

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209732

# 基于机器视觉的钢轨圆孔动态测量方法<sup>\*</sup>

陈旭昂<sup>1</sup> 邓恒<sup>2</sup> 周建华<sup>1,2</sup> 余学才<sup>1,2</sup>

(1.电子科技大学光电科学与工程学院 成都 610054; 2.万岩铁路装备(成都)有限责任公司 成都 610051)

**摘要:** 为动态检测铁轨上圆孔两侧尺寸是否合格,提出了一种基于机器视觉的圆孔动态测量方法。首先,通过工业相机动态采集圆孔图像并对图像预处理,其中,图像中外圆和内圆的半径分别对应圆孔两侧尺寸。其次,利用边缘检测和梯度法获取外圆的圆心与半径,在边缘检测时,采用记忆化搜索降低无关边缘的影响。然后在极坐标系下搜索外圆区域获取内圆轮廓点,并对其迭代拟合,最终得到内圆尺寸,实现了圆孔两侧尺寸的动态测量。经实验测试表明,这种方法测量精度高,光照度为2 000 lx时,圆孔两侧尺寸测量误差均小于1个像素。

**关键词:** 机器视觉;边缘检测;记忆化搜索;梯度法;迭代拟合;动态测量

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

## Dynamic measurement method of rail round hole based on machine vision

Chen Xu'ang<sup>1</sup> Deng Heng<sup>2</sup> Zhou Jianhua<sup>1,2</sup> Yu Xuecai<sup>1,2</sup>

(1. School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. Wanyan Railway Equipment (Chengdu) Co., Ltd., Chengdu 610051, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of dynamic detection of both sides of round holes on rails, a dynamic measurement method of round holes based on machine vision was proposed. Firstly, the image of the round hole is dynamically collected by an industrial camera and preprocessed. The radius of the outer circle and the inner circle of the image corresponds to the dimensions of both sides of the round hole. Secondly, the center and radius of outer circle are obtained by edge detection and gradient method, and the influence of irrelevant edges is reduced by mnemonic search during edge detection. Then, the contour points of the inner circle were obtained by searching the outer circle region in the polar coordinate system, and the inner circle size was finally obtained by iterative fitting, and the dynamic measurement of the dimensions of the two sides of the hole was realized. The experimental results show that this method has high precision, and the measurement errors of both sides of the circular hole are less than 1 pixel when the illumination is 2 000 lx.

**Keywords:** machine vision; edge detection; memory search; gradient method; the iterative fitting; dynamic measurement

## 0 引言

铁路行业中,为了连接两段铁轨,需要对铁轨钻孔,之后利用夹板、螺栓和弹簧垫圈等将两段铁轨固定起来。圆孔的尺寸应严格满足生产标准,若钻孔尺寸偏小,孔壁受力增大,容易造成孔裂;反之,会导致铁轨间连接不稳固,容易造成安全隐患<sup>[1-4]</sup>。

理想情况下,钻孔方向应始终与轨腰垂直,然而实际操作过程中,钻孔方向会发生微小偏离,导致钻孔两端尺寸不同,因此需要同时检测圆孔两侧的尺寸是否满足生产要求。目前,对孔径的尺寸测量方式主要包括接触式测量和非接触式测量。接触式测量主要是利用游标卡尺、千分尺等测

量仪器进行手动测量,这种测量方式效率低,误差大,无法满足大批量高精度的生产需求。非接触式测量主要是利用机器视觉进行自动化尺寸测量。基于机器视觉的尺寸测量方式精度高,速度快,已经成为近些年来研究的热点。王凯等<sup>[5]</sup>采用图像滤波、边缘检测和边缘椭圆拟合研究了测量圆孔零件内外径尺寸的方法,这种方法不适用于复杂背景图像中孔径的测量。谢红等<sup>[6]</sup>利用空间聚类方法划分区域,通过对区域利用最小二乘法,达到了一般圆孔尺寸测量的目的,但这种方法局限于测量单侧孔径尺寸。Dang等<sup>[7]</sup>针对环形物体,利用图像二值化、图像标定和轮廓识别重建了环内外轮廓点,实现了高精度测量,但该方法无法用于动

