

文章编号 1004-924X(2009)04-0901-08

列车车轮踏面缺陷的图像区域提取

赵 勇,方宗德,田丽丽

(西北工业大学 机电学院,陕西 西安 710072)

摘要:建立了基于机器视觉的踏面缺陷检测系统,研究了该系统的踏面缺陷图像区域提取技术。采用基于平稳小波自适应阈值算法提取踏面区域;然后,根据踏面剥离缺陷图像特征,利用基于分块思想的粗定位和精定位组合的方法提取剥离图像区域;最后,根据踏面擦伤缺陷图像特征,利用基于踏面边缘线扫描搜索擦伤区域的方法提取擦伤图像区域。用两个实例验证了提出方法的有效性,实验结果表明:系统对剥离和擦伤两种缺陷的漏识率分别为8.3%和5.3%,误识率为5.1%,从而为后续特征提取和缺陷识别奠定了基础。

关键词:车轮踏面;缺陷区域提取;剥离;擦伤

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A

Defect region extraction in images of train wheel tread

ZHAO Yong, FANG Zong-de, TIAN Li-li

(School of Mechatronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to realize defect inspection for train wheel treads, a defect inspecting system of the train wheel treads based on computer vision is established and defect region extraction techniques for the images of the train wheel treads are investigated. The tread region is extracted by an adaptive thresholds algorithm, then, a method combining the approximate location based on the block segmentation with the accurate location is adopted to extract the burning defect regions, and the peeling defect extraction method based on searching tread edge lines is used to extract the peeling defect regions. Two experimental examples are carried out to verify the effectiveness of the proposed method. The experimental results indicate that the missing recognition rates of the burnings and peelings are 8.3% and 5.3%, respectively, and false acceptance rate is 5.1%, which shows that proposed method can lay the basis for the feature extraction and defect recognition further.

Key words: train wheel tread; defect region extraction; burning; peeling

1 引言

列车车轮的踏面擦伤与剥离是车辆在运行过

程中形成的一种常见的不规则表面缺陷。由制动、轮对与钢轨间隙的冲撞以及轮对与钢轨面在转弯时的相对滑动等因素造成的踏面擦伤或剥离,给车辆运行带来附加的冲击振动,严重影响了

列车与轨道设施的安全和使用寿命^[1]。

目前车辆检修部门对运行列车车轮踏面缺陷的检查仍然是在列车停止时通过列检人员的肉眼观测或车辆运行时听音检查来掌握,劳动强度大,占用机车周转时间,无法及时了解车轮在运行中的质量状况。机器视觉检测技术具有速度快、精度高、重复性好等优点,在尺寸检测和缺陷检测方面得到了广泛的应用^[2-4],因此利用机器视觉检测技术代替人工检测车轮是一种可行的方法,研究机器视觉的车轮踏面缺陷动态检测系统对保证列车运行安全有一定的实用价值。动态检测是指对正在运行中的列车车轮进行的检测,区别于检修车间中的自动检测与人工检测。

在基于机器视觉的车轮踏面缺陷动态检测系统中,踏面缺陷图像区域的提取是一个至关重要的环节。踏面缺陷图像由于其信噪比低,踏面缺陷分布在踏面表面,踏面表面灰度分布不均匀等特点,采集传统的最大类间方差法、最小误差法等单阈值分割法很难准确地提取出踏面缺陷图像区域,因此有必要研究有效的踏面缺陷图像提取技术,以保证检测的正确率,为后续缺陷识别和测量奠定基础。

基于此,本文建立了基于机器视觉的车轮踏面缺陷动态检测系统,提出了基于平稳小波自适应阈值踏面区域分割算法,然后给出了一种基于分块思想粗定位和精定位组合提取剥离缺陷的算法,最后基于踏面边缘线扫描搜索完成了擦伤区域的提取。实验结果表明,本文所提出算法可以有效地进行踏面缺陷图像的区域提取。

