

文章编号: 1003-1995(2018)01-0020-05

# 基于图像识别技术的隧道衬砌裂缝检测系统研究

李健超<sup>1</sup> 张翠兵<sup>2</sup> 柴雪松<sup>1</sup> 薛 峰<sup>1</sup>

(1. 中国铁道科学研究院 铁道建筑研究所 北京 100081; 2. 中国铁路总公司 北京 100844)

**摘 要** 首先分析了既有隧道衬砌裂缝检测系统存在的问题,然后应用最新技术发展成果,提出基于图像识别技术的隧道衬砌裂缝检测系统。该系统能对隧道衬砌图像予以高速采集和存储,其后端采用基于深度学习的裂缝识别算法对海量的隧道衬砌图像数据进行快速识别,并提取裂缝特征参数。将该系统安装在现有轨道车上进行了试验,结果表明该系统可以 50 km/h 的速度对 1 mm 以上衬砌裂缝无遗漏采集。

**关键词** 铁路隧道; 裂缝识别; 试验研究; 图像识别技术; 深度学习

中图分类号 U457 文献标识码 A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2018.01.05

隧道结构作为隐蔽工程,其外部条件复杂,受力情况多变,结构的安全性和稳定性面临极大挑战。据调查,我国铁路运营隧道存在不同程度的病害,最普遍的病害就是衬砌裂缝,这也是导致其他病害的直接或间接原因。衬砌裂缝会引起结构的进一步变形破坏、渗漏水、掉块,严重时影响行车安全。

目前,国内铁路对于隧道衬砌病害的检测主要依靠人工检查。人工检查需要投入较多人力物力,作业效率低下,且受天窗时间、照明、目视距离等客观条件影响极易出现漏检现象。这种主要依靠检测人员主观判断的方式,很难满足铁路检测的快速性和准确性的要求。

近年来,国外一些机构针对隧道衬砌裂缝检测提出了一些基于图像识别技术的解决方案,甚至有些商用的检测系统已经上市。比如,日本 MIMM 公司研发的隧道衬砌检测车,其在公路隧道检测中发挥了重要的作用,但是裂缝识别效率还主要依靠人工,一年检测工作量仅上百公里,不仅难以同时满足大量隧道自动化巡检的需要,对大断面铁路隧道的检测效果也还无法验证,而且造价高昂。国内在此领域研究起步较晚,同济大学和西南交通大学相关课题组开展过检测样机的研究<sup>[1-3]</sup>,但是对于裂缝的识别绝大部分采用传统的数字图像处理方式,精度和效率都不太理想。武汉铁

路局与国外合作也研制了 1 套隧道衬砌图像检测系统,对隧道裂缝的识别仍依赖于人工完成。因此有必要研制可工程化应用的铁路隧道衬砌裂缝检测系统,实现对铁路隧道衬砌裂缝等病害的自动化检测、分析和诊断,并且检测系统的速度和精度要满足车载快速巡检的要求,从而显著提高检测效率和检测质量,为铁路养护部门的科学决策提供依据。

## 1 既有隧道裂缝检测系统存在的问题

综合分析国内外文献<sup>[4-6]</sup>,发现既有隧道裂缝检测系统普遍存在以下问题:

1) 鉴于技术方案、图像传感器的选型、调校、光照的配合等因素,采集到的图像存在诸多不良状态,比如光照不均匀、背景噪声严重、图像不清晰、局部曝光严重等。

2) 图像采集速度不能满足需求,目前国外出现的已商用的检测系统速度一般在 5~20 km/h,国内已有系统在工程应用中的检测速度也在 20 km/h 左右,无法满足现场要求。

3) 裂缝识别精度和效率低下。目前的隧道衬砌裂缝检测系统多采用传统的数字图像处理和人工辅助的方式识别裂缝,有的甚至就是人工浏览。对于海量数据无法快速、高频率地识别。

## 2 隧道衬砌裂缝检测系统设计方案

针对铁路隧道衬砌裂缝自动化检测需求,隧道衬砌裂缝检测系统需要做到 2 点: ①快速获取海量高清晰度隧道衬砌图像; ②快速准确识别海量图像中的衬砌裂缝病害。因此提出隧道衬砌裂缝检测系统方案。

收稿日期: 2017-10-20; 修回日期: 2017-12-10

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划(2016G006-B); 中国铁道科学研究院基金(2016YJ029)

