

钢轨扣件横向偏移特征检测算法研究

王恩鸿 柴晓冬 钟倩文 李立明 张乔木

(上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘要 针对无砟轨道中钢轨扣件发生横向松动、脱离正常工作位置产生偏移的问题,提出一种钢轨扣件横向偏移检测方法。首先,该算法为解决传统的扣件图像定位不够精准问题,采用 k -means 聚类 and 类二值算法强化分割前景、背景与轮廓矩特征,实现对采集图像中扣件位置的精准定位;其次,不同于传统扣件特征提取采用复杂语义,提出一种基于机器视觉的轮廓分析方法,通过提取扣件的绝缘帽与螺母的轮廓特征,计算相邻绝缘帽间距和相邻螺母间距,并与安全状态下扣件轮廓特征计算得到的安全距离阈值进行对比,进一步计算偏移量,从而判断扣件是否发生横向松动。结果表明:该算法计算速度快,能够准确地定位弹条位置和偏移量,与传统的识别算法得到扣件的偏移量数据相比准确率显著提高,可达 98%。

关键词 钢轨扣件; 机器视觉; 特征提取; 轮廓特征矩; 偏移检测

中图分类号 U213.5; TP321

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.05.030

Research on Detection Algorithm of Lateral Offset Characteristics of Rail Fasteners

WANG Enhong, CHAI Xiaodong, ZHONG Qianwen, LI Liming, ZHANG Qiaomu

Abstract Targeting the problem that the fasteners in ballastless track are laterally loosened and off the normal working position, a lateral offset detection method of the track fastener is proposed. Firstly, the algorithm solves the problem that the conventional fastener image positioning is not accurate enough. The k -means clustering and class-like algorithm are used to strengthen the segmentation of foreground, background and contour moment features to achieve accurate positioning of the fastener position in the captured image. Secondly, different from conventional fastener feature extraction using complex semantics, a machine vision based contour analysis method is proposed, which calculates the spacing of adjacent insulating caps and the spacing of adjacent nuts by extracting the contour features of the insulating cap and nut of the fastener. Compared with the safety distance threshold calculated by the fastener profile feature in the safe state, the offset is further calculated to

determine whether the fastener is laterally loose. The experimental results show that the algorithm is fast and can accurately locate the position and offset of the spring. Compared with the conventional identification algorithm, the accuracy of the fastener is significantly improved, up to 98%.

Key words rail fasteners; machine vision; feature extraction; contour feature moment; offset detection

Author's address School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China

轨道检测是保障列车安全运行的重要手段,其中钢轨扣件检测是轨道检测的关键问题之一。目前较多使用人工检测的方式,存在效率低、不安全的缺点,虽然已经利用轨检车上线检测,但误检率仍然较高,存在一定的安全隐患。近年来,国内外专家对钢轨扣件检测问题进行了积极的探索,尤其对钢轨扣件检测算法进行了深入的研究。

文献[1]运用特定区域像素定位扣件区域,使用灰度特征和 HOG(方向梯度直方图)特征描述特征向量,通过 Chi 开方距离分类器实现对 ω 型扣件的断裂检测,具有一定的有效性和可行性。文献[2]利用枕肩定位,提取 PHOG(分层梯度方向直方图)特征和 MSLBP(多尺度局部二值模型)特征加权融合,提取扣件宏观纹理特征,采用 SVM(支持向量机)分类,对 ω 型扣件进行缺陷检测,定位特征不够显著,但鲁棒性强能够满足自动化检测。文献[3]利用 SIFT(尺度不变特征变换)提取扣件图片特征,进行归一化为 Fisher 向量,使用 Linlinear 分类,能够实现对 ω 型扣件图像检测,具有较高的识别率及鲁棒性。

以上算法在扣件检测中定位方面受扣件的复杂背景环境影响较大,对于扣件的特征提取,文献[5]改进了 LBP(局部二值模式)算法提取扣件的显著特征,利用模板匹配算法精确定位,以相邻两个扣件的差值判断实现自适应检测, LBP 特征显著,

有着很高的鲁棒性和适应性。文献[6]针对扣件存在形状变化、光照差异和异物遮挡的问题提出 GMPM(高斯混合部件模型)算法,将归一化的 HOG 作为 GMPM 的底层特征,误检率低。