收稿日期:2022-04-24

<sup>\*</sup> 基金项目:四川省重点研发项目(2021YFG0009)资助

态测量。党长营等<sup>[8]</sup>通过引入全局性参数定位最佳拟合圆,确定了最优圆孔,实现多孔零件尺寸测量,其测量误差较大,且不适用于动态测量。谢俊等<sup>[9]</sup>提出采用环形光源照明,利用图像处理测量倒角圆孔的内尺寸,实现了倒角圆孔尺寸的测量,此方法对于不完整的圆轮廓识别率较低。

以上非接触式测量方法在圆孔尺寸检测方面取得了良好的效果,但不适用于动态测量。相机在动态拍摄时,由于拍摄角度的影响,图像中内圆不完整,传统的圆识别算法识别率低。如果在圆孔两侧各加一个工业相机,然后分别拍摄图像后在计算机端进行处理,由于不同线程的处理时间不同,图片无法同步发送,导致图片顺序错乱。因此需要重新设计尺寸测量系统和算法。

针对钢轨圆孔图像的特点,本文设计了尺寸测量系统,并提出基于机器视觉的圆孔两侧尺寸检测方法。对经预处理后的图像进行 Canny 边缘检测后初步得到外圆轮廓,通过记忆化搜索删除无关边缘后利用梯度法找到外圆的圆心和半径,然后在极坐标系下搜索获取内圆的边缘点,最后利用迭代拟合法得到内圆尺寸,实现了圆孔两侧尺寸的动态测量。实验时,将光照度分别设置为 800、2 000、2 500 lx,通过设置对照实验测试了算法效果。结果表明,所提方法测量误差小,鲁棒性强。

## 1 尺寸测量系统结构及原理

### 1.1 尺寸测量系统的组成

设计如图 1 所示的尺寸测量系统。系统主要是由工业相机、LED 光源、PC 端、外壳等组成。相机与钢轨间隔为 80 mm,为了能够同时拍到圆孔两侧轮廓,相机和光源安装高度略高于圆孔。为避免外界光的干扰,设置系统外壳作为背景。系统的主要原理为:光源发出的光以一定角度照射在圆孔上,通过相机采集圆孔图像,对圆孔图像预处理后,经 PC 端图像分析得到圆孔两侧的尺寸。实际测量中可调整光源强度以达到最佳检测效果。

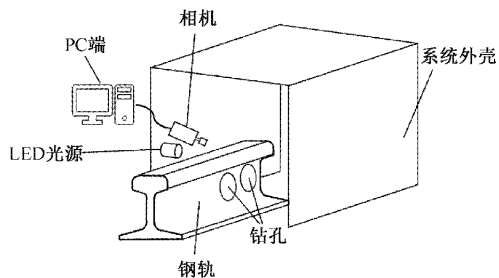


图 1 尺寸测量系统

### 1.2 圆孔图像的特点

经相机拍摄得到的圆孔图像例图如图 2 所示。图像中外圆和内圆的半径分别对应圆孔两侧尺寸:圆孔外侧的尺寸对应图中大圆的直径,且大圆轮廓完整,而内侧尺寸对应图中的内圆直径,在非正视角度下,相机拍摄得到的内圆存在缺失。此外,内圆的边界处灰度值发生突变。

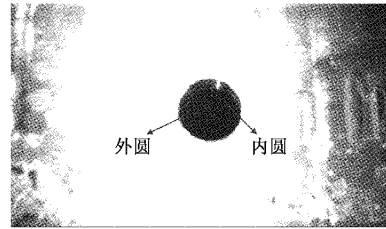


图 2 圆孔图像例图

## 2 基于机器视觉的尺寸测量算法

测量系统的整体流程如图 3 所示。通过相机采集的原始图像经过图像预处理后,利用边缘检测、记忆化搜索和梯度法得到外圆的圆心和半径。由于内圆轮廓点均在外圆内,将外圆区域设为感兴趣区域(ROI 区域),然后利用极坐标系搜索得到内圆上的轮廓点,最后利用迭代拟合法得到内圆中心和半径,圆在图像中的直径与像素单元大小的乘积即为圆的实际物理尺寸。