作者简介: 李健超(1986—),男,助理研究员,硕士。

E-mail: lijc1011@163.com

本系统由图像采集系统、辅助系统、裂缝识别与管理系统组成,见图1。

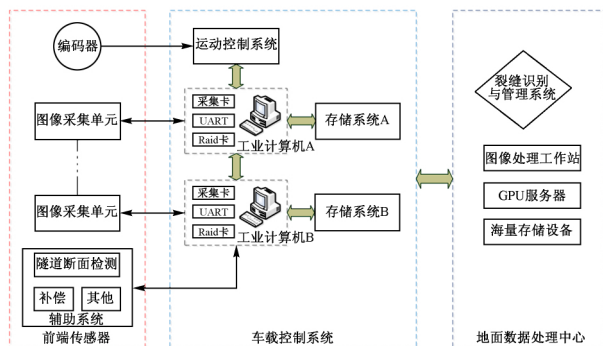


图1 隧道衬砌裂缝检测系统

## 2.1 图像采集系统

图像采集系统由高清图像采集单元、同步控制单元和存储系统构成,负责衬砌图像的采集和存储。

### 2.1.1 高清图像采集单元

对于二维图像的获取,通常采用面阵相机和线阵相机,二者各有优缺点。线阵相机具有动态范围大、图像畸变小、高速图像采集不易拖尾等优点,因此在连续图像采集领域中得到了广泛应用。线阵相机的传感器得益于单行感光元素扫描,使高扫描频率和高分辨率成为可能。针对铁路隧道衬砌检测高速度、高分辨率的需求,选用线阵CCD相机配以工业镜头实现高清图像采集。

另外,光源系统的好坏直接影响图像采集质量,从而决定裂缝识别的效果。由于隧道内环境恶劣、光照条件很差,经过多方试验和对比,本方案研究采用激光照明方式。激光照明受外界影响最小,具有寿命长、稳定、易于集成等特点。选择适当功率的激光和线阵相机进行集成,保证亮度的同时,通过精确控制确保其安全性。

高清采集单元是隧道衬砌检测系统前端设备最核心的模块,决定了图像的质量,间接决定了裂缝识别的效果。影响图像质量和识别精度的因素有很多,比如相机、镜头、光源、景深、有效像素、工作距离等。为了获取高质量的图像,将线阵CCD相机、工业镜头和激光光源进行一体化集成,设计满足需求的高清图像采集单元模块。

### 2.1.2 同步控制单元

为了实现隧道衬砌图像高效采集,设置8台相机,通过控制不同相机工作对单、双线隧道进行全断面检测,如图2所示。对于双线隧道上下行分别进行检测,上行检测时相机1、2、3、4工作,下行检测时,相机5、6、7、8工作;对于单线隧道一次性完成检测,此时相机

1、2、3、5、6、7工作。系统采用多台计算机进行协同控制,编写隧道衬砌扫描程序,自动化完成大量数据的采集、传输和存储功能。

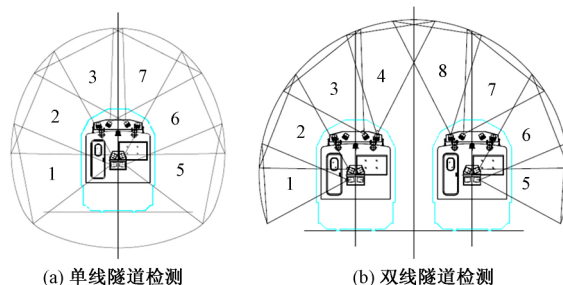


图2 相机布置方式

多台相机之间的同步采用脉冲外触发方式。本设计采用增量型光电编码器实现同步脉冲输出,经信号处理模块调校后驱动多台相机同步工作。此外,控制计算机同时获取编码器脉冲输出,实现里程信息的精确计算。

### 2.1.3 存储系统

由于采用多台相机同时进行检测,多路数据的高速存储和拷贝成为技术关键,需要确定合理的采集存储策略和高性价比的存储方案,同时要兼顾方案的可靠性和日常使用的便利性。本设计采用Raid卡和DAS直连存储方案,实现了多路数据的高速实时写入,同时满足了快速转移和数据恢复的需要。

