

# 基于改进二维卷积滤波技术的轨道伤损检测方法<sup>\*</sup>

贾 强 韩 峰

(兰州交通大学土木工程学院, 730070, 兰州//第一作者, 硕士研究生)

**摘 要** 基于改进卷积滤波技术和自适应阈值分割法, 提出边缘检测轨道结构识别与伤损检测方法。使用改进二维卷积进行图像滤波, 对原图像矩阵通过行列式变换处理, 增强图像边界元素; 根据边缘检测所得到的线形特征进行扣件弹条及钢轨识别, 以线形急剧变化判别钢轨伤损及位置。通过既有线路轨道进行图像识别试验验证。试验验证结果表明, 采用该方法可提高轨道部件识别速率, 具有一定的自适应性, 还可确定伤损相应位置, 有利于轨道伤损的判别, 可应用在日常轨道的养护及维修中。

**关键词** 轨道; 伤损检测; 改进二维卷积; 自适应阈值分割; 边缘检测

**中图分类号** U4213.4<sup>+</sup>3

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2022.04.039

## Track Damage Detection Method Based on Improved Two-dimensional Convolution Filtering Technology

JIA Qiang, HAN Feng

**Abstract** Based on improved convolution filtering technology and adaptive thresholding method, an image edge detection track structure recognition and damage detection method is proposed. Improved two-dimensional convolution is used for image filtering, and the original image matrix is processed by determinant transformation to enhance the image boundary elements. According to the linear features obtained by edge detection, fastener springs and rails are identified, and drastic linear changes are used to identify rail damage and location. Image recognition test of existing line tracks is carried out for verification. Test results show that this method can raise the track component recognition rate and has certain adaptability, as well as to allocate the corresponding position of the damage, which is conducive to track damage identification and can be implemented in daily maintenance and repair of the track.

**Key words** track; damage detection; improved two-dimensional convolution; adaptive thresholding; edge detection

**Author's address** College of Civil Engineering, Lanzhou

Jiaotong University, 730070, Lanzhou, China

钢轨顶面或轨端剥离掉块、钢轨头部磨耗等轨道伤损将直接影响列车行驶的安全性。如何快速、准确地识别轨道结构伤损及具体位置, 对相关部门日常检查维修非常重要<sup>[1]</sup>。轨道结构伤损检测常需对图像边缘灰度进行量化, 其在微积分里相当于连续函数中离散数列或方向导数的差分。文献[2]首次提出了多级边缘检测算法; 文献[3]引进了引导滤波对图像进行平滑及大律法求阈值; 文献[4]将各种尺度的 Retinex 算法与表面检测系统相结合, 提出了图像增强预处理方法。但目前仍未有涉及根据边缘检测线形变化来识别轨道结构伤损的算法。

本文对采集的轨道图像进行预处理, 使用改进卷积进行图像滤波, 将处理结果与高斯卷积进行对比, 并结合边缘检测, 进而判断轨道伤损情况。

## 1 轨道图像的采集与预处理

本研究以某即将运营线路及既有货运专用线为研究对象, 在辅助光源条件下采集曲线段轨道结构部分图像。图像采集采用高清线阵摄像机, 其有效像素可以达到 1.2 亿像素。

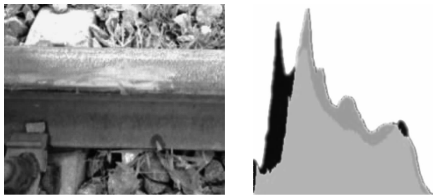
采集图像后, 将曲线段单张照片的边缘近似等效为直线线形。每幅照片均存在一定的噪声, 故需获取图像直方图, 并采用滤波技术进行图像预处理, 以实现噪声抑制或去除。

### 1.1 图像灰度直方图及均衡化处理

直方图在统计学中是一种二维统计图表, 是对数据分布情况的图形表示。直方图的 2 个坐标分别为灰度级和该灰度级对应出现的次数。对选定既有货运专用线部分曲线段获取照片, 使用 OpenCV3 软件对采集图像进行预处理, 计算 RGB(红、绿、兰)

