力机车入库线旁,当机车驶入库内进行检修时,无需降下受电弓断电,便可使用该装置对机车受电弓的各项

参数进行自动检测,提高了受电弓与接触网运用质量、改善了弓网关系,该装置在检测完毕后还能够存储受电弓以及其余设备的状态图像以供后续分析,对保证行车安全具有重要意义。

2007年,西南交通大学在2004年研发的装置基础上,提供了一种“电力机车车顶状态综合自动检测装置”,相比之前的装置,该装置的性能在各方面都得到了增强。检测项目以及数据分析的优化使其能够通过绘制相应曲线,对电力机车车顶主要设备部件的各项状态进行综合地检测分析。考虑到工业现场人员的操作友好性,人机交互方面得到了重点改善,优化了操作界面,加入了语音提示,这些都提高了装置的实用性。

1.2 图像线扫技术检测

精密机械接触式检测方式虽然有较高的检测精度,但检测装置一般来说较为复杂,成本较高,且检测时间较长,效率较低,而无接触的图像线扫技术检测则在这些地方凸显了优势。2010年,王黎等^[3]使用一左一右两台高清摄像机同时对机车车顶进行拍摄,其布置位置如图2所示,摄像机A与B拍摄的区域需要有一定的重合部分,从而保证拍摄后的视频抽出前后也有着一定重合的部分帧。

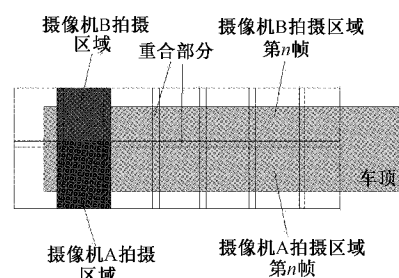


图2 车顶相机拍摄示意图

根据这些图像之间的重合帧,在拍摄之后对车顶图像进行拼接并进行分析,这是首次能够得到车顶全景图的技术。将经过分析的车顶全景图通过预先设定的软件传输给机务段监控室内的工作人员后,分析机车车顶全景图上信息确定车顶器件的异常状态变化,现场的工作人员便可以通过无线通信等手段得知车顶异常器件的位置,及时前往检修。这种技术减轻了现场工作人员的负担,提高了检测精度以及检测速度,大大提高了检测效率。

2017年,天津市地下铁道运营有限公司的王业超^[4]在地铁车辆中,也使用了图像线扫的技术,同时采集车顶、车体以及车底走行部的图像。利用HTM神经网络对天津市使用的各类地铁车型以及涉及的关键器件结构进行学习,形成地铁车辆车顶以及关键部件的数据模型库。在之后的检测应用中,直接采集地铁车辆的车顶、车体及走行部的结构信息,进而对比数据模型库进行实时异常判断。

1.3 动态检测

动态检测技术同样是利用非接触式的图像分析测量技

术,但相比于图像线扫技术,其具有高速、高分辨率的特点,可以动态地自动检测机车车顶器件的关键特性参数,例如受电弓的升降弓压力、横向偏移、滑板磨损等,并能够直观地判断器件的工作状态以及是否存在车顶异物。当机车慢速驶过监测区域时,摄像机从不同角度对机车车顶进行拍摄,得到无损的高清车顶监控视频,并进行本地存储。监控室内的工作人员通过视频回放,对车顶关键器件以及车顶异物进行分析判断,标记异常位置图像,指挥现场人员登上车顶进行处理。

2019 年,王克^[5]基于此技术在济南机务段设立了一整套受电弓及车顶状态动态检测系统,其基本组成如图 3 所示,主要包含滑板磨损检测子系统、中心线检测子系统、压力检测子系统和车顶状态监控子系统。