数据存储系统工作方式如图3所示。车载多台工控机同时通过SAS方式连接存储阵列,分别设置成Raid0方式,满足多路数据高速写入要求。检测系统工作时,数据实时存储到高速磁盘阵列。检测完毕后磁盘可取下,到地面后接入裂缝识别与管理系统中。

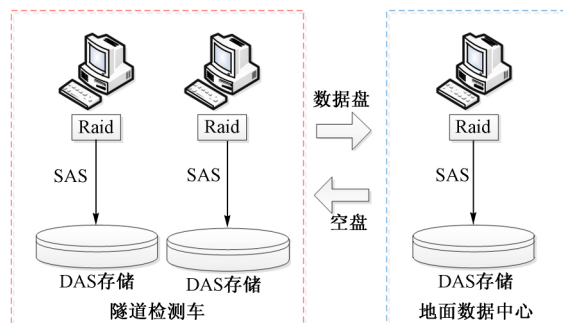


图3 数据存储系统工作方式

## 2.2 辅助系统

辅助系统包括隧道净空检测模块、里程模块和车体运动补偿模块,辅助图像数据的配准和校正,使裂缝几何信息和位置更精确。

隧道净空检测模块具有以下功能:①通过激光扫

描方式获取相机距隧道衬砌的工作距离,以此确定不同位置处图像系统的分辨率,为计算裂缝几何尺寸提供依据;同时计算每幅图像沿隧道衬砌的环向位置,从而与里程信息一起实现裂缝的精确定位。②辅助检测识别可能发生较大变形的隧道断面位置。③检测获取隧道净空尺寸,为隧道限界管理提供基础数据。④为隧道检测系统提供进出隧道的标志,实现自动化检测。

里程模块获取编码器脉冲计数,计算实时里程和速度,实现图像、净空、补偿等信息的纵向定位。

车体运动补偿模块安装于转向架左右两侧,采集车辆运行过程中的振动情况,用于准确定位隧道断面环向位置。

### 2.3 裂缝识别与管理系统

裂缝识别与管理系统采用人工智能技术,自动判断隧道衬砌裂缝,并将相关信息存入数据库,用于隧道病害的统计分析。其硬件系统由图像处理工作站, GPU 服务器和满足海量存储的磁盘阵列构成,如图 4 所示。

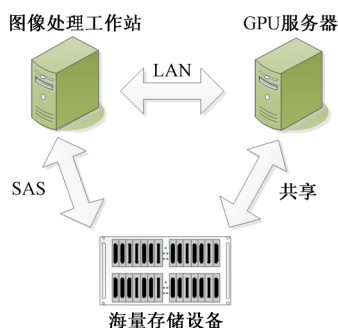


图 4 裂缝识别与管理系统

编写裂缝识别与管理程序,运行于图像处理工作站,负责全部人机接口工作,同时将图像、断面、补偿数据依据里程信息进行匹配,进行多路数据对齐、去除冗余等数据预处理操作。

在搭载多块 GPU 的服务器上进行快速的裂缝识别,实现裂缝识别算法核心功能,生成完整的病害信息。磁盘阵列用于海量数据存储,易于采用菊花链方式扩展,满足历史数据的存储和对比分析的需求。

### 2.4 总体技术指标

基于上述设计方案,系统的总体技术指标为:①最高检测速度 80 km/h;②裂缝检测精度 1 mm(检测速度 50 km/h 以内);③检测准确率不低于 70%。

## 3 隧道衬砌裂缝的自动识别和特征提取算法

隧道衬砌裂缝的自动识别和特征提取算法(简称隧道裂缝识别算法)是隧道衬砌裂缝检测系统的难点和核心。隧道裂缝的自动识别难点在于:①隧道断面

的变化导致相机物距变化很大,容易使得图像的亮度不均匀,对比度不高<sup>[7]</sup>;②隧道图像如伸缩缝、结构缝、各种管线、线缆等图像中含有大量噪声,而且裂缝的几何形状不规则、随机性强,特别是由于隧道的环境恶劣导致采集的图像质量相对较差,裂缝识别就更加困难<sup>[8-9]</sup>。既有的识别方法往往难以正确区分裂缝和其他噪声信息。

目前,对基于图像处理的裂缝检测开展过很多研究。其一般方法是:①图像的预处理,提高图像对比度和清晰度;②图像增强,边缘检测,突出目标区域;③依据灰度、纹理、形态等图像特征识别裂缝;④给出裂缝的特征信息。在国内外,相应出现了基于阈值分割、形态学、图搜索等方法的裂缝识别算法<sup>[10-11]</sup>。