2 基于机器视觉的列车车轮踏面缺陷动态检测系统

系统总体结构如图 1 所示,整套系统由左侧车轮检测装置、右侧车轮检测装置、交换机和高速计算机组成。

左侧车轮检测装置、右侧车轮检测装置分别安装在铁轨两侧,均由 3 台千兆网数字摄像机、3 个光源,3 个车轮检测器和保护罩组成。理想情况下,每隔 1/3 踏面周长布置一个摄像机,相邻摄像机采集到的图像之间既没重叠,也没间隙,从而保证了对踏面无重复、无遗漏检测,但是这样的结

构要求每个摄像头都有很高的定位精度,实现起来有一定难度。系统中采用相邻摄像机采集的图像有少量的重叠,以保证无遗漏的检测。

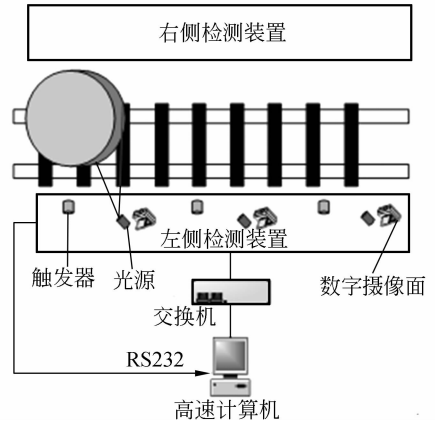


图 1 系统总体结构

Fig. 1 System constitution

检测时,首先打开光源,任一个车轮探测器探测到车轮后,即请求高速计算机通知摄像机采集踏面表面图像,采集到的图像通过以太网经过交换机传送到高速计算机内,用高速计算机来实现踏面缺陷的图像处理和模式识别以及控制。整套装置安装在车辆段和机务段,检测时列车速度控制 15 km/h 范围内。

3 基于离散平稳小波自适应阈值的踏面区域分割

3.1 离散平稳小波^[5]

离散正交小波变换是非冗余的小波变换,在计算过程中每一级变换后,其数据长度减半,尺度 j 越大,细节系数和近似系数就越少。离散平稳小波变换是在正交小波变换基础上提出的一种非正交小波变换方式,平稳小波变换与离散正交小波变换的不同之处在于每一次滤波后不进行下采样,而是对 j 级的高通滤波器 $\{G_j\}$ 和低通滤波器 $\{H_j\}$ 的每 2 个系数间插 $2^j - 1$ 个 0 来实现滤波器的扩展,第 $j+1$ 级采用的图像是第 j 步滤波器的上采样,随着分解步数的增加,滤波器逐步变大。在平稳小波变换中,对一幅图像的行和列分别采

用高通和低通滤波器滤波,分解成4组图像,即近似图像,水平细节图像,垂直细节图像和对角细节图像。离散平稳小波变换是一种冗余非正交小波变换,是连续小波变换的一种更好的近似,它加大了小波变换在时间轴上的栅格密度,使得各级尺度上的近似系数和细节系数的长度均等于原信号长度,即在各级尺度上所得到的4幅图像与原图像尺寸一致。

3.2 小波变换在边缘检测中的应用^[6]

设 $\theta(x, y)$ 是二维平滑函数,定义

$$\Psi^1(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} \theta(x, y),$$

$$\Psi^2(x, y) = \frac{\partial}{\partial y} \theta(x, y).$$

函数 $\Psi^1(x, y), \Psi^2(x, y)$ 是二维小波,如取 $s = 2^j$, 记

$$\Psi_{2^j}^1(x, y) = \frac{1}{2^{2j}} \Psi^1\left(\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j}\right),$$

$$\Psi_{2^j}^2(x, y) = \frac{1}{2^{2j}} \Psi^2\left(\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j}\right).$$