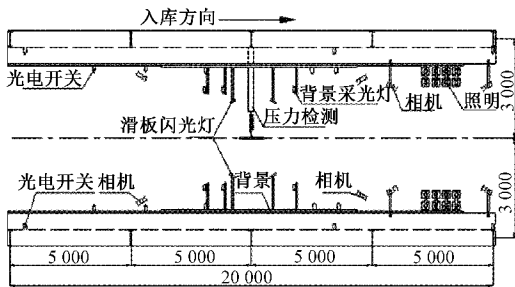


图 3 受电弓及车顶状态动态检测系统基本组成

2020 年,李建龙等^[6]于郑州地铁 2 号线尝试使用了如图 4 所示的受电弓状态及车顶异常动态监视和预警系统,其检测原理同样也是图像处理技术,通过左右两台监视相机对机车受电弓以及车顶器件进行实时状态图像采集,设备间控制单元结合数据库内的车顶部件特定,使用图像识别算法对这些状态图像进行分析比对,判断是否存在异常动态。

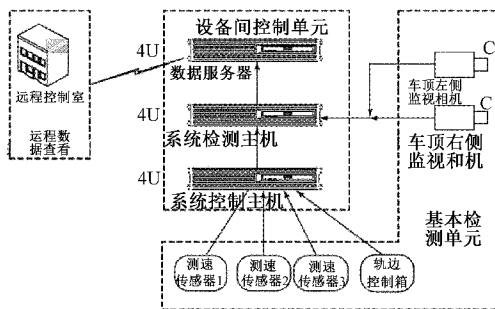


图 4 受电弓状态及车顶异常动态监视和预警系统组成结构

上文归纳总结了机车车顶设备状态检测技术的研究现状以及其在工业现场的应用,如表 1 所示,对 3 种主要的检测方式的工作特点以及应用检测效果进行了较为直观地对比分析。总体而言,机车车顶设备状态检测技术目前已有较好地发展,并在各个工业现场均有应用,应用效果较为显著。然而,正如上文所述,车顶异物的存在会极大地影响到

车顶设备的安全运行,但迄今为止,车顶异物的检测装置并没有得到广泛推广,其中的原因是多种多样的,例如检测成本高、检测难度大等,因此,目前对于机车车顶异物检测技术的研究发展也变得越来越重要。

表 1 机车车顶设备状态检测技术特点对比

检测方式	工作特点	检测精度	检测效率	检测成本
精密机械接触式检测	接触式	高	低	高
图像线扫技术检测	非接触式	中	高	中
动态检测	非接触式	高	高	高

2 机车车顶异物检测技术

2.1 传统的车顶异物检测技术

传统的车顶异物检测技术是一种纯人工检测方法^[7],其作业流程是:机车在完成运输任务后驶入机务段,依次进行停车、降弓、断电等操作后,车顶检修工作人员爬上车顶,通过肉眼对车顶表面进行检测,查看是否有异物的存在以及关键部件是否受损,如图 5 所示。这种方法不但耗时耗力,而且还存在着如下问题。

1)检测效率低:每个机务段分管的机车数量多,凭借纯人工进行检测,效率较低,为了覆盖到所有机车,难以提高检测次数;

2)易产生二次异物:检修人员登上车顶进行异物检测,若由于疏忽将作业工具遗留在车顶,则会造成二次异物的出现,影响机车运营安全;

