

基于机器视觉的轨道道岔密贴检测方法

郭淑敏¹, 冯俊逸¹, 沈拓^{1,2}, 张轩雄¹

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 同济大学 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804)

摘要: 当今轨道交通迅猛发展, 安全高效的列车运转是其重要的前提条件。全方位智能技术的出现, 为轨道交通运行中原有的各种人工检测方法提供了技术支持。提出一种利用道岔边缘特征提取和参数空间精确计算的实时机器视觉检测方法, 针对轨道交通中的道岔转换过程中道岔的密贴程度, 采用机器视觉技术进行检测。该方法主要包括4个方面: 通过预处理抑制图像中目标对象的周围环境以突出轨道特征; 在边缘检测中, 应用Canny算子对轨道道岔图像进行检测; 通过改进Hough变换进行道岔边缘提取, 并进行边缘拟合处理; 将参数空间中的间距进行转换, 完成道岔密贴检测。将人工测量和基于机器视觉的方法进行对比发现, 机器视觉方法能够得到更加精确的结果, 且机器视觉技术在0.1mm内检出准确率达91.25%。

关键词: 智能技术; 轨道交通; 道岔转换; 边缘检测; 边缘拟合

DOI: 10.11907/rjdk.211454

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2022)001-0120-04

Track Switch Fitting Detection Method Based on Machine Vision

GUO Shu-min¹, FENG Jun-yi¹, SHEN Tuo^{1,2}, ZHANG Xuan-xiong¹

(1. Institute of Information & Control Engineering, Optical Electronic Information and Computer Engineering College, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: With the rapid development of track transportation, the safe and effective track operation is an important guarantee. The emerging omni-directional intelligent techniques are being used to replace the previous detection performed by manual checks in rail transit operation. A real-time detection method based on the machine vision is improved for the interval spacing between basic rail and sharp rail. The turnout edge feature can be extracted and the accurate parameter space may be calculated. The approach contains four parts: image preprocessing, image edge detection, edge extraction, and edge straight line fitting. The preprocessing part uses the grayscale transformation and grayscale enhancement technology to simply process the image taken by the camera, so that the image edge features are more prominent. The image edge detection adopts the method based on canny edge detection operator, which can automatically calculate the threshold. Next, the improved Hough transform extract the switch feature. Finally, the edge fitting is carried out by the least squares method and convert the gap in the parameter space to complete the switch fitting detection. By comparing manual measurement with the machine vision method, it is obvious that the machine vision method can achieve 91.25% recall within 0.1mm tolerance.

Key Words: intelligent techniques; track transportation; track switch edge detection; edge straight line fitting

0 引言

轨道道岔是车辆从一条线路向另一条线路转入时所

利用的设备, 道岔的稳定在列车安全行驶中至关重要^[1]。轨道道岔基本轨与尖轨之间的不密贴, 将引发行驶中的列车在进入道岔时, 轮对夹在基本轨和尖轨之间, 对运行中的行车安全构成严重威胁。因此, 对这种威胁到行车安全

收稿日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1734211)

作者简介: 郭淑敏(1995-), 女, 上海理工大学光电信息与计算机工程学院硕士研究生, 研究方向为轨道图像处理; 冯俊逸(1997-), 男, 上海理工大学光电信息与计算机工程学院硕士研究生, 研究方向为轨道图像处理; 沈拓(1976-), 男, 博士, 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室讲师、硕士生导师, 研究方向为轨道交通; 张轩雄(1963-), 男, 博士, 上海理工大学光电信息与计算机工程学院教授、博士生导师, 研究方向为微电子、传感技术。本文通讯作者: 郭淑敏。

问题的预防治理备受关注。从《铁路技术管理规程》可清晰了解到:轨道道岔的基本轨与尖轨在没有运行时,如果第一连接杆处有 4mm 或者以上的间距,即道岔处于不密贴的情况下,此时不能开放或锁闭。对于地铁的道岔密贴安全,同样应该控制在安全的密贴间隙距离之内,但是道岔的维修防护和按期缺陷检查在人工处理情况下,存在一定安全隐患。