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51568037)

色彩模式直方图,如图 1 所示。



a) 原图 b) 直方图

图 1 原图及对应直方图

Fig. 1 Original image and corresponding RGB histogram

由于图像的像素灰度变化是随机的,故得到对应的一维直方图图形高低不齐。因此需要直方图均衡化。在 OpenCV3 软件中可采用均衡化处理使直方图大致平和。均衡化前后的图像如图 2 所示。

对比图 2 中的原图与灰度图可知,均衡化的过程使得灰度调和,对比度有一定程度的降低。由直方图的细部图比较可以看出,均衡化后的直方图纵向高低得到部分调整,有效地利用了灰度值区间,使得图像的表现力更加出色。



a) 原图 b) 均衡化后的灰度图



c) 均衡化前的一维直方图 d) 均衡化后的一维直方图



e) 均衡化前的直方图细节 f) 均衡化后的直方图细节

图 2 均衡化前后的图像对比

Fig. 2 Image comparison before and after histogram equalization

## 1.2 图像的平滑处理

平滑处理主要通过滤波技术来降低图像上存

在的失真及一系列噪点。常规卷积滤波以邻域滤波(卷积)作为邻域算子,用不同的权重结合 1 个邻域内的像素,对输入像素进行加权求和处理,从而得到对应图像的像素输出值。如图 3 所示,将卷积核中的元素按照先行后列的顺序与原图像矩阵进行相乘后求和,即得到卷积结果。具体表现为左侧图像与中间图像卷积产生右侧图像。但与原图尺寸相比,卷积计算得到的矩阵尺寸要么偏大,要么偏小。

$$\begin{bmatrix} 4 & 7 & 7 & 6 & 3 \\ 5 & 4 & 9 & 8 & 1 \\ 3 & 3 & 6 & 9 & 7 \\ 2 & 4 & 5 & 7 & 4 \\ 5 & 6 & 6 & 6 & 3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 52 & 68 & 64 \\ 44 & 61 & 65 \\ 44 & 57 & 60 \end{bmatrix}$$

图 3 常规邻域滤波(卷积)

Fig. 3 Average neighborhood filtering (convolution)

### 1.2.1 改进卷积滤波技术

本文提出一种改进卷积滤波技术,通过矩阵行列式变化,对原图像矩阵边缘未处理元素进行卷积处理。

1) 在矩阵  $F_{M_1 \times M_2}$ 、 $H_{M_1 \times M_2}$  的上侧与左侧填充 0 元素,将其尺寸增加至  $M \times N$ ,新矩阵命名为  $F_1$  与  $H_1$ ,简略表达为:

$$\begin{aligned}
 F_1(m, n) &= \begin{cases} F(m, n), & 0 \leq m \leq M_1, 0 \leq n \leq N_1, \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\
 H_1(m, n) &= \begin{cases} H(m, n), & 0 \leq m \leq M_2, 0 \leq n \leq N_2, \\ 0, & \text{其他} \end{cases}
 \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $0 \leq m \leq M_1 + M_2 - 1, 0 \leq n \leq N_1 + N_2 - 1$ 。

2) 对  $F_1$  按行堆叠,重新构造出 1 个  $1 \times (M * N)$  的行向量  $F_{1,s}$ 。具体指:将  $F_1$  的第 2 行堆叠在第 1 行后,依次将其他行排列在后面。

3) 对  $H_1$  的每一行进行构造,得到 1 个  $N \times N$  的循环矩阵。循环矩阵作为“单位块矩阵”来构造循环块矩阵,其简要表达为:

$$D_m = \begin{pmatrix} H_1(m, 0) & H_1(m, N-1) & \cdots & H_1(m, 1) \\ H_1(m, 1) & H_1(m, 0) & \cdots & H_1(m, 2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ H_1(m, N-1) & H_1(m, N-2) & \cdots & H_1(m, 0) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \mathbf{D}_0 & \mathbf{D}_1 & \cdots & \mathbf{D}_{M-1} \\ \mathbf{D}_{M-1} & \mathbf{D}_0 & \cdots & \mathbf{D}_{M-2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{D}_1 & \mathbf{D}_2 & \cdots & \mathbf{D}_0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