目前,通常运用深度学习算法对 ω 型弹条扣件的断裂、缺失等损坏状态进行识别,主要针对 WJ-7、WJ-8 类型扣件进行检测。本文针对无砟轨道中带绝缘帽的、分开式扣件 Pandrol SFC 型弹条扣件的偏移松动进行检测,目前 Pandrol SFC 弹条扣件主要应用于无砟轨道。因为 Pandrol SFC 的扣件具有安装成本低、使用寿命长的优势,所以在未来的铁路应用上有着很大的空间。本文算法不但对 Pandrol DFC、Pandrol EF 型弹条扣件的松动检测有很大的参考价值,而且对 ω 型的弹条扣件特征提取也具有一定的参考价值。

本文提出了针对无砟轨道 Pandrol SFC 型弹条扣件的松动算法。首先,进行图像滤波预处理,获得噪声影响相对较小的扣件图像;其次,对预处理图像进行背景分离,滤除图像中无效信息,获取并定位图像中的扣件区域,进行类二值强化,滤除图像中的杂波,获得突出的扣件背景分离后的图像;再次,为了精确计算扣件偏移量,采用连通性对扣件的图像进行轮廓特征提取;最后,通过轮廓特征精确定位扣件、两个螺母和两个紧扣垫的关键位置,连接形成四边形,对所取得的扣件 4 点的位置特征与安全状态下的扣件特征进行偏移量的计算,可得出扣件横向松动偏移量,从而判断扣件状态。

1 扣件横向偏移算法原理

图 1 给出了钢轨扣件横向偏移算法的流程图。通过降噪标准化处理,获得了噪声小、运算量少的标准图像;再通过聚类二值强化对扣件图像前景、背景进行分离,利用聚类算法进行扣件前景、背景分割二值强化,采用矩不变原理滤掉不相关特征,进行关键特征定位;最后通过关键四边形的关系计算扣件的横向偏移量。

1.1 图像标准化降噪

用线阵相机拍采集到的图像分辨率为 4 096 像素 \times 2 048 像素,与实际的扣件图像等比例。为了减少噪声干扰,对原始扣件图像进行灰度化和高斯滤波处理,效果如图 2 所示。

1.2 扣件图像背景分割原理

背景分割是对扣件图像特征提取和识别的基

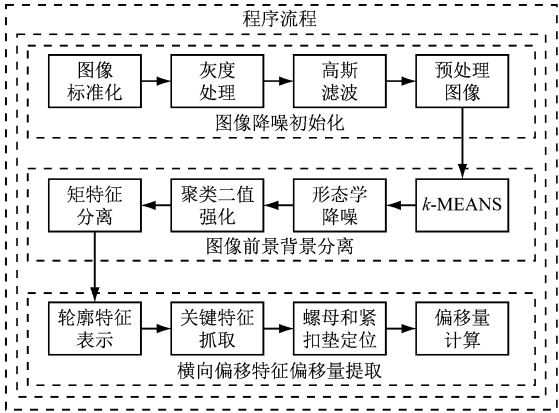
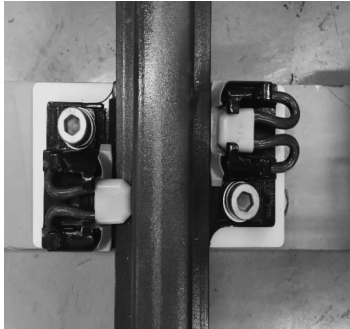
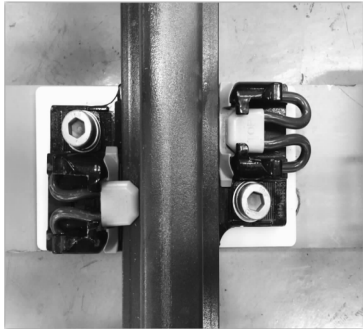