则图像 $f(x, y) \in L^2(\mathbb{R}^2)$ 关于 $\Psi^1(x, y), \Psi^2(x, y)$ 的小波变换具有两个分量

$$W_{2^j}^1 f(x, y) = f * \Psi_{2^j}^1(x, y),$$

$$W_{2^j}^2 f(x, y) = f * \Psi_{2^j}^2(x, y).$$

$W_{2^j}^2 f(x, y)$ 称为 $f(x, y)$ 的二进制小波变换, 矢量形式为:

$$\begin{bmatrix} W_{2^j}^1 f(x, y) \\ W_{2^j}^2 f(x, y) \end{bmatrix} = 2^j \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (f * \theta_{2^j}(x, y)) \\ \frac{\partial}{\partial y} (f * \theta_{2^j}(x, y)) \end{bmatrix} = 2^j \nabla (f * \theta_{2^j}(x, y)),$$

其中, $\nabla f(x, y)$ 是函数 $f(x, y)$ 的梯度向量。

定义梯度向量的模值和相角分别为:

$$M_{2^j} f(x, y) = \sqrt{(W_{2^j}^1 f(x, y))^2 + (W_{2^j}^2 f(x, y))^2}, \quad (1)$$

$$A_{2^j}(f(x, y)) = \arctan(W_{2^j}^2 f / W_{2^j}^1 f). \quad (2)$$

梯度方向指向梯度模极大值的方向,所以只要沿着梯度方向检测小波变换系数模的局部极大值点即可得到图像的边缘点。

3.3 本文算法

由于踏面剥离和擦伤分布在踏面的表面,对图像中其余无关部分的运算会加大图像数据处理

量,降低定位工作的效率。结合平稳小波冗余性和平移不变性特点,提出了基于离散平稳小波自适应阈值的踏面区域分割方法,将目标区域从图像背景区域提取出来,后续的缺陷区域提取限制在这个区域进行。实现过程如下:

(1)对原始图像 $f(x, y)$ 进行平稳小波分解。

(2)根据式(1)和式(2)计算得出每个尺度下的模值和相角矩阵。

(3)采用非极大值抑制法将梯度相角按照邻接位置划分为8个方向即 3×3 矩阵模板,将模图像分别沿各自的相角方向求得模的局部极大值点,生成可能的边缘图像。

(4)对各尺度的边缘图像设置自适应阈值,大于阈值的边缘点保留,小于阈值的边缘点为零。按照如下方法确定阈值 T_d :采用 $n \times n$ 的窗口,对每一层的边缘图像进行扫描,由窗口内的模值系数求出阈值,计算公式如下:

$$T_d = T_0 + a \times \sum_{i,j} M f_{i,j},$$

式中: T_d 为窗口内阈值; T_0 为初始值, $M f_{i,j}$ 为当前窗口对应的模值系数, a 为比例系数,可根据实际情况调整。需要指出的是,窗口大小的确定对采用自适应阈值方法至关重要。若窗口太小,则图像噪声和灰度不均匀对阈值的影响增大,误检率提高,若窗口太大,图像中的微弱边缘易被滤去,达不到好的检测效果。因此,要根据实际图像的特点合理选择窗口的大小,以达到好的检测效果(本文中采用 32×32 的窗口)。

(5)从最大尺度 j 开始,针对尺度 j 的每一个边缘像素搜索 $j-1$ 尺度下可能的边缘图像中相应的面积为 3×3 的匹配区域,该匹配区域中出现的所有可能边缘点均标记为候选边缘点,得到 $(j-1)$ 尺度下的候选边缘点,图像 $C^{j-1}(x, y), C^{j-1}(x, y)$ 中候选边缘点标记为零。

(6)将 $j-1$ 尺度下的候选边缘点图像 $C^{j-1}(x, y)$ 中模相近、相角相似的非零像素点链接,删除长度小于阈值 ν^{-1} 的孤立链,得到单像素宽的图像边缘 $E^{j-1}(x, y)$ 。