3)作业流程繁琐且存在一定的安全隐患:机车车顶上存在高压接触网,且检修人员在车顶检修属于高空作业,必须严格遵守工作流程并进行安全防护,否则将导致生产安全事故。

可见,传统的机车车顶异物检测方法已经无法满足当今的运营安全需求,便捷实用、迅速可靠的异物检测技术对于机车运行安全的保障是极其必要的。



图 5 检修人员登上车顶作业法

2.2 基于图像处理的机车车顶异物检测技术

该技术需在轨旁或轨道上方安装摄像机,对驶入机务段的机车进行车顶成像,运用相关技术进行图像预处理后,实现异物的检测,其检测流程如图6所示。

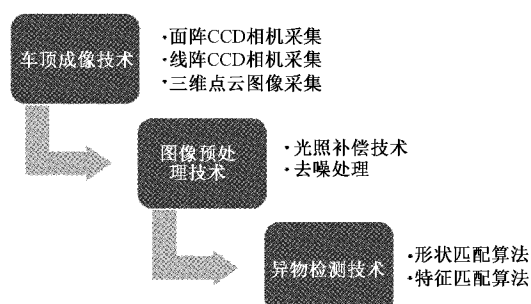


图6 机车车顶异物检测技术步骤及技术手段

1) 车顶成像技术

机车的车顶成像是通过图像技术进行异物检测的第1步,如何得到畸变较小、能够均匀反映出整个车顶状况的全景图对于后续的异物检测有着至关重要的作用,目前主要的图像采集方式主要有面阵电耦合器件(change coupled device, CCD)相机采集、线阵 CCD 相机采集和三维激光点云采集3种。

(1) 面阵 CCD 相机采集

采用面阵 CCD 相机对机车车顶图像进行动态采集是常用的方法之一,有分次采集和视频采集后再进行抽帧处理^[8]两种方式。然而由于机务段的限电要求,相机只能安装在铁轨的两侧,且与车顶存在着一定的高度差,即相机安装在机车车辆的斜上方,如图7所示,当机车驶过时,面阵相机对车顶进行斜拍,因此拍摄的图像存在着一定的梯形畸变,靠近相机的物体成像较大而远离相机的物体成像则较小,给后续的图像处理带来了一定的困难。

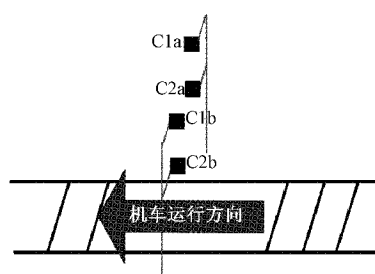


图7 面阵相机安装位置

面阵相机采集得到的图像还存在着另一个问题,面对机车车身较长、节数较多的情况,面阵相机需要进行多次采集才能获得一个完整的车顶表面图像,那么这多幅图像之间就需要进行拼接,拼接之前则需要对畸变进行校正,使其接近无失真状态,从而保证拼接的精确性。张正友相机标定法^[9]是一种常见的校正方法,其改进了传统标定法需要高精度标定物的缺点,仅需要使用一张平面棋盘格图片,就可以完成较高精度的标定,简化了操作,因此被广泛运用。

面阵相机采集车顶图像在车身较短、节数较少的机车上较为适用,而对于大场景、长车身的机车则效果不佳,原因是随着采集车顶图像的增多,标定操作的计算量也会随之增加,导致计算时间较长,影响实时性以及异物检测的精确性。

(2) 线阵 CCD 相机采集

为了解决面阵 CCD 相机在长车身机车场景中采集图像的不足,线阵 CCD 相机逐渐应用于机车车顶异物检测系统中。杨瑛等^[10]提出了一种基于线阵扫描方式下的机车车顶状态检测方法,针对尺寸较长的机车车顶,使用一台线阵相机无法一次性采集到整个车顶的全景图像,因此本文中使用两台线阵相机进行采集,将它们设置在轨道的同一侧并保持它们的上下距离接近,并使用乒乓工作方式对车顶图像进行交替采集,如图8所示。



图8 相机扫描车顶区域示意图

通过线阵相机采集得到的车顶图像清晰度很高,但由于机车在驶入机务段时的车速常常会发生变化,而线阵相机的扫描行频却没有随车速动态变化,这就导致扫描行频和机车车速之间无法实时匹配,使得车顶图像在高度方向上出现失真的情况。为了不干扰后续的异物检测,便需要根据车速对车顶图像进行校正,再将校正后的图像拼接成无失真的车顶全景图像。

(3) 三维激光点云采集

上述提到的两种方法都是二维平面图像采集方法,机车在驶入机务段时,车速较慢,在对车顶图像进行采集时,采集得到的相邻两帧甚至多帧的图像之间会存在着较多的重叠部分,这就导致了大量的存储资源和处理时间被浪费,大大增加了后续处理的数据量。