4) 对循环块矩阵  $\mathbf{D}((M * N) \times (M * N))$  与行向量  $\mathbf{F}_{1,s}$  进行二维卷积, 矩阵形式为  $\mathbf{G} = \mathbf{F}_{1,s} \cdot \mathbf{D}$ ; 得到的结果为  $1 \times (M * N)$  的行向量, 将其重新排列成  $M \times N$  的矩阵  $\mathbf{G}_r$ 。

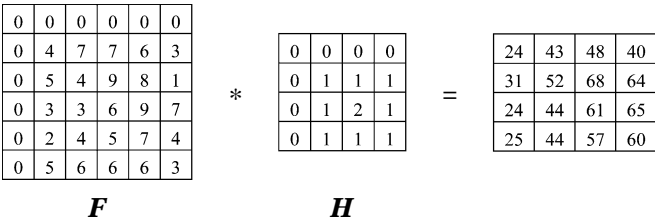


图 4 改进卷积示例

Fig. 4 Example of improved convolution

1.2.2 图像处理效果






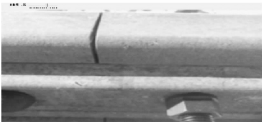
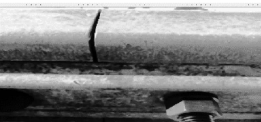
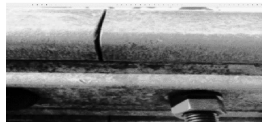




为分析改进卷积滤波技术的图像处理效果, 本文选取不同滤波方式进行试验。本文高斯滤波试验采用二维高斯滤波函数, 处理过程为: 首先, 选取权值; 然后, 对图像中每个像素点和其邻域内其他像素点的值进行加权平均计算, 从而得到该像素点

的像素值。

当对钢轨图像进行改进卷积滤波与高斯滤波处理时, 均可在由 OpenCV3 软件编程所得的线性滤波过程中对内核值大小进行调整, 从而得到去噪结果。试验结果如表 1 所示。

表 1 不同滤波方式的试验结果

Tab. 1 Test results of different filtering

| 项目      | 高斯滤波  | 均值滤波  | 文献[4]图像滤波  | 改进卷积滤波  |
|---------|---|---|--|---|
| 图像 1    |  |  |  |  |
| 图像 2    |  |  |  |  |
| 图像 3    |  |  |  |  |
| 处理时间/ms | 783   | 792   | 781  | 688   |
| 清晰度/ppi | 7.263   | 6.853   | 8.032  | 9.221   |

由表 1 可见, 对于均值滤波与高斯滤波来说, 当内核值固定 (可以随内核值进度条进行调整) 时, 在去除轨道外侧碎部噪声的同时, 也对图像细节部分有较大的影响; 文献[4]的平滑方法有较好的细部

处理结果, 但图像边缘位置信息丢失较为严重; 本文提出的改进卷积滤波处理方法不仅能较好地保留图像边缘信息, 还能较好地完成图像滤波处理。由表 1 的处理时间与清晰度对比可见, 改进卷积滤

波处理方法减少了矩阵转置过程,提高了处理速率,保留了图像边缘信息,提高了图像清晰度。

## 2 改进边缘检测方法

### 2.1 阈值分割

阈值分割的目的是从 1 幅图像中分割出试验所需要的图像。基于图像与背景之间的灰度差异,通过像素级分割来确定像素间的大小关系,并根据每个元素的值与阈值的比较结果来进行图像处理,进而分割所需图像。