轨道缺陷一直备受重视,许多学者通过研究轨道组件诊断轨道缺陷。曹义亲等^[2]提出一种针对轨道缺陷图像分类的基于蚁群的改进算法,通过对轨道缺陷图像作预处理并对缺陷图像进行分割提取,在蚁群算法基础上进行改进以提高分类速度及准确度,此方法适用于大量轨道缺陷分类,但不适用于一张轨道道岔图像的单张处理;Resendiz 等^[3]提出通过图像到信号的方法,该方法利用道岔的检查视频,输入信号是横向视图观察到的钢轨中间部分,通过钢轨的块向 Gabor 变换以阈值检测器的形式输出,从而判断铁路运行状况,此方法为实现道岔密贴的实时检测提供了基础;周宇等^[4]通过研究道岔的廓形数据,提出曲尖轨磨损的原因,未提及道岔之间的不密贴;Corsino 等^[5]提出一个检测系统,通过在 RANSAC^[6]算法中分别添加一些点检测两条航迹并利用模板图像匹配和梯度方向直方图(HOG)^[7]以捕捉道岔线路,但是仍然不能将此方法运用到道岔上;Zhang 等^[8]提出一种基于概率神经网络(PNN)的道岔缺陷检测算法。通过参数要求较少的 PNN 的自学习能力提取一些典型故障特征,使得计算过程更快,但该方法只关注了典型缺陷;Faghieh 等^[9]提出一种深度卷积神经网络(DCNN)方法用于轨迹面故障的自动检测。他们利用大量的原始图像数据通过 DCNN 进行特征识别,自动完成轨迹故障检测;Vijaykumar 等^[10]描述了一种新的解决方案,通过分析轨道纹理检测表面断层,使用增强方法增强对象和背景之间的差异;Shen 等^[11]在时频域分析和小波包缺陷道岔特征的基础上,提出利用摄像机拍摄铁路图像的非接触式监测技术,对铁路线路及连接件进行检测和诊断,提取形态学特征并应用于铁路构件和铁路线路检测,从而加强铁路安全。以上研究大多是关于轨道线路的航迹预测或者表面缺陷,针对单独的道岔密贴问题关注极少,为了及时避免在列车行驶时由于道岔不密贴出现安全隐患,本文提出关于道岔密贴的实时检测方法。

1 预处理

由于摄像机在外界拍摄容易受到天气、光照、角度等不可避免的自然因素影响,图像预处理技术能够通过数字图像处理方法和技术增强所需图像的质量^[12],并能在一定程度上改善感兴趣区域的图像信息效果呈现^[13]。灰度变换可以令图像特征更加突出,灰度直方图显示了图像的灰度变化等信息,而且直方图均衡化可以使细节更加清晰有利于接下来的图像处理,便于道岔的特征提取。 r 是归一化后的图像灰度, s 是校正之后的灰度^[14]。

$$0 \leq r, s \leq 1 \quad (1)$$

区间 $[0, 1]$ 中的任何 r 都可以被 $T(r)$ 变换成 s ,且:

$$s = T(r) \quad (2)$$

变换函数离散形式可表示为:

$$T(r_k) = \sum_{i=0}^k p_r(r_i) = \sum_{i=0}^k \frac{n_i}{n}, 0 \leq r_i \leq 1, 0 \leq k \leq L-1 \quad (3)$$

表示在灰度值 r_k 时像素的个数,灰度级的总数为 L 。

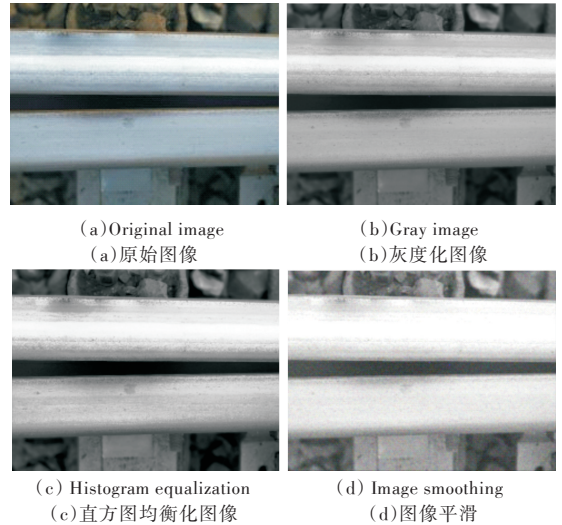


Fig. 1 Image preprocessing

图 1 图像预处理

图 1(a)-(d)是预处理过程,经图像预处理后的图像是一幅连续图像^[15],直方图均衡化的本质就是降低图像的灰度级并增强灰度之间的对比度。图像预处理技术能够有效减少图像背景对下一步处理的不利因素,令图像的灰度变化分布得更加均匀并着重突出了图像中的细节。如图 1(d)所示,通过图像平滑处理能够克服噪声影响并在一定程度上抑制噪声。