针对该问题,近几年迅速发展的激光扫描技术使得基于三维点云图像的机车车顶异物检测成为可能。朱韵琳等^[11]采用激光扫描仪对机车车顶进行扫描,通过距离传感器得到物体的深度信息,将每次的扫描数据在一个公共的三维坐标系中进行统一,就可以得到车顶的三维图像。

经过激光扫描仪扫描后获得的图像点为大量的离散三维点,即三维激光点云,点云需要经过三维场景重建后才能形成车顶三维图像,常用的方法有 Delaunay 三角化方法^[12]和移动立方体算法^[13]等。

2) 图像预处理技术

在得到机车车顶全景图之后,并不能直接对车顶图像进行异物检测,这是因为图像采集过程中,由于天气原因或者时间变化,机车车顶表面部件会发生不同程度的反光,可

能造成车顶图像的整体亮度不同、局部灰度不均等问题,这影响了后续异物检测的精度,因此异物检测之前还需要对图像进行光照补偿。在亮度达到要求的前提下,要保证图像展现出来的信息质量、清晰度以及信息丰富度均达到最为理想的状态才是图像预处理的关键核心^[14]。

灰度补偿算法是一种常用的光照补偿方法,它是对车顶图像的像素值使用某一种灰度补偿函数或是灰度变化对应表进行变化,从而使车顶图像的灰度值得到相应的拉伸或压缩,达到光照补偿的目的。全局直方图均衡化法^[15]能整体增强车顶图像的对比度,适用于由于照明强度低造成的图像整体灰度值偏低、动态范围较低的场景;局部直方图均衡化法^[16]则是增强车顶图像的局部细节信息,改善图像的局部灰度不均,但较易出现块效应,在后续处理中出现伪边缘,影响异物检测准确性。

汪小威^[17]基于 Retinex 理论提出了一种图像增强算法,该算法的实质是提取车顶图像的亮度信息,并通过复杂的计算来使提取的亮度信息尽可能准确,最后采用高斯平滑处理。该方法适用于图像局部灰度值较低的场景下,能够有效地增强车顶阴影处的细节信息,并在车顶图像对比度范围得到扩展的同时,很大程度上地保持图像的原始亮度。

李连志等^[18]研究了如何将同态滤波算法应用于光照补偿,其基本原理是通过设计低通或高通滤波函数来估算车顶图像的频率成分,达到增强车顶图像局部对比度的目的。该方法可以在增强局部对比度的同时,对图像整体的灰度范围进行压缩,适用于整体灰度值动态范围较高、局部灰度值较小的车顶图像,但会有过增强的现象出现,使得图像高亮区或阴影区的增强效果不佳。表 2 对各光照补偿方法的特点进行了比较。

表 2 各光照补偿方法特点比较

特点	全局直方图 均衡化法	局部直方图 均衡化法	Retinex 方法	同态滤波 算法
灰度范围	整体	局部	局部	局部
动态范围	低	低	高	高
过增强现象	无	有	无	有
算法复杂度	低	低	高	高

数字相机拍摄图像以及图像传输过程中若遇上强电磁环境,则可能会在图像上额外附加一些噪声,有的是如椒盐噪声等的随机噪声,还有的是有着固定模式的噪声,如高斯噪声。这些噪声会在很大程度上影响后续异物检测的精度,因此必须采取去噪处理。空间域中,主要有邻域平均法^[19]、选择掩膜平滑法^[20]和中值滤波法^[21]等方法;频率域中,由于噪声一般都为高频成分,因此采用低通滤波即可去除噪声。

3) 异物检测技术

异物检测技术大致可以分为两类,一类是形状匹配算

法,另一类是特征匹配算法。形状匹配算法适用于具体形状已知的异物,基本的算法思路是通过计算图形之间的相似度来判定是否为异物。常用的算法有基于不变量的小波变换方法^[22]、傅里叶描述子^[23](fourier descriptor, FD)等,以及基于最优点的广义 Hough 变换^[24]和 Hopfield 神经网络^[25]等。形状匹配算法在机车车顶异物检测中的应用较少,原因就是机车车顶异