自适应阈值操作的阈值分割效果较好。当其阈值采用二值化操作时,元素值如大于阈值则取元素值的最大值,如小于阈值则取 0;当其阈值采用二值化翻转操作时,元素值如大于阈值则取 0,如小于阈值则取元素值的最大值。

### 2.2 改进边缘检测方法

边缘检测过程包括对图像的滤波、增强及检测。本文采用的改进边缘检测算法将线形变化与边缘检测相结合。具体检测方法的主要过程如下:

- 1) 获取原始图像,并调入算法运行下的文件。
- 2) 对调入的处理图像进行直方图均衡化处理,并输出处理后的效果图,用于下一步边缘检测。
- 3) 采用改进二维卷积滤波进行图像平滑,得到图像增强效果;同时,利用自适应阈值分割来确定阈值范围。
- 4) 获取图像边缘线,利用钢轨外侧边缘直线形特点,以及扣件弹条特有“ω”线形进行判别分析,在分离出扣件结构的同时识别钢轨,并对钢轨表面进行线形判别:若存在直线线形突变,则判定钢轨表面存在部分伤损情况;若否,则输出边缘检测图像。

## 3 图像分离及试验验证

本文选取某线路,采集钢轨接头与曲线段部分照片进行图像处理,并对钢轨接头(将接头轨缝视为大裂缝状态)进行图像边缘检测处理,进而识别弹条扣件并分离其结构。

选取接头相关照片进行边界识别,同时根据弹条扣件特有的“ω”线形分离出扣件结构,如图 5 所示。

由图 5 可见,对于道岔区域轨道,采用改进边缘检测方法可得出线形变化,并将接头处线形简化为大裂缝检测处理,进而可明显地识别出接头的具体位置。同理,此改进边缘检测方法还可对钢轨轨缝

进行识别处理。



图 5 轨道接头的识别图

Fig. 5 Identification diagram of track joint


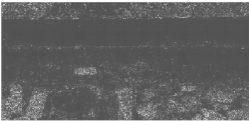
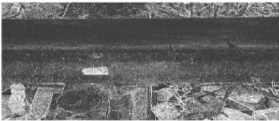


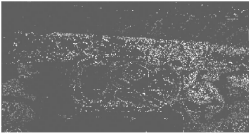


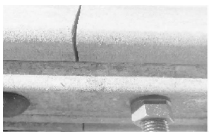
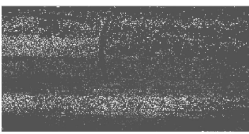
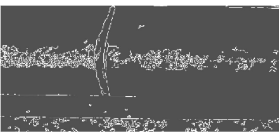
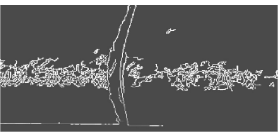
对比图 5 c) 与图 5 d) 可知,与 sobel 边缘检测结果相比,改进边缘检测识别得到的弹条扣件线形结果更好,可明显地分离并确定扣件位置。

选取钢轨接头、扣件及曲线段钢轨的照片进行边缘检测,识别其伤损类别及位置。检测结果如表 2 所示。由表 2 可知:与 Canny 边缘检测法<sup>[6]</sup>相比,改进边缘检测法得到的细部结构筛选效果更好、清晰度更高,线形更加明显;在改进边缘检测结果中,曲线段钢轨外侧边缘直线型相对突出,内侧有明显的线型急剧突变,可明确判定钢轨表面有掉块现象;改进边缘检测法根据大裂缝特征及“ω”线形特征,可有效识别钢轨接头及扣件。

此外,在测试试验中,采用 Sobel 算子边缘检测法时的检测时间需要 842 ms,采用 Canny 边缘检测法时的检测时间需要 804 ms,采用改进边缘检测法则仅需要 768 ms。可见,改进边缘检测法能缩短检测时间,提高检测速率。