图 1 钢轨扣件横向偏移算法流程框图



a) 线阵相机采集原图



b) 灰度化和高斯滤波处理效果图

图 2 图像标准化降噪效果图

础。传统的图像分割方法有 OTSU^[7]法、分水岭法^[8]、 k -means^[9]算法。传统的分割算法在突出扣件图像的特点与均匀分布图像的像素两个方面有较大劣势。OTSU 算法易产生大量噪点,分水岭算法易产生过度分割的缺陷。为了分离扣件与背景,采用 k -means 聚类分析来衡量像素点之间的亲疏程度,实现像素的分割。

k -means 聚类算法是将像素按照一定的数据隶属度大小完成数据的归类划分,相似性高的像素划分一类,未被划分的相似度较低,对于 k -means 聚类算法具体描述如下。

图像的像素集合 M 聚合到 k 类中,产生以 $V =$

$\{V_i\} (i=1,2,\dots,k)$ 为聚类中心的 k 类结果。通过迭代使得目标函数收敛,最终完成聚类 and 图像的分割,通过 k -means 算法将原始图像进行扣件前景和背景的分离,突出扣件和背景之间的明显差别,效果显著。三种背景分割算法的效果图如图 3 所示。

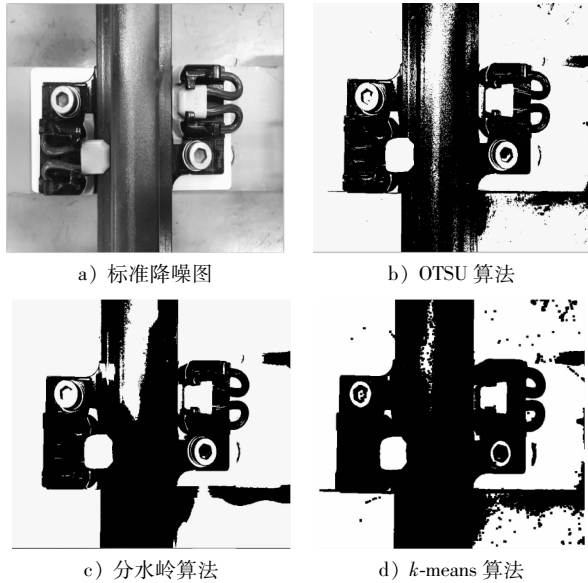


图3 三种背景分割算法效果图

针对扣件图像的特殊性,为了最大化保留扣件的特征,对扣件采用簇的数目大小为 4 的聚类方法,即将扣件图像分为 4 簇,以最少的簇产生最大的特征,并对聚类后的图像进行二值强化处理。将原来的 4 类像素通过阈值转化成为 2 类像素,由原来的三通道变为单通道的二值像素。

2 扣件横向偏移特征变换

2.1 扣件轮廓特征提取

2.1.1 轮廓提取

为了保证目标轮廓提取的完整性,采用最短路径的闭环搜寻方案,针对基于虚拟连接的显著图中的非闭合轮廓线获取最短路径。假设轮廓图像中存在 M_e 个非闭合端点,任意的 2 个非闭合端点 e_p 、 e_q 之间的路径长度 $L(e_p, e_q)$,同两点间的欧式距离呈正相关关系,同连接 e_p 呈负相关关系。因此,对两者进行归一化处理,取得 $L(e_p, e_q)$ 的路径长度为:

$$L(e_p, e_q) = \frac{\|e_p, e_q\|_2}{\xi_j} \quad (1)$$

通过反复迭代连接短路径的端点,可形成多个封闭环形轮廓线,能够有效地保证轮廓目标的完整

性。图 4 为扣件轮廓提取效果图。

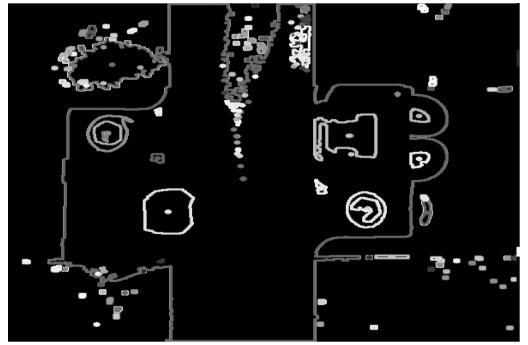


图4 扣件全局轮廓效果图

2.1.2 关键轮廓矩特征分离

根据 Hu 矩不变理论,通过提取矩特征可准确识别定位。用对曲线的积分代替区域的积分,则:

$$m_{p,q} = \int_C x^p y^q ds, \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

$$ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} \quad (3)$$

式中:

$m_{p,q}$ ——Hu 矩;

x ——图像横坐标;

y ——图像纵坐标;

C ——图像中所有点。

当 $p=0, q=0$ 时,代表沿曲线 C 的线性积分,由此可以看出, m_{00} 是曲线的弧长,可获得二值图像的连通域面积,重心为 $\bar{x} = \frac{m_{1,0}}{m_{0,0}}, \bar{y} = \frac{m_{0,1}}{m_{0,0}}$ 。 $(p+q)$ 阶中心矩可定义为:

$$\mu_{p,q} = \iint_C (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q ds \quad (4)$$

$$\varphi_1 = \mu_{2,0} + \mu_{0,2}$$

$$\varphi_2 = (\mu_{3,0} + 3\mu_{1,2})^2 + (3\mu_{1,2} - \mu_{0,3})^2$$

$$\varphi_3 = (\mu_{3,0} - 3\mu_{1,2})^2 + (3\mu_{1,2} - \mu_{0,3})^2$$

$$\varphi_4 = (\mu_{3,0} - \mu_{1,2})^2 + (\mu_{2,1} + \mu_{0,3})^2 \quad (5)$$

$$\varphi_5 = (\mu_{3,0} - 3\mu_{1,2})(\mu_{3,0} + \mu_{1,2}) \times [(\mu_{3,0} + \mu_{1,2})^2 - 3(\mu_{2,1} + \mu_{0,3})] + (3\mu_{2,1} - \mu_{2,1})(\mu_{2,1} + \mu_{0,3}) \times [3(\mu_{3,0} + \mu_{1,2})^2 - (\mu_{2,1} + \mu_{0,3})^2] \quad (6)$$

$$\varphi_6 = (\mu_{2,0} - \mu_{0,2})[(\mu_{3,0} + \mu_{1,2})^2 - (\mu_{2,1} + \mu_{0,3})^2] + 4\mu_{1,1}(\mu_{3,0} + \mu_{1,2})(\mu_{2,1} + \mu_{0,3}) \quad (7)$$

$$\varphi_7 = (3\mu_{2,1} - \mu_{0,3})(\mu_{3,0} + \mu_{1,2}) \times [(\mu_{3,0} + \mu_{1,2})^2 - (\mu_{2,1} + \mu_{0,3})^2] - (\mu_{3,0} - 3\mu_{1,2})(\mu_{2,1} + \mu_{0,3}) \times$$

$$[3(\mu_{3,0} + \mu_{1,2})^2 - (\mu_{2,1} + \mu_{0,3})^2] \quad (8)$$

获取安全状态下扣件的 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 、 φ_4 、 φ_5 、 φ_6 、 φ_7 ，进行特征提取，并且获得 4 个关键轮廓的 4 个中心点坐标及标准安装的矩形度和扁形度：

$$s = a/b \quad (9)$$

$$e = r_i/r_c \quad (10)$$

式中：

s ——提取轮廓的矩形度，越接近 1 则轮廓越接近方形，则轮廓越接近紧扣垫的轮廓；

a ——轮廓的长；

b ——轮廓的宽；

e ——轮廓的扁形度；

r_i ——轮廓内切圆半径；

r_c ——轮廓外接圆的半径，越接近圆该轮廓越接近螺母轮廓。

第一层筛选：先对所有轮廓的中心坐标进行阈值筛选，以缩小非相关轮廓，减少计算量。

第二层筛选：通过计算扣件的圆形度和矩形度，对第一层留下的扣件进行筛选。

第三层定位与识别：矩特征如不变，将剩余轮廓特征值与标准安装不发生偏移的扣件进行对比，进行分类筛选。

利用层筛公式：

$$W = \omega_1\varphi_1 + \omega_2\varphi_2 + \omega_3\varphi_3 + \omega_4\varphi_4 + \omega_5\varphi_5 + \omega_6\varphi_6 + \omega_7\varphi_7 \quad (11)$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 + \omega_6 + \omega_7 = 1 \quad (12)$$