物的种类繁多,且有些异物形状常常会发生变化,导致算法精度快速下降。

特征匹配算法则是提取图像中的特征点,这些特征点各不相同,但较为稳定,能被精确定位,因此便能通过这些特征点对图像的局部信息进行分析,判断是否有异物的存在,在机车车顶异物检测中应用的主要有两种策略,分别是间接匹配策略和深度学习策略。

(1) 间接匹配策略

间接匹配策略一般有两个阶段,第 1 个阶段是根据特征点设计具有特定属性的特征描述子,将每一个特征点都用一组特征向量进行描述,最后通过特征向量之间的相似程度建立初步的匹配。第 2 个阶段则是将初始匹配中由于噪声、重复内容等影响造成的错误匹配进行剔除。

Lowe^[26]提出的尺度不变特征变换(scale-invariant feature transform, SIFT)描述子就是一种经典的浮点型描述子,这种描述子将图像的局部像素进行 4×4 的网格划分,并统计 8 个方向上梯度,如图 9 所示,从而构建出一个 128 维的特征向量,并将梯度最大的那个方向确定为主方向。

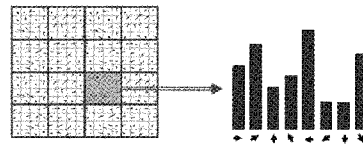


图 9 SIFT 描述子梯度统计

SIFT 描述子的匹配效果极佳,对光照、方向以及尺度变化均具有一定的鲁棒性,但计算量较大,对计算机要求较高。而为了提高检测速度,Bay 等^[27]在 SIFT 的基础上,结合箱式滤波和图像积分实现了梯度的快速计算,提出了加速稳健特征(speeded up robust features, SURF)描述子。

Calonder 等^[28]针对图像局部矩形区域采取了 5 种不同的采样策略,如图 10 所示,对比测试后提出了 Brief 描述子,这是一种二进制编码方法的描述子,计算较快,但精度较 SIFT 描述子而言较差。二值型描述子最终通过汉明距离对特征点的相似程度进行度量,而浮点型描述子则一般适用欧氏距离进行度量,稳定性较高。

Fischler 等^[29]提出的随机采样一致性(random sample consensus, RANSAC)是一种基于重采样的剔除误匹配的经典算法,浮点型描述子配合误匹配剔除算法,具有较高的匹配精度,但会消耗较长的计算时间,而二值型描述子和误

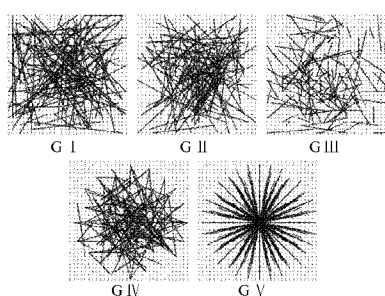


图10 5种不同采样策略生成的256对随机点

匹配剔除算法的组合虽然在计算时间上大大减少,但在匹配精度上也有较大的损失。

(2)深度学习策略

目前,深度学习以其高精度、高效率等特点在计算机视觉的各个领域得到了广泛的应用,同样地,在特征匹配方面也有着较为突出的表现。深度学习通常能直接从相同或相似的图像内容结构中学习到像素级别的匹配关系,主要有如下几种形式。

一是用深度学习的方法直接将整张图片进行输入,然后在输出层直接对边框位置和类别实现了回归预测,真正意义上实现了端到端的特征匹配^[30]。Ono等^[31]设计的LF-Net和Han等^[32]设计的Matchnet便是基于这种思路,并在测试中证明了其相对于传统算法存在优越性,但误匹配的情况仍大量存在,因此误匹配剔除算法的后处理也是必须的。