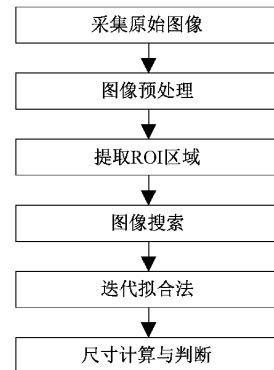


图 3 整体框架流程

### 2.1 图像预处理

经相机拍摄得到的 RGB 图像需要首先进行图像预处理,图像预处理主要包括图像灰度化处理和去噪处理。

#### 1) 灰度化

灰度化的目的是压缩图像的数据大小,方便后续算法对图像的处理,根据人眼对色彩的敏感程度,一般采用平均加权法实现图像灰度化<sup>[10]</sup>:

$$Grayvalue = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (1)$$

式中: Grayvalue 表示灰度化后像素值, R、G、B 分别代表彩色图像的 3 个分量值。

#### 2) 图像去噪

高速摄像机拍摄得到的图片中含有噪声,为了防止噪声对后续操作的影响,需要对灰度图像去噪。常用的去噪方法有中值滤波法、均值滤波法、高斯滤波法等。高斯滤波在对图像进行平滑的同时能够保留图像的整体灰度特征,不会影响后续操作的准确性<sup>[11]</sup>,因此采用高斯滤波对图像进行去噪处理。图 4 为预处理前后的圆孔图像,对比预处理前后图像,经过高斯滤波后图像整体模糊,但噪声明显减少。

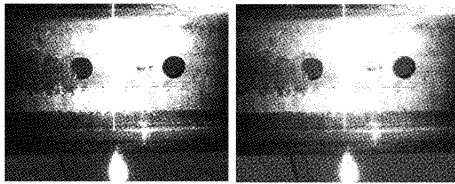


图 4 预处理前后对比

## 2.2 ROI 区域提取

ROI 区域提取主要包括边缘检测、记忆化搜索和梯度法,其目的是快速准确地获取外圆圆心和半径,并为内圆尺寸测量作准备。

### 1) 边缘检测

与 Sobel、Robert 等边缘检测算法相比,Canny 边缘检测能够有效抑制伪边缘,具有高信噪比、边缘精细、准确度高的特点<sup>[12-13]</sup>。Canny 边缘检测主要包含以下过程:

#### (1) 计算像素梯度幅值与方向

计算每一点像素在水平方向和竖直方向的一阶导数,记为  $f_x(x, y)$  和  $f_y(x, y)$ 。然后利用式(2)和式(3)计算像素的梯度幅值  $M(x, y)$  和梯度方向  $\theta(x, y)$ 。

$$M(x, y) = \sqrt{f_x^2(x, y) + f_y^2(x, y)} \quad (2)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \frac{f_y(x, y)}{f_x(x, y)} \quad (3)$$

#### (2) 非极大值抑制

非极大值抑制的目的是细化边缘,从而更好定位边缘信息。将每一像素作为中心点,在其梯度方向上比较前后两个邻域像素的梯度幅值,如果该中心像素点幅值最大,则保留,否则将该中心像素值置为 0。

#### (3) 双阈值检测

为了抑制伪边缘,设置高阈值  $Th1$  和低阈值  $Th2$ 。将梯度幅值小于  $Th2$  的像素直接舍弃,幅值大于  $Th1$  的像素标记为强边缘点并保留,对于梯度幅值介于  $Th1$  和  $Th2$  之间的像素,如果该像素与强边缘点相邻,则保留此像素点,否则舍弃。经 Canny 边缘检测后的图像如图 5 所示。