式中：

ω_1 — ω_7 ——不同的权重参数。

图 5 为三层分离方法的效果图。

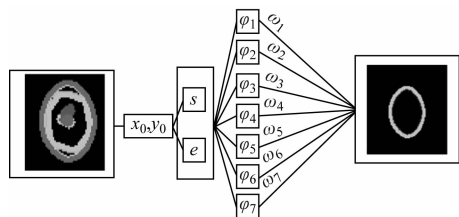


图 5 扣件三层分离关键特征提取

通过以上方式获取关键特征轮廓，基于轮廓的中心坐标定位出扣件的 4 个关键轮廓、扣件的 2 个螺母轮廓和扣件的 2 个紧扣垫轮廓。

通过以上步骤，可获得扣件关键部分的轮廓特征属性，最终输出结果，如图 6 所示。图中：a2、b2、c2 为经过 4 簇 k -means 聚类二值化效果；a3、b3、c3 为扣件轮廓特征提取算法效果；a4、b4、c4 为经过扣

件特征提取后对扣件关键轮廓特征提取效果；a2、a3、a4 为扣件发生向左的偏移结果；b2、b3、b4 为安全状态下的扣件的效果图；c2、c3、c4 为扣件发生向右偏移的效果。

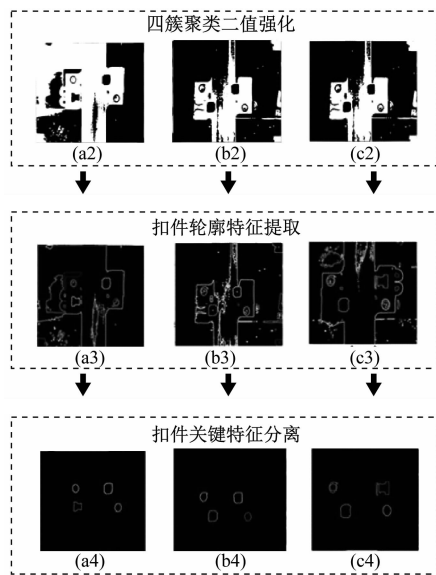


图 6 扣件关键特征提取效果图

2.2 扣件偏移量提取

根据扣件的安装标准，得到在安全状态下扣件上部的螺母关键轮廓和扣件紧扣垫轮廓，以及扣件下部的关键螺母与紧扣垫轮廓的中心坐标首尾连接起来的平行四边形，如图 7 所示。

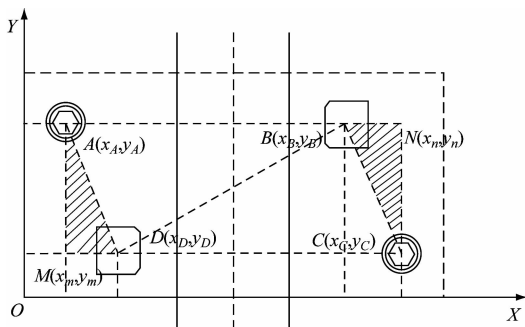


图 7 扣件关键轮廓特征示意图

在实际扣件图像中，当检测的目标扣件发生带旋转的横向偏移时，如图 8 所示，将 A （上部螺母轮廓中心）、 B （上部紧扣垫轮廓中心）、 C （下部螺母轮廓中心）、 D （下部紧扣垫轮廓中心）首尾相连得到扣件关键四边形 $ABCD$ 。当扣件发生横向偏移、带旋转的横向偏移时，通过关键特征提取能提取到扣件轮廓的关键特征，从而形成关键四边形。当扣件不发生横向偏移时，扣件关键四边形为平行四边

形;当发生偏移时关键点产生位移时,使四边形发生形变。通过对比采集图像提取关键四边形与扣件在安全状态下的图像提取的平行四边形比值,可计算扣件的横向偏移量。

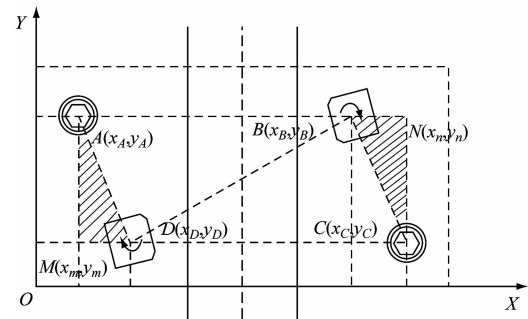


图8 扣件带旋转的横向偏移示意图

计算扣件四边形 $ABCD$ 的面积如下:

$$S_{ABCD} = S_{ABD} + S_{BCD} \tag{13}$$
$$S_{ABD} = \frac{1}{2}(x_A y_B + x_B y_D + x_D y_A - x_A y_D - x_B y_A - x_D y_B) \tag{14}$$
$$S_{BCD} = \frac{1}{2}(x_B y_C + x_B y_D + x_C y_D - x_C y_B - x_D y_B - x_D y_C) \tag{15}$$