2 道岔密贴检测

2.1 边缘检测

从图 1 轨道道岔的图像中能够清楚地看到,道岔图像中两条直线之间的距离实际上就是对轨道道岔密贴的检测。Canny 边缘检测算子效果表现极好^[16],边缘检测步骤如图 2 所示。

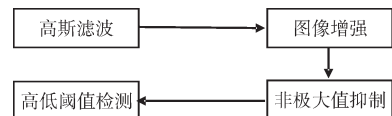


Fig. 2 Steps of Canny edge detection

图 2 Canny 边缘检测步骤

Canny 利用高低阈值的方法,在高低阈值中,首先依据其中的高阈值能够获得一幅边缘图像,然后依据另一个选取的低阈值闭合这幅图像中的边缘。通过设置全局范围高低两个阈值对图像像素点进行筛选,根据某种阈值规则只选取满足条件的边缘像素点。高阈值计算过程如图 3 所示。

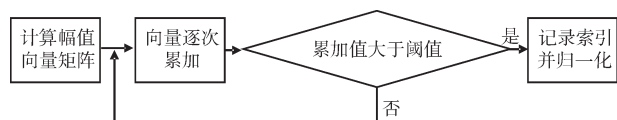


Fig. 3 Steps of high threshold calculation

图3 高阈值计算步骤

通过选取全局范围内的高阈值和低阈值,筛选出边界点。在运用高低阈值对边界点进行筛选的过程中,非边缘点根据低阈值点筛选去除,边缘点根据高阈值点留下。实际上阈值大小设置不同,得到的结果也会有很大不同,比如在设置的低阈值相同条件下,设置的高阈值越大则得到的边缘检测结果会随之变得突出。轨道道岔的边缘检测结果如图4所示。

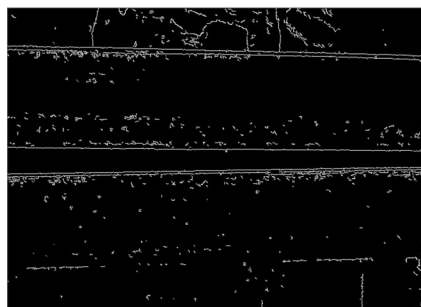


Fig. 4 Edge detection result

图4 边缘检测结果

2.2 特征提取

由上述的边缘检测过程,可以检测到轨道图像中符合设置阈值的所有边界点,这些边界点包含于轨道道岔中两条直线边缘以及背景中的一些噪声边界。利用 Hough 变换的思想^[17]对轨道道岔边缘进行提取,该方法在检测直线方面上具备了克服噪声的优点。假设所有噪点都通过了 Hough 变换,将会生成一些实验中不需要的伪边缘直线。降低噪声点在 Hough 变换中产生的影响需要在检测前采用区域匹配的思想,具体过程如图5所示。

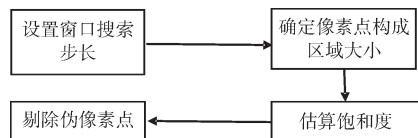


Fig. 5 Region matching process

图5 区域匹配过程

区域匹配过程中窗口搜索步长的值应该小于轨道道岔在图像中的最短搜查长度,能够防止轨道道岔的两条直线边缘信息一起出现在识别的窗口中。接下来对识别窗口包含的区域进行扫描,找到上下边缘,结束搜索后的窗口所含边缘像素区域是由所有边缘点顺时针连接确定,假设像素点之间的距离固定为单位1,在封闭的一定区域中,依次计算相邻两对边界点上方的面积,进而求出边缘像素点的大小。饱和度计算是通过估算窗口内检测出的像素点所构成的面积大小,与设定好的滑动窗口面积进行比较,将两者的比值定为区域饱和度,如果该值比设定的阈值高,则将此点像素值清零并去除,判定为伪边缘像素点,退出后续计算过程。