(7)依次循环,直到 $j=1$ 时为止,边缘图像 $E^1(x, y)$ 即为综合后形成的边缘图像,也就是最终所要得到的多尺度综合后的边缘图像。

(8)采用轮廓跟踪法跟踪边缘,去除链码长度小于一定阈值的线段。

(9)判断保留下的不同的两条边缘线之间的最大距离 \max 和最小距离 \min ,把满足 $\max < T_{\max}$ 且 $\min > T_{\min}$ 的两条线保留下来,其他干扰线去除, T_{\max} 和 T_{\min} 根据标准轮子的宽度确定,保留下来的两条边缘线一条是踏面边缘线,另外一条是轮缘边缘线。

(10)从保留的两条边缘线中选择长度最大的一条边缘线,如果该边缘线位于另外一条边缘线的右侧,则该边缘线为踏面边缘线,向轮缘方向平移标准踏面图像宽度,得到踏面区域的另外一个踏面边缘线;如果该边缘线位于另外一条边缘线的左侧,则该边缘线为轮缘边缘线,向踏面方向依次平移标准轮缘图像宽度和标准车轮宽度得到踏面区域的两条踏面边缘线,截取边缘线之间的图像区域就是踏面区域。

图 2 和图 3 分别是踏面剥离和擦伤的原始图像和踏面区域分割后截取的踏面区域。



(a)原图

(a) Original image



(b)踏面区域

(b) Tread region

图 2 剥离原图和踏面区域

Fig. 2 Peeling image and tread region



(a)原图

(a) Original image



(b)踏面区域

(b) Tread region

图 3 擦伤原图和踏面区域

Fig. 3 Peeling image and tread region

4 轮对踏面缺陷区域提取

在踏面区域分割的基础上,根据缺陷特征设计了两种不同的缺陷提取算法。

4.1 剥离及擦伤特征分析

剥离区域具有一定的尺寸,剥离区域灰度范围变化较大,但是其均值在一定范围内,与其他区域对比明显。擦伤具有一定面积,纹理沿踏面边缘线方向分布,而且擦伤线的灰度变化小,这也是区别剥离最重要的一个特征。

4.2 踏面剥离图像缺陷区域提取

踏面剥离图像缺陷区域提取分为粗定位和精定位两个步骤。

4.2.1 粗定位

粗定位的目的是找到剥离区域大概位置,直接对整幅图像进行阈值分割是行不通的,因为图像预处理后仍然有孤立的斑点并且图像踏面缺陷区域灰度范围大,所以很难采用精确的阈值提取出缺陷边界。为此,根据踏面剥离特征,设计了一

种基于分块思想的踏面剥离区域分割定位方法。所谓分块思想就是根据 3.3 节得到的踏面边缘线,按照踏面边缘线方向和水平方向将踏面区域划分为若干栅格,栅格大小为 10×10 ,根据剥离最小尺寸,将横向 2 个栅格和踏面边缘线方向 3 个栅格图像区域定义为 1 个特征区域,粗定位过程针对特征区域进行分析。具体过程如下:

1)扫描第 j 个栅格组成的特征区域,判断特征区域内灰度均值 A 和方差 D ,若 $T_l < A < T_h$ 且 $D > T_f$,对特征区域对应栅格进行标记。其中阈值 T_l, T_h 和 T_f 根据剥离样本统计确定。

2)迭代循环 $j=j+1$,转步骤 1),直到栅格组成特征区域判断完毕。

3)将标记的栅格区域用四连通种子填充算法连接起来,构成多个分离的连通区域,同时找出它们的上下左右边界。

4.2.2 精定位

精定位是在粗定位的基础上找到剥离区域的精确边界,用来进行后续特征提取和尺寸的测量,算法实现如下:

1)对粗定位找到的剥离区域进行 Canny 边缘检测。

2)初步确定第 j 个粗定位的剥离区域上边界对应的栅格区域。具体做法为:在第 j 个粗定位的剥离区域内,以粗定位剥离区域的左边界为起始位置,从左到右,从上到下扫描栅格,判断栅格内图像像素值为零的像素个数,如果超过阈值 T_{num} ,则标记该栅格,然后,继续扫描下一列栅格,并且以同样方式判断,直到扫描到第 j 个粗定位的剥离区域对应的右边界停止搜索。在此取 T_{num} 为 4。利用同样方法初步确定第 j 个粗定位的剥离区域的右边界、下边界和左边界的栅格区域。