随着人工智能技术不断发展,深度学习给数字图像处理技术带来了跨越式发展,使得准确处理海量数据成为可能。本文采用基于 NVIDIA TITAN X 的深度学习平台,对裂缝识别算法进行研究,算法可以自动识别裂缝并且计算裂缝长度、宽度、位置、走向、分布密度等特征参数。

针对大量数据的特点,本文提出一种基于深度学习的隧道裂缝识别算法,有效地解决了识别速度慢、识别精度低的问题。首先对一部分含有裂缝隧道图像的数据进行切分与人工标注,建立训练与测试模型所需的数据集,而后采用深度卷积神经网络提取图片特征,最终训练分类网络并对其效果进行试验分析。

### 3.1 隧道裂缝识别算法流程

隧道裂缝识别算法的流程包括超像素分割、数据集建立、分类网络设计与训练、模型测试与分析,如图 5 所示。

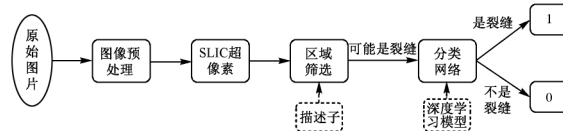


图 5 隧道裂缝识别算法流程

首先对原始图片进行预处理,消除图像中明显的噪声,消除光照不均匀的影响,增强对比度,提高图像质量。由于直接获取的原始图片尺寸过于庞大,为了方便处理,采用超像素分割方式对其进行切分。超像素分割方式可以有效避免裂缝出现在切分图像的边缘。然后构建专用数据集,涵盖不同路段、不同光照和不同的隧道类型,不同背景因素正负样本比例为 2:1。对这些图像进行 SLIC 超像素分割,最终每张图像获得尺寸相近的 100 张左右分割图片,这些构成了数据集的原始图片。



本文选择了速度性能均衡的 ResNet-18 网络,快速、准确地对隧道图片进行裂缝的识别,如图6所示。

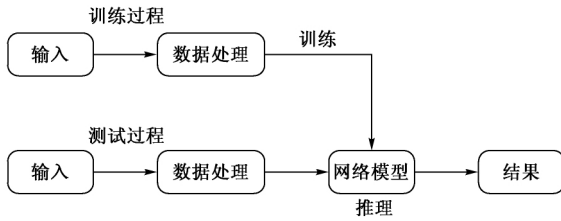


图6 分类网络框图

完整的分类网络包括输入、图片处理、计算推理和输出。在训练阶段输入包括图像和对应的标签,而在测试阶段输入只有图像,分类网络最终判别该图像是否含有裂缝。

### 3.2 衡量指标

本文采用查准率和查全率作为裂缝识别指标。对于二分类问题,按真实情况和预测结果划分为真正例(TP)、假正例(FP)、假反例(FN)和真反例(TN)4种情形。

查准率  $P$  和查全率  $R$  的计算公式分别为

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

考虑到隧道裂缝检测的特点,更关注查全率,即所有的裂缝都要找到,之后再辅以人工进行筛查,为隧道结构安全评估和工务部门治理病害提供依据。

## 4 工程试验

本检测系统在 GCY300 II 型轨道车安装试验。安装的硬件设备包括车顶相机安装箱、中部相机安装箱、净空检测传感器、编码器、检测机柜、操作台等装置。部分设备如图7和图8所示。



图7 车顶相机安装箱

在某隧道上行线进行检测,轨道车以 50 km/h 速度行驶,实时采集存储高清图像,采集完毕后将数据在裂缝识别与管理系统恢复,采用裂缝识别与管理程序解析数据并进行预处理,同时验证裂缝识别算法的有效性。

使用 caffe 深度学习框架来进行模型训练与测试,



图8 中部相机安装箱

设置基础学习率为 0.001,并且采用分段式下降策略。单张图片裁剪出多个子图片,分类网络对这些子图片进行判别。

将 2 000 张实测样本图片(像素 4 096×4 096)输入分类网络进行验证,结果见表1。可见:基于所搭建的处理平台和检测软件,系统的查准率和查全率分别达到了 72.74%和 80.66%,检测速度为每秒 14 张,效果明显优于传统方法。