二是深度学习在双目立体匹配中,可以直接学习得到具有深度信息的图像,在公共数据集KITTI和Middlebury中得到了大量的运用,在该领域已全面超过了传统算法。

三是图像块匹配方法通过深度学习可以获取图像块之间的深度信息特征,并根据这些特征之间的相似程度来建立对应关系,Altwaijry等^[33]将该方法用于特征描述子的构建、图像配准等方面。

深度学习在特征匹配中还有另外一种应用,那就是从两个待匹配的三维点集中学习局部或者整体的特征信息从而建立起可靠的点对应关系,但该方法目前只在稠密的点云数据中得以应用,稀疏的点云由于不具有类似图像的纹理特征,并不适用。Luo等^[34]尝试学习点集之间的几何拓扑结构来解决深度学习在稀疏点云集中的应用问题,通过学习两个图结构之间的相似性来建立点集之间的对应关系。

3 机车车顶异物检测技术发展趋势

上文对目前常用的机车车顶异物检测技术的工作原理、技术特点以及应用范围进行了归纳分析。面对机车车顶复杂的工作背景、种类繁多的异物、越来越高的安全运行需求,机车车顶异物检测需要重点研究的主要内容如下。

1)图像处理算法的普适化。由于图像处理算法在当下

的各种领域都有大量运用,各种算法层出不穷,这些算法各有优劣,因此通过分析对比不同图像处理算法之间的差异性,从检测准确率、检测时间以及受噪声或背景变化的影响等多方面考察不同检测方法各自的优缺点来优化算法。优化的同时,需要考虑其对于机车车顶工况的适用性,对工业现场计算机的配置要求,在保证精度的前提下降低算法的复杂度。

2)深度学习的普及化。深度学习在计算机视觉领域的使用效果是毋庸置疑的,它能够很好地实现特征匹配算法的多样性,去除传统算法中较为低效的部分,而目前深度学习在机车车顶异物检测技术中的应用还在起步阶段,而一旦其能够成熟地在该领域得到应用,那么一定会对机车车顶异物检测带来极大的帮助。

3)大数据管理的智能化。现有的机车车顶异物检测技术的自动化程度仍不是很高,人工在其中占了很大一部分比重,而随着先进的算法和计算机技术得到应用,基于大数据平台对异物检测的历史数据处理,将实现车顶异物的在线实时智能检测以及车顶安全状态的自动评估。

4 结 论

可以认为,机车车顶设备状态检测的技术已趋成熟,目前已经能够满足日常机车运维的需求,但是针对机车车顶异物检测技术的研究还任重道远。毋庸置疑,基于图像处理的机车车顶异物检测技术是现在也是未来研究的热点,在车顶成像技术、图像预处理技术和异物检测技术等环节采用的各类技术手段和方法将会在不同程度上影响着车顶异物检测的效果,并随着技术的不断发展和成熟,将在未来的不同应用场景中得到更为广泛和深入的应用。

参考文献

- [1] 刘辰光. 机车顶部异物识别图像对比算法研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [2] 王黎. 电力机车入库受电弓状态及车顶设备自动检测装置[D]. 成都:西南交通大学,2004.
- [3] 王黎,李宏伟,高晓蓉. 机车车顶状态自动检测系统研究[J]. 微计算机信息,2007(28):227-228,216.
- [4] 王业超. 地铁车辆受电弓及车顶状态在线检测系统[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊),2017(4):105-106.
- [5] 王克. 受电弓及车顶状态动态检测系统的研究应用[J]. 铁道机车与动车,2019(7):46-48,7.
- [6] 李建龙,王亚柯. 受电弓状态及车顶异常动态监视和预警系统研究与应用[J]. 机电信息,2020(14):47-48.
- [7] 李宏伟. 机车车顶异物识别与瓷瓶定位检测[D]. 成都:西南交通大学,2007.
- [8] 董宏辉,葛大伟,秦勇,等. 基于智能视频分析的铁路入侵检测技术研究[J]. 中国铁道科学,2010,31(2):121-125.