表 2 不同检测方法的伤损边缘检测结果

Tab.2 Damage edge detection results from different detection methods

| 项目   | 原图  | Canny 边缘检测结果  | 改进边缘检测结果  | 边缘检测的细部   |
|------|---|---|---|---|
| 轨面   |  |  |  |  |
| 扣件   |  |  |  |  |
| 接头轨缝 |  |  |  |  |

4 结语

相对传统滤波处理方法,本文提出了改进二维卷积图像滤波方法其检测速度更高,清晰度更好,结合边缘检测及线形变化,可识别具体钢轨接头,分离出扣件结构并识别钢轨伤损,因此可应用于轨道日常养护维修。但该方法对于相片采集像素要求较高,内业处理需高配置设备。

参考文献

[1] 魏祥龙,张智慧. 高速铁路无砟轨道主要病害(缺陷)分析与无损检测[J]. 铁道标准设计, 2011(3):38.  
WEI Xianglong, ZHANG Zhihui. Analysis and non-destructive testing of main diseases (defects) of ballastless track of high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2011(3): 38.

[2] 段红燕,邵豪,张淑珍,等. 一种基于 Canny 算子的图像边缘检测改进算法[J]. 上海交通大学学报,2016 (12): 1861.  
DUAN Hongyan, SHAO Hao, ZHANG Shuzhen, et al. An improved algorithm for image edge detection based on Canny operator [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016 (12): 1861.

[3] 刘丽霞,李宝文,王阳萍,等. 改进 Canny 边缘检测的遥感影像分割[J]. 计算机工程与应用,2019 (12):54.  
LIU Lixia, LI Baowen, WANG Yangping, et al. Remote sensing image segmentation based on improved Canny edge detection[J]. Computer Engineering and Applications, 2019 (12): 54

[4] 岳彪,闵永智,马宏锋,等. 钢轨表面缺陷检测系统中图像增强预处理方法研究[J]. 铁道科学与工程学报,2018 (12):3248.  
YUE Biao, MIN Yongzhi, MA Hongfeng, et al. Research on image enhancement preprocessing method in rail surface defect detection system [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018 (12):3248.

[5] 朱有桃. 基于 Canny 算子的轨道板伤损自动识别方法[J]. 上海铁道科技,2017(4):55.  
ZHU Youtao. Automatic recognition method of track slab damage based on Canny operator[J]. Shanghai Railway Science and Technology, 2017(4): 55.

[6] 闵永智,肖本郁,党建武,等. 轨道扣件缺失的机器视觉快速检测方法[J]. 上海交通大学学报,2017(10): 1268.  
MIN Yongzhi, XIAO Benyu, DANG Jianwu, et al. Machine vision rapid detection method of the track fasteners missing [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017 (10): 1268.

(收稿日期:2020-05-10)

(上接第 180 页)

[6] 方军. 浅谈成都地铁接触网导线磨损分析及检规修改建议[J]. 通讯世界,2014(21):245.  
FANG Jun. Discussion on the wear of Chengdu Metro contact wires and inspection rules modification suggestion[J]. Telecom World, 2014(21):245.

[7] 胡艳,董丙杰,黄海,等. 碳滑板/接触线摩擦磨损性能[J]. 交通运输工程学报,2016(2):56.  
HU Yan, DONG Bingjie, HUANG Hai, et al. Friction and wear behavior of carbon strip/contact wire[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016(2):56.

[8] 张会杰,孙乐民,张永振,等. 环境气氛对 C/C 复合材料载流摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报,2015 (2):236.  
ZHANG Huijie, SUN Lemin, ZHANG Yongzhen, et al. The influence of environmental atmosphere on the tribological performance of C/C composites under electrical current [J]. Tribology, 2015 (2):236.

[9] 杨剑秋,王延荣. 基于正交试验设计的空心叶片结构优化设计[J]. 航空动力学报,2011(2):376.  
YANG Jianqiu, WANG Yanrong. Structural optimization of hollow fan blade based on orthogonal experimental design[J]. Journal of Aerospace Power, 2011(2):376.

(收稿日期:2020-06-11)