表1 实测结果

基础学习率	裁剪方法	查准率	查全率
0.001	600 个	72.74%	80.66%

## 5 结论

1) 提出了隧道衬砌裂缝检测系统。采用基于线阵相机加激光照明的集成模块进行高清图像采集,同时设计高效的存储系统解决大量数据的传输和实时存储问题,通过多台计算机协同工作实现高速铁路大断面尺寸隧道衬砌的高清晰度图像采集。

2) 将深度学习开创性地应用到铁路隧道衬砌裂缝识别领域。深度卷积神经网络能够更好地提取图像更深层次的特征,能做到在识别裂缝时不受或者少受其他因素干扰。识别算法可实现对裂缝参数的自动识别,同时满足识别精度和效率双重要求。查准率超过 70%。

3) 研制的样机系统可实现在 50 km/h 速度范围内,对 1 mm 以上衬砌裂缝无遗漏采集。

### 参考文献

- [1] 王平让.隧道衬砌裂缝机器视觉检测方法 & 结构安全评估研究[D].上海:同济大学,2013.
- [2] 王华夏.高速铁路隧道衬砌裂缝图像快速采集系统研究[D].成都:西南交通大学,2013.

- [ 3 ] SINHA S K , FIEGUTH P W. Automated Detection of Cracks in Buried Concrete Pipe Images [J]. Automation in Construction , 2006( 15) : 58-72.
- [ 4 ] 黄宏伟 , 孙龔 , 薛亚东. 基于机器视觉的隧道衬砌表面病害检测技术研究进展 [J]. 现代隧道技术 , 2014 , 51( 增 1) : 19-30.
- [ 5 ] 王平让 , 黄宏伟. 隧道衬砌裂缝机器视觉检测技术研究 [J]. 现代隧道技术 , 2010 , 51( 增) : 627-630.
- [ 6 ] 刘晓瑞 , 谢雄耀. 基于图像处理的隧道表面裂缝快速检测技术研究 [J]. 地下空间与工程学报 , 2009 , 5( 增 2) : 1624-1628.
- [ 7 ] 刘学增 , 叶康. 隧道衬砌裂缝的远距离图像测量技术 [J]. 同济大学学报( 自然科学版) , 2012 , 40( 6) : 829-836.
- [ 8 ] 元大鹏. 地铁隧道图像数据分析系统 [D]. 北京: 北京交通大学 , 2016.
- [ 9 ] BENGIO Y , COURVILLE A , VINCENT P. Representation Learning: A Review and New Perspectives [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence , 2013 , 35( 8) : 1798-1828.
- [ 10 ] 卢宏涛 , 张秦川. 深度卷积神经网络在计算机视觉中的应用研究综述 [J]. 数据采集与处理 , 2016 , 31( 1) : 1-17.
- [ 11 ] HINTON G E , SALAKHUTDINOV R R. Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks [J]. Science , 2006 , 313: 504-507.

## Research on Crack Detection System of Tunnel Lining Based on Image Recognition Technology

LI Jianchao<sup>1</sup> , ZHANG Cuibing<sup>2</sup> , CHAI Xuesong<sup>1</sup> , XUE Feng<sup>1</sup>

( 1. Railway Engineering Research Institute , China Academy of Railway Sciences , Beijing 100081 , China;

2. China Railway Corporation , Beijing 100844 , China)

**Abstract** Firstly , the existing problems of tunnel lining crack detection system were analyzed. Secondly , the tunnel lining crack detection system based on image recognition technology was put forward by using the latest technology development results , which could collect and store the tunnel lining image at high speed. The back end of system adopted the crack recognition algorithm based on deep learning to quickly recognize the mass of tunnel lining image data and extract the characteristic parameters of the cracks. The system was installed on the existing rail vehicle and tested. The results show that the system can collect more than 1 mm lining cracks at 50 km / h speed.

**Key words** Railway tunnel; Crack recognition; Experimental research; Image recognition technology; Deep learning

( 责任审编 葛全红)

## 声 明

本刊重申: 稿件凡经本刊发表 , 即视为作者同意授权本刊代理其作品电子版信息有线和无线互联网络传播权; 并且本刊有权授权第三方进行电子版信息有线和无线互联网络传播。本刊支付的稿费已包括上述使用方式的费用。作者如不同意 , 请投稿时申明。

《铁道建筑》编辑部