关于覆盖了直线特征的边缘,要提高该提取边缘直线的精确度,可以采用随机抽样一致算法的思路,在建立直线参数模型的前提下,通过随机取点进行判断,不符合判断条件的点将被舍弃,不参与后续累加过程。此方法能够有效减少 RHT 随机性问题^[18],Hough 变换结果如图6所示。

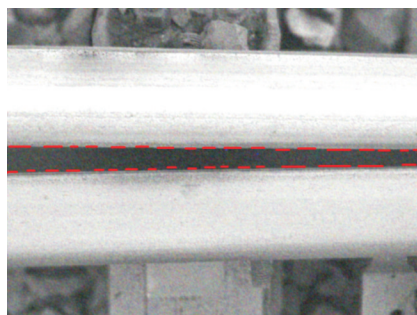


Fig. 6 Hough transform result

图6 Hough 变换结果

2.3 边缘拟合

从上述轨道道岔直线边缘检测中可以看到,两条直线边缘之间的距离是检测道岔密贴问题的关键所在。如果只利用 Canny 算子或者 Hough 变换所得到的直线损失了精度,并且分别得到的结果在与人工检测结果的比较中造成较大误差,因而可以在两者结果的基础上,应用最小二乘法对两者图像处理结果进行拟合。

最小二乘法公式如式(4)所示。

$$M = \sum_{i=1}^N [y_i - \phi(x_i)]^2 \tag{4}$$

其中,数据点用 (x_i, y_i) 表示,拟合函数用 $\phi(x_i)$ 表示。

利用边缘检测和特征提取到的两条最长直线相与,得到最终的轨道边缘。结果如图7所示,可以看出经过最小二乘法拟合的边缘不仅更加清晰准确,而且与原图像边缘基本吻合。

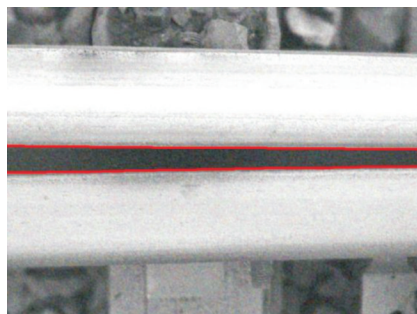


Fig. 7 Fitting result

图7 拟合结果

2.4 参数空间转换

拟合结果中两条直线之间的像素数决定了道岔的基本轨和尖轨之间的实际距离。从最小二乘法拟合的直线可以得出边缘之间的像素数目,要确定轨道道岔的密贴距离,首先要知道真实距离与像素数的比值,因基本轨的宽度固定,可以将基本轨作为参照标定物,利用世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系和像素坐标系去计算真实距离与像素数的比值^[19-20],进而求出轨道图像中两条直线边缘之

间的实际距离。

3 实验

本文对 80 幅道岔图像进行了拟合检测,实验结果比较如表 1 所示。

Table 1 Comparison of experimental results

表 1 实验结果比较

机器视觉/mm	人工测量/mm
3.063	3.1
3.312	3.4
2.459	2.5
3.816	3.9
2.124	2.2
3.135	3.2
2.744	2.8
1.969	2.0

从结果可以看出,利用道岔之间的距离衡量机器视觉方法和人工方法的标准使两者结果在合理的误差范围内,但在特征提取实验或拍摄过程中都会产生一定干扰,如恶劣天气或光线影响、相机振动、轨道振动造成标定距离值变化、直线提取时算法失误及严重的轨道磨损等。若机器视觉方法和手动方法测量的距离差不超过 0.1 mm,则判定机器视觉方法下的结果合格,测量结果精度如表 2 所示。

Table 2 Detection precision result

表 2 检测精度结果

满足要求数量	精确率(%)
73	0.912 5

综上所述,利用机器视觉的方法可靠且高效,比人工测量方法更加省时省力。同时,能够实时计算道岔距离,及时判断列车在行驶过程中道岔的转换过程是否存在安全隐患以及及时避免。