3)确定第 j 个粗定位的剥离区域对应上边界的边缘点。具体做法为:在第 j 个粗定位的剥离区域内,以粗定位剥离区域的左边界为起始位置,从左到右,从上到下扫描上边界对应栅格区域内的像素,如果扫描到该列的一个像素点为边缘点,则标记该边缘点,然后,跳向下一列继续扫描,直到扫描到粗定位的剥离可疑区域的右边界停止。利用同样方法确定右边界的边缘点、下边界的边缘点、左边界的边缘点。

4)连接第 j 个粗定位的剥离区域的边缘点。

具体做法为:用轮廓跟踪法跟踪第 j 个粗定位的剥离区域内标记的栅格并记录跟踪的栅格顺序,然后在第一个栅格内从下到上,从左到右搜索到的第一个像素为零的点作为起始点,按记录的栅格跟踪顺序用“爬虫”边界跟踪法^[7]跟踪栅格内的边缘点,直到跟踪到起始点为止。“爬虫”边界跟踪法:在边界跟踪过程中,如果边界局部连续,那么用小窗口“爬虫”(3×3)一定可以找到当前点(“爬虫”窗口中心点)的连接点,如果遇到边界断点,则将窗口放大到 5×5 大小,在窗口最外层寻找边缘点,如果找到连接点,便将窗口缩回到 3×3 大小,否则继续放大窗口到 7×7,9×9 等大小,而在窗口最外层搜索边缘点,直到搜索到边缘点为止,再将窗口变回到最小的规模即 3×3 大小,继续跟踪边界,如此循环,直到搜索到起始点。3×3 以上规模的放大窗口找到了相邻边缘点,则将中间的断裂点按填充规则进行填充。断点填充规则如下:以 7×7 窗口为例,如图 4 所示,当前像素点 0 (即窗口中心像素),设其坐标 (x_0, y_0) ,若连接点为 01,设其坐标 (x_1, y_1) ,0 点与 01 点的位置关系为 $x_1 > x_0$ 且 $y_1 < y_0$,则填充 1、2、3、4 像素;若连接点为 02,设其坐标 (x_2, y_2) ,0 点与 02 点的位置关系为 $x_2 > x_0$ 且 $y_2 > y_0$,则填充 5、6、7、8 像素;若连接点为 03,设其坐标为 (x_3, y_3) ,0 点与 03 点的位置关系为 $x_3 < x_0$ 且 $y_3 > y_0$,则填充 9、10、11、12、13 像素;若连接点为 04 设其坐标为 (x_4, y_4) ,0 点与 04 点的位置关系为 $x_4 < x_0$ 且 $y_4 < y_0$,则填充 14、15、16、17 像素;若连接点在 0 点的水平方向和垂直方向,则直接按水平方向和垂直方向进行填充。其他窗口的填充规则以此类推。

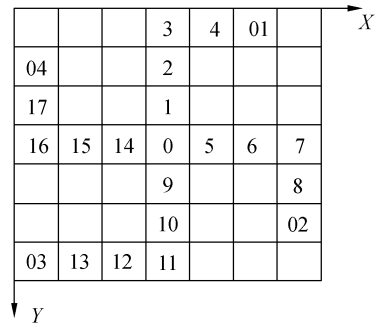
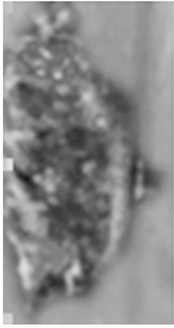