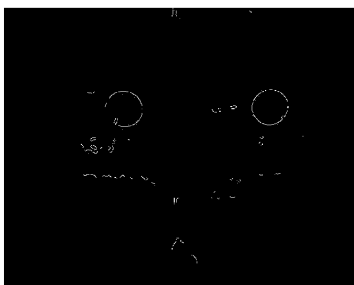


图 5 Canny 边缘检测后图像

### 2) 记忆化搜索

由图 5 可以看出,经 Canny 边缘检测后的图像存在很多与外圆轮廓无关的边缘,这些无关边缘会影响外圆识别,并浪费后续计算时间,因此需要将这些边缘过滤。本文提

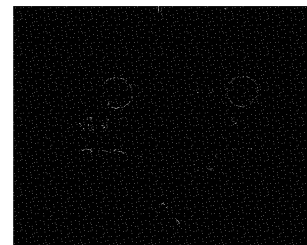
出利用记忆化搜索找到图像中每个连通块内的像素,然后统计各个连通块的像素数,当连通块像素数小于设定阈值时将该块删除,否则保留。具体步骤为:

(1) 遍历图像中每个像素,若当前像素被标记,则遍历下一个像素;否则,转向步骤(2);

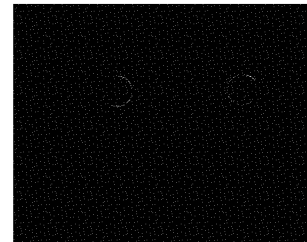
(2) 在该像素 8 邻域内寻找未被标记且像素值为 255 的像素点。若能够找到这样的像素点 P,则把 P 加入当前连通块内,并标记 P,然后将该像素点作为下一像素点,执行步骤(2);否则,若不存在这样的像素点,返回;

(3) 统计每个连通块的像素个数,并找到像素数的最大值  $maxcount$ ,设定阈值为  $maxcount$  的 75%,将像素数低于阈值的连通块删除。

经过记忆化搜索后得到各个连通块如图 6(a) 所示,图中每个连通块用不同颜色表示。图 6(b) 为删除无关边缘后的图像。



(a) 记忆化搜索后结果



(b) 无关边缘过滤后圆孔图像

图 6 ROI 区域提取初步结果

### 3) 梯度法

圆识别算法大致包括:(1)基于参数空间投票统计的霍夫变换方法;(2)基于代数的方法。基于代数的方法效率高,但是对噪声较为敏感,而且对图像中存在多个圆的情况效果不佳<sup>[14]</sup>。相比之下,霍夫变换有较强的抗噪性,局部的噪声对于整体的识别结果影响不大,但是其计算时间较长,本文采用梯度法加快运算效率<sup>[15]</sup>。

梯度法的原理是:对于圆上的任意一点  $(x_i, y_i)$ ,其梯度方向的直线均经过圆心  $C$ 。利用 Sobel 算子计算边缘点的梯度方向,假设梯度方向与  $x$  轴成  $\theta_i^\circ$ ,遍历半径  $R$  的范围,利用式(4)计算并统计中心点  $(a, b)$ ,最后根据中心点出现次数排序,次数大于一定阈值可认为是圆心。

$$\begin{cases} a = x_i + R \cos \theta_i \\ b = y_i + R \sin \theta_i \end{cases} \quad (4)$$

在计算得到圆心坐标后,计算图中所有边缘点到圆心

的距离,统计各个距离值出现的次数,大于设定阈值可认为是半径。利用梯度法识别外圆结果如图 7 所示。

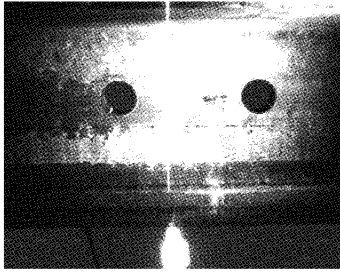


图 7 梯度法识别结果

### 2.3 图像搜索

为了计算内圆尺寸,利用内圆轮廓点处具有灰度突变的特征,通过图像搜索得到图像中内圆轮廓点,然后利用迭代拟合法即得内圆尺寸。图像搜索时应尽量避免干扰点的产生,以免对后续拟合造成影响。图像搜索方式主要有直角坐标系搜索和极坐标系搜索。

直角坐标系搜索方式相对简单,但是搜索得到的非轮廓点多,同时会错过许多轮廓点,可能影响拟合结果。

极坐标系搜索采用从中心向外辐射的方式,将外圆限定为搜索范围,以外圆中心为极点,从极点出发引出一条线段,线段的长度为极径,线段与水平方向夹角为极角。遍历极角和极径,从而完成灰度突变点的标记。两种坐标系搜索得到的结果如图 8 所示。相比于直角坐标系搜索,极坐标系搜索方法能够识别出更稠密的轮廓点,同时可以避免非轮廓点,效果优于直角坐标系搜索方法。