通过以上计算可获得 S_{ABCD} 面积,计算偏移量为:

$$\lambda = \frac{S_{A_1B_1C_1D_1}}{S_{ABCD}} \tag{16}$$

式中:

- $S_{A_1B_1C_1D_1}$ ——采集扣件的图像面积;
- S_{ABCD} ——安全状态下扣件轮廓特征面积。

在图像中,可通过测得上部偏移量 AB 为 α 、 CD 为 β ,来验证偏移量的准确性,并且可对扣件的偏移量进行精准校验。图9为偏移面积的效果图。图9中,a5为扣件发生向左偏移的4个关键位置形成的平行四边形效果图,b5为安全状态4个关键位置形成平行四边形效果图,c5为扣件发生向右的横向偏移效果图。

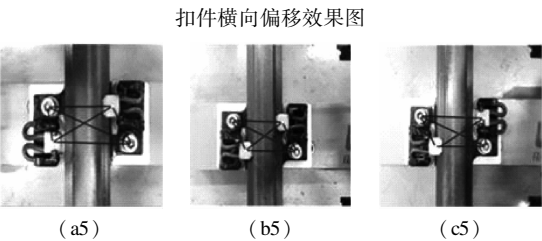


图9 扣件横向偏移效果图

3 结果验证与分析

3.1 扣件横向偏移算法试验

为了对算法进行验证,采用线阵相机试验台采集到1 000张扣件图像。试验环境是在Windows下运用OpenCV计算机视觉库,采用C++语言在Visual Studio 2015环境下实现的。

本次试验体现了扣件横向偏移算法对扣件是否发生横向偏移的准确性与快速性。将1 000张试验图片进行处理。其中:150张扣件左边发生偏移(30张为带旋转的横向偏移);另外150张扣件向右发生偏移(其中30张是带旋转的横向偏移);剩余700张处于安全状态。将此1 000张图片用本文算法计算的结果如表1所示。

表1 扣件图像偏移量表

图片编号	λ	α/mm	β/mm
000	1.057 5	23	0
001	1.040 0	8	8
002	1.007 5	3	0
003	1.025 0	10	0
004	1.005 0	1	1
005	1.070 0	13	15
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
1 000	1.075 0	30	0

表1中: λ 为横向偏移算法计算得到的偏移量; α 与 β 是计算出的上部偏移量和下部偏移量,并且可以验证扣件的横向偏移的准确性。

3.2 试验结果分析

根据Pandrol SFC型弹条扣件的安装技术标准,可得到Pandrol SFC型弹条扣件安全状态下的参数,如表2所示。

表2 Pandrol SFC 弹条扣件安全参数标准表

参数	安全状态参数值
λ	$<1.008\ 5$
α/mm	$0\sim1.7$
β/mm	$0\sim1.7$

由表2弹条扣件安全状态下的参数,与采集到的1 000张图片试验结果进行对比,检测出发生偏移的扣件结果如表3所示。

表 3 扣件横向偏移算法检测结果表

试验情况	图片数/张		
	扣件向左 横向偏移	扣件向右 横向偏移	扣件处于 安全状态
试验设定	150	150	700
试验结果	147	148	700
占比/%	98.0	98.7	100

经过试验可验证算法的可靠性,通过对比设置试验的表格可以看出,算法的可靠性达到 98%。在试验的结果中,2 个扣件向左横向偏移未检出,3 个向右横向偏移未检出,原因为量值较小。在试验的同时,记录算法特征提取部分所消耗的时间,并与 OTSU 特征提取算法和分水岭特征提取算法进行对比,经过试验证明,采用本文算法比 OTSU 特征提取处理算法速度提升了 16%。