图 4 7×7 窗口断点填充规则

Fig. 4 Break point filling rules of 7×7 window

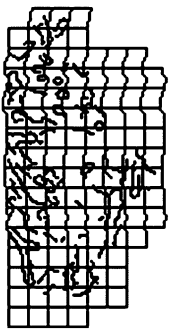
5) $j=j+1$, 转向步骤 2), 直到所有剥离区域提取完毕。

图 5 为对图 2(b)中的踏面剥离缺陷区域提取过程。其中图 5(a)为粗定位结果;图 5(b)为对粗定位区域边缘检测结果和保留的栅格区域;图 5(c)中的栅格为初步确定的边界栅格;图 5(d)中栅格中的黑色像素点为确定的剥离区域的边界边缘点;图 5(e)中的白色曲线为连接的剥离区域的边界,即精定位最终结果。



(a) 粗定位区域

(a) Region of approximate location



(b) 栅格和边缘检测结果

(b) Grid and result of edge detection



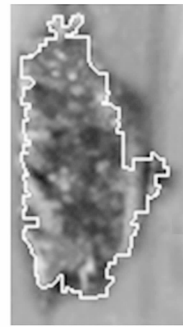
(c) 边界的栅格区域

(c) Grid region of border



(d) 边界边缘点

(d) Edge points of border



(e) 精定位结果

(e) Result of accurate location

图 5 剥离缺陷区域提取过程

Fig. 5 Process of burning defect region extraction

4.3 踏面擦伤图像区域提取

根据擦伤特征设计了一种基于踏面边缘线扫描搜索的擦伤图像区域提取方法,具体步骤如下:

(1)根据 3.3 节得到的踏面边缘线,在踏面区域内,踏面边缘线依次移动一个像素,得到覆盖踏面区域的所有扫描线。

(2)沿第 j 条扫描线从上到下逐个判断当前像素点相邻两点灰度差的绝对值是否小于阈值 T_p ,若满足则标记当前像素点为跳变点,直到这条扫描线上所有跳变点标记完毕。

(3)统计第 j 条扫描线上相邻的跳变点之间的像素点灰度值介于 T_a 和 T_b 之间的数目 num ,设其之间的像素个数为 N_1 ,若满足 $num > N_1 \times 0.7$ 且 $N_1 > T_c$,则标记该扫描线上跳变点之间的扫描线为擦伤线。其中 $T_c = T_v / 2$, T_v 的值根据铁道部规定的擦伤最小长度确定。

(4)迭代循环 $j=j+1$,转步骤 2,直到覆盖踏面的所有扫描线结束。

(5)从左到右,对标记的擦伤线依次按照擦伤线合并原理判断是否属于同一擦伤区域,最终确定的不同区域用不同的矩形框锁定。合并原理:对两条擦伤线(A和B),设A的两端点坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$, B的两端点坐标分别为 $(x_3, y_3), (x_4, y_4)$,两条线的横向距离H和纵向距离V用如下公式计算:

$$H = |x_3 - x_1|,$$

$$V = \min(|y_1 - y_3|, |y_1 - y_4|, |y_2 - y_3|, |y_2 - y_4|).$$

选取阈值 T_{d1} 和 T_{d2} ,如果: $H < T_{d1}$ 且 $V < T_{d2}$ 则认为两条擦伤线为同一个擦伤区域内的擦伤线。图6为对图3(b)擦伤区域提取过程,其中图6(a)为擦伤线标识结果,图6(b)中的锁定矩形区域为合并结果。



(a) 擦伤线标识结果

(a) Marked result of peeling lines



(b) 合并结果

(b) Combination result

图6 擦伤缺陷提取过程

Fig. 6 Extraction process of peeling defect region

5 实验结果及分析

在安康车辆段的配合下,从车辆段采集踏面

图像,由人工对这些样本中的缺陷进行标定,这些样本中包含了“剥离”和“擦伤”两种常见的缺陷,每种缺陷的数目如表1所示,用本文算法对这些样本进行自动检测,检测到的缺陷用ROI(Region of Interest)表示,采用下面两个指标来评价算法检测效果:

漏识率=未检测到的缺陷数目/该缺陷类型的总数

误识率=非缺陷数目/总的缺陷数目

表1 缺陷检测结果

Tab. 1 Results of defect detection

缺陷类型	缺陷数量	ROI数目	未检测到数目	漏识率/%	误识率/%
剥离	120	110	10	8.3%	—
擦伤	75	71	4	5.3%	—
非缺陷	—	10	—	—	—
总计	195	221	14	7.2%	5.1%

从表1可以看出,剥离漏识率为8.3%,擦伤的漏识率为5.3%。导致漏识的原因是:光照不均匀、缺陷的表面生锈、表面杂物或灰尘覆盖表面缺陷导致缺陷区域灰度特征值高于背景区域,很难通过算法检测到。系统的误识率为5.1%,剥离缺陷误识是踏面图像中的噪声和一些非缺陷的因素,如表面的杂物、油污等的图像区域灰度均值和方差的分布范围在剥离缺陷灰度均值和方差的分布范围内引起的,擦伤缺陷误识的原因是沿着轮缘线出现灰度特征和长度满足擦伤特征条件的油污和杂质等非缺陷,误识的缺陷在后面的缺陷识别步骤中通过缺陷分类算法识别。

6 结论

本文提出了一种基于平稳小波自适应阈值的踏面区域分割方法,该方法可以提取出踏面区域。根据剥离和擦伤特征,提出了一种基于分块思想的粗定位和精定位组合提取剥离区域的方法和基于踏面边缘线扫描搜索擦伤区域的方法,通过两个实例验证了两种方法的有效性。经实验,系统对剥离和擦伤两种缺陷的漏识率分别为8.3%和5.3%,误识率为5.1%。

参考文献:

- [1] 吴开华, 严匡. 车辆轮对踏面缺陷的光电检测方法研究[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 465-467.
WU K H, YAN K. Research on the method of measuring defects of wheel set tread using optoelectronic technique[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(3): 465-467. (in Chinese)
- [2] 伍济钢, 宾鸿赞. 机器视觉的薄片零件尺寸检测系统[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 124-130.
WU J G, BIN H Z. Dimensional inspecting system of thin sheet parts based on machine vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 124-130. (in Chinese)
- [3] 张学军, 左春桢, 文伟, 等. 基于计算机视觉的稀疏离散粒子尺寸的检测[J]. 光学精密工程, 2007, 15(4): 612-614.
ZHANG X J, ZUO CH C, WEN W, *et al.*. Measurement of sparse scatter particulates based on computer vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 612-614. (in Chinese)
- [4] 周贤, 刘义伦. 炭素制品缺陷的 X 射线自动检测技术研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 503-508.
ZHOU X, LIU Y L. X-ray automatic inspection techniques for carbon product defects [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 503-508. (in Chinese)
- [5] 董长虹, 高志, 余啸海. Matlab 小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
DONG CH H, GAO ZH, YU X H. *Matlab Wavelet Analysis Toolbox Principles and Applications* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [6] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
YANG F SH. *Project Analysis and Application of Wavelet* [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
- [7] 王珏, 卢艳平, 张泽宏, 等. 一种有记忆的变窗“爬虫”图像边界跟踪方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 483-491.
WANG Y, LU Y P, ZHANG Z H, *et al.*. A reptile method with memory and alterable window for image boundary tracing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 483-491. (in Chinese)

作者简介:



赵勇(1976—), 男, 甘肃兰州人, 博士研究生, 1995 年于青岛科技大学获学士学位, 2001 年于西北工业大学获硕士学位, 主要从事光电检测和计算机视觉检测的研究。E-mail: zhaoyong1107@sina.com.cn



田丽丽(1984—), 女, 河南漯河人, 硕士研究生, 2006 年于西安工业大学获学士学位, 主要从事图像处理和机器视觉的研究。E-mail: tianlili223@163.com

导师简介:



方宗德(1948—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 1982 年, 1984 年, 1986 年分别于清华大学获工学学士、硕士和博士学位, 主要从事现代机械理论及设计、仿生机械理论和设计及现代车辆电控技术的研究。E-mail: fauto@nwpu.edu.cn