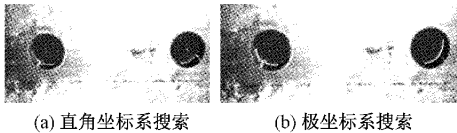


图 8 两种搜索方式得到的轮廓点(白点)

### 2.4 迭代拟合法

为了避免局部拟合和噪声干扰,本文提出采用迭代拟合法计算内圆圆心和半径。假设通过图像搜索得到内圆轮廓上的点分别为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$ , 同时假设拟合得到的圆的一般方程为:

$$x^2 + y^2 + Ax + By + C = 0 \quad (5)$$

令目标函数  $f$  表示各个轮廓点到圆的距离之和:

$$f = \sum_{i=1}^N [x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C]^2 \quad (6)$$

分别对各个未知量求偏导,并令其等于 0:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial A} = \sum_{i=1}^N 2(x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C)x_i = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial B} = \sum_{i=1}^N 2(x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C)y_i = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial C} = \sum_{i=1}^N 2(x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

通过高斯消参并化简可得到各个参数如式(8)所示<sup>[16]</sup>。

$$\begin{cases} A = \frac{EH - FG}{DG - E^2} \\ B = \frac{DH - EF}{E^2 - DG} \\ C = \frac{I + AJ + BK}{N} \end{cases} \quad (8)$$

其中,

$$\begin{cases} D = N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N x_i \\ E = N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i \\ F = N \sum_{i=1}^N x_i^3 + N \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 - \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) \sum_{i=1}^N x_i \\ G = N \sum_{i=1}^N y_i^2 - \sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N y_i \\ H = N \left( \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i + y_i^3 \right) - \sum_{i=1}^N y_i \left( \sum_{i=1}^N x_i^2 + \sum_{i=1}^N y_i^2 \right) \\ I = \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) \\ J = \sum_{i=1}^N x_i \\ K = \sum_{i=1}^N y_i \end{cases} \quad (9)$$

求解式(8)即得拟合圆的圆心和半径。

迭代拟合法的思想是:在上述最小二乘法的基础上,设置误差阈值,计算所有轮廓点到拟合圆的距离,将所有距离相加,如果和大于阈值,则删除距离最大的轮廓点,然后再重复上述拟合过程,直到所有轮廓点到拟合圆的距离和小于阈值,迭代结束。利用最小二乘法和迭代拟合法的拟合结果分别如图 9(a)、(b)所示。

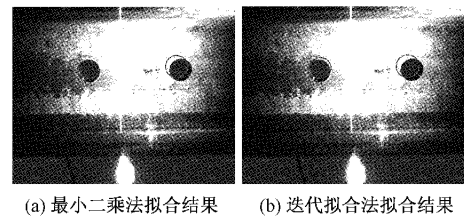


图 9 两种方法拟合结果

由两种方法的拟合结果可以看出,迭代拟合法的最终拟合效果更优。

### 3 实验结果分析

本次实验基于 Windows10 平台,处理器型号为 Intel (R) Core(TM) i3-4170 CPU@3.70 GHz,内存为 8 G。编程软件采用 OpenCV2.5 和 Visual Studio 2019。实验在室



内自然光环境下进行,相机与钢轨间隔为 80 mm,相机帧率设置为 150 帧/s,分辨率设置为 1 280×1 024,并将铁轨放置于传送带上进行动态测量。为了验证本方法的有效性,设计了三组对照实验:通过调节光源功率,将光照度分别设置为 800、2 000、2 500 lx,然后在每种光照度下对不同位置的圆孔图像进行测量。本次实验中,圆孔内侧直径为 22.50 mm,外侧直径为 24.50 mm。经过标定计算,相机图像中的每一个像素大小为 0.400 mm。在不同光照度和不同圆孔位置实验条件下,采集 80 组圆孔图片并测量得到内外尺寸,检测与拟合结果分别如图 10(a)~(c)所示。