4 结语

本文受智能交通的启发,将创新的机器视觉相关方法运用于道岔密贴检测,不仅节省了人工成本,也提高了列车运行的安全性。通过图像预处理、Canny 检测算子、改进的 Hough 变换等方法完成边缘特征提取,使用最小二乘法进行边缘直线拟合,消除虚假边缘点,计算基本轨到尖轨的真实距离,从而检测道岔转换安全。由于不排除天气光照等自然因素对图像的干扰,这些不可控因素都会对道岔密贴结果产生一定影响,因此后续将重点研究并提高算法鲁棒性。

参考文献:

[1] KAEWUNRUEN S. Monitoring structural deterioration of railway turnout systems via dynamic wheel/rail interaction [J]. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 2014(1): 19-24.
 [2] CAO Y Q, WU D, HUANG X S. Track defect image classification based on improved ant colony algorithm [J]. *Computer Science*, 2019, 46(8):292-267.

曹义亲,武丹,黄晓生. 基于改进蚁群算法的轨道缺陷图像分类 [J]. *计算机科学*, 2019, 46(8):292-267.
 [3] RESENDIZ E J M H, AHUJA N. Automated visual inspection of railroad tracks [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(2): 751-760.
 [4] ZHOU Y, ZHANG C C, WANG S G, et al. Analysis on the cause of fatigue crack of turnout rail [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2020, 48(12): 1770-1781.
 周宇,张聪聪,王树国,等. 高速道岔尖轨疲劳裂纹成因分析 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(12): 1770-1781.
 [5] CORSINO E J, STANCIULESCU B, FORIN P. Rail and turnout detection using gradient information and template matching [C]//Beijing: 2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings, 2013.
 [6] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sampleconsensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Communication of ACM*, 1981, 24(6): 381-395.
 [7] NAVNEET D, TRIGGS B. Histograms of oriented gradients for human detection [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition, 2005.
 [8] ZHANG K, DU K, JU Y. Algorithm of railway turnout fault detection based on PNN neural network [C]//Hangzhou: 2014 Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design, 2014.
 [9] FAGHIH R, HAJIZADEH S, NÚÑEZ A, et al. Deep convolutional neural networks for detection of rail surface defects [C]//Vancouver: 2016 International Joint Conference on Neural Networks, 2016.
 [10] VIJAYKUMAR V R, SANGAMITHIRAI S. Rail defect detection using Gabor filters with texture analysis [C]. Chennai: 2015 3rd International Conference on Signal Processing, Communication and Networking, 2015.
 [11] SHEN L, WEI X, JIA L. Surface defects detection of railway turnouts [C]//Hangzhou: 2015 34th Chinese Control Conference, 2015.
 [12] LI Y, OTTO C, HAAS N, et al. Component-based track inspection using machine-vision technology [C]//Trento: 1st International Conference on Multimedia Retrieval, 2011.
 [13] ZHANG L F, LI Y H. A traffic image quality evaluation method based on visual salience [J]. *Software Guide*, 2017, 16(10): 195-197, 201.
 张凌峰,李玉惠. 一种基于视觉显著性的交通图像质量评价方法 [J]. *软件导刊*, 2017, 16(10): 195-197, 201.
 [14] SINGH M, SINGH S, JAISWA L J, et al. Autonomous rail track inspection using vision based system [C]//Alexandria: 2006 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Homeland Security and Personal Safety, 2006.
 [15] TRINH H, HAAS N, LI Y, et al. Enhanced rail component detection and consolidation for rail track inspection [C]//Breckenridge: 2012 IEEE Workshop on the Applications of Computer Vision (WACV), 2012.
 [16] CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.
 [17] HOUGH P V. A method and means for recognizing complex patterns [P]. U.S., 3069654, 1962.
 [18] LEI X, OJA E, KULTANEN P. A new curve detection method: randomized Hough transform (RHT) [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, 11: 331-338.
 [19] LUO Y C, SUN R L. Machine vision theory and application [J]. *Software Guide*, 2014, 13(3): 13-14.
 罗尤春,孙容磊. 机器视觉理论及应用 [J]. *软件导刊*, 2014, 13(3): 13-14.
 [20] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.