4 结论

本文提出了一种针对 Pandrol SFC 型弹条扣件脱离安全位置问题的横向偏移计算方法。首先,利用图像降噪标准化得到图像,进行聚类二值强化和边界分割提取;其次,对处理后的图像进行图像轮廓提取,运用矩不变原理和安全扣件属性对轮廓进行筛选,获得关键轮廓并且定位出 2 个螺母和紧扣垫;最后,对比计算扣件关键四边形的面积计算偏移量。本文提出了一种新型的检测扣件是否发生横向偏移的方法,识别精度能达到 98%,特征提取的速度相对于传统特征提取算法提高了 16%,对于目前扣件横向松动的检测具有一定的应用价值。

(上接第 141 页)

制动电阻联合工作时的阈值优化方法。仿真结果表明:在单车制动时,该方法能够有效地提高再生制动能量回收率,较初始的阈值状态能量回收率提高了 1.1%,从长期来看可以带来可观的经济效益;在多车制动时,列车受电弓处网压始终维持在 1 800 V 以下,可避免再生制动失效情况的发生。

参考文献

[1] 赵洋,梁海泉,张逸成. 电化学超级电容器建模研究现状与展望[J]. 电工技术学报,2012(3):188.

参考文献

[1] 刘馨,穆颖,张斌. 基于计算机视觉的钢轨扣件检测算法研究[J]. 华东交通大学学报,2017(2):72.
[2] 刘甲甲,李柏林,罗建桥,等. 融合 PHOG 和 MSLBP 特征的铁路扣件检测算法[J]. 西南交通大学学报,2015(2):256.
[3] 赵珊珊,何宁,曹珊. 基于 SIFT 特征的铁路扣件状态检测算法[J]. 传感器与微系统,2018(11):148.
[4] 王强,李柏林,侯云,等. 一种改进的 LBP 特征实现铁路扣件识别[J]. 西南交通大学学报,2018(5):893.
[5] 范宏,侯云,李柏林,等. 高铁扣件的自适应视觉检测算法[J]. 西南交通大学学报,2020(4):896.
[6] 何彪,李柏林,罗建桥,等. 基于高斯混合部件模型的铁路扣件检测[J]. 西南交通大学学报,2019(3):640.
[7] 丁锐,刘甲甲,李柏林,等. 改进的 Otsu 图像多阈值分割方法[J]. 计算机应用,2013(增刊1):214.
[8] 路正佳. 基于改进分水岭算法的彩色图像分割方法[J]. 科技通报,2018(9):172.
[9] 薛晨杰. 基于异常检测的改进 k-means 算法研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2019.
[10] 张雨,王志晖,李柏林. 基于截线法的铁路扣件骨架提取算法[J]. 铁道标准设计,2019(4):69.
[11] LIU X, WANG H B, ZHOU B. Research on detection algorithm for rail fastener based on computer vision [C]// Proceedings of 2nd International Conference on Mechanical, Electronic, Control and Automation Engineering (MECAE 2018). 2018:622-667.
[12] 李爽,李柏林,罗建桥,等. 基于上下文语义信息的铁路扣件状态检测[J]. 传感器与微系统,2018(8):130.
[13] 韩金岳. 图像处理中的铁路扣件定位方法[J]. 机械研究与应用,2018(3):182.
[14] 吴禄慎,万超,张丛. 轨道扣件检测特征提取算法研究[J]. 机械设计与制造,2018(8):5.

(收稿日期:2019-05-14)

[2] 马丽洁,廖文江,高宗余. 城轨列车车载超级电容储能控制策略研究[J]. 电工技术学报,2015(1):63.
[3] 林仕立,宋文吉,胡婧娴,等. 轨道交通车辆再生制动能量及利用率的仿真研究[J]. 城市轨道交通研究,2014(5):59.
[4] 赵亚杰. 基于动态阈值调节的地面式超级电容储能系统控制策略优化[D]. 北京:北京交通大学,2015.
[5] 陈怀鑫. 基于混合粒子群算法的城轨交通超级电容储能系统能量管理和容量配置优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
[6] 诸斐琴,杨中平,林飞,等. 城轨交通牵引供电系统参数与储能系统容量配置综合优化[J]. 电工技术学报,2019(3):579.

(收稿日期:2019-05-14)