- [9] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [10] 杨瑛,黎宁. 基于线阵扫描方式下的机车车顶状态检测方法[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(12): 1959-1963.
- [11] 朱韵琳,徐晓. 基于激光扫描系统的机车车顶异物检测[J]. 激光杂志, 2016, 37(5): 60-63.
- [12] DELAUNAY B. Sur la sphère vide[J]. Bulletin of the Academy of Science, 1934, 6(7): 793-800.
- [13] LORENSEN W, CLINE H. Marching cubes a high resolution 3d surface construction algorithm [J]. International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques Anahcim, 1987, 21(4): 163-169.
- [14] 张艳,张明路,蒋志宏,等. 基于改进的LIP算法低照度图像增强算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(11): 147-154.
- [15] 江子玉,朱益铭,戴声奎. 基于图像序列分析的全局直方图均衡[J]. 信号处理, 2020, 36(4): 531-540.
- [16] 张鲁筠,韩锴,徐水贵,等. 基于插值和对比度受限算法的局部直方图均衡[J]. 潍坊学院学报, 2019, 19(2): 1-5, 15.
- [17] 汪小威. 基于Retinex亮度校正与感知对比度的图像增强算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(6): 115-123.
- [18] 李连志,邢川. 基于同态滤波的平面视觉图像色彩增强算法[J]. 计算机仿真, 2021, 38(2): 249-252, 426.
- [19] CHEN H. Research of image denoising method about wavelet transform with neighborhood average [J]. Advanced Materials Research, 2014, 989-994: 4054-4057.
- [20] 李金红,张有会,滑斌杰,等. 基于积分图像的快速选择掩模平滑算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(11): 206-208, 219.
- [21] 赵高长,张磊,武风波. 改进的中值滤波算法在图像去噪中的应用[J]. 应用光学, 2011, 32(4): 678-682.
- [22] TIENG Q M, BOLES W W. Recognition of 2D object contours using the wavelet transform zero-crossing representation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(8): 910-916.
- [23] ZHAN C T, ROSKIES R Z. Fourier descriptors for place closed curves [J]. IEEE Transactions Computers, 1972, 21(3): 269-281.
- [24] BALLARD D H. Generalizing the hough transform to detect arbitrary shapes[J]. Pattern Recognition, 1981, 13(2): 111-122.
- [25] COOLEN A, RUIJGROK T W. Image evolution in Hopfield networks[J]. Physical Review. A, General Physics, 1988, 38(8): 4253-4255.
- [26] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]. Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computervision, 1999, 2: 1150-1157.
- [27] BAY H, TUYTELAARS T, VAN G L. Surf: Spceded up robust features [C]. European Conference on Computer Vision, 2006: 404-417.
- [28] CALONDER M, LEPETIT V, STRECHA C, et al. Brief: Binary robust independent elementary features [C]. European Conference on Computer Vision, 2010: 778-792.
- [29] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 6(6): 381-395.
- [30] 张培培,王昭,王菲. 基于深度学习的图像目标检测算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(8): 34-39.
- [31] ONO Y, TRULLS E, FUA P, et al. LF-Net: Learning local features from images [C]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2018: 6237-6247.
- [32] HAN X, LEUNG T, JIA Y, et al. Matchnet: Unifying feature and metric learning for patch-based matching [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015: 3279-3286.
- [33] ALTWAIJRY H, TRULLS E, HAYS J, et al. Learning to match aerial images with deep attentive architectures [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 3539-3547.
- [34] LUO Z, SHEN T, ZHOU L, et al. Geodesc: Learning local descriptors by integrating geometry constraints [C]. Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018: 168-183.

作者简介

钱存元(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为轨道车辆检测与诊断技术及电力牵引控制。

E-mail: tjqcyl@163.com

蔡庆丰, 硕士研究生, 主要研究方向为轨道车辆检测与诊断技术及计算机视觉。

E-mail: 188252310@qq.com