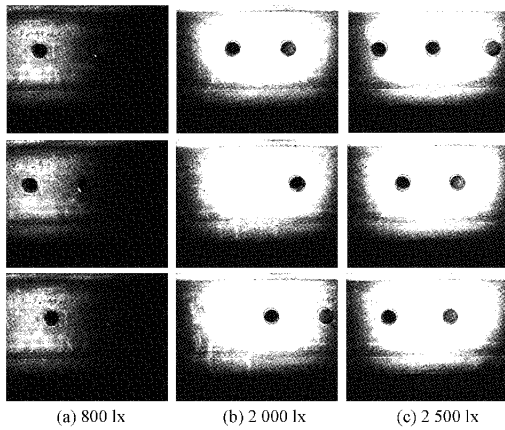
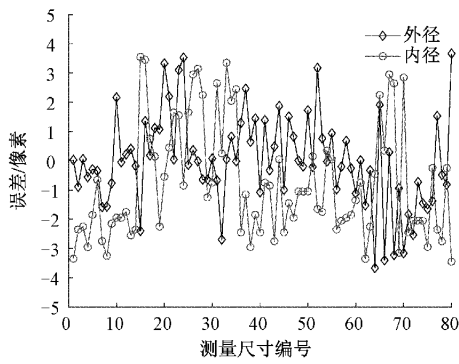
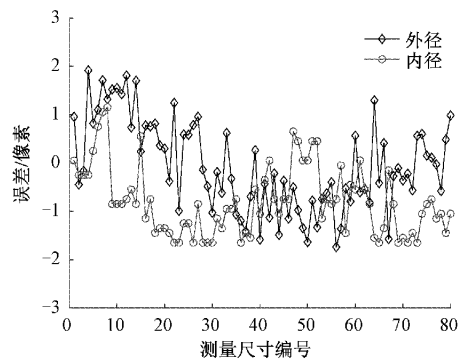


图 10 不同光照度下的识别结果

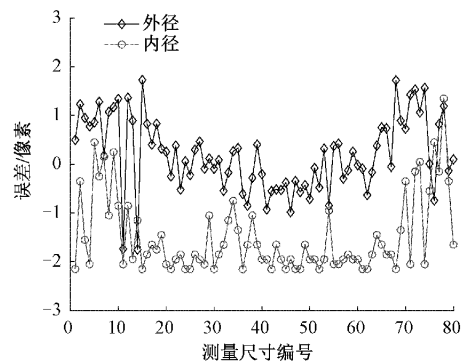
由识别结果可知:对于不同光照度和不同位置的圆孔图像,本方法都能准确识别。统计不同光照度下内外侧半径(内外径)测量误差,结果如图 11 所示。



(a) 800 lx光照度下尺寸测量误差曲线



(b) 2 000 lx光照度下尺寸测量误差曲线



(c) 2 500 lx光照度下尺寸测量误差曲线

图 11 不同光照度下的测量误差

对比 3 种测量曲线,可以看出:光照度设置为 2 000 lx 时,测量误差波动最小。为了更加直观地评判系统的测量效果,计算 3 种光照度条件下内外径尺寸方差和误差均值,结果如表 1 所示。

表 1 不同光照度的测量结果对比

光照度/ lx	内径 方差	内径误差 均值/像素	外径 方差	外径误差 均值/像素
800	1.080	1.159	0.962	1.868
2 000	0.237	0.804	0.241	0.943
2 500	0.219	0.620	0.409	1.558

通过对比不同光照度下的测量误差曲线、误差平均值和方差,可以得出:

1) 相对于现有单侧圆孔尺寸测量方案,本文所提出的方法能同时在线检测圆孔两侧尺寸,且该方法具有鲁棒性。对于不同位置的圆孔,本方法都能准确检测圆孔的内外侧圆。此外,在 3 种不同的光照度条件下,测量平均误差均小于 2 个像素,验证了本方法的有效性。

2) 光强会影响测量结果。相较于 800、2 500 lx,光照度为 2 000 lx 时,尺寸测量误差更小,此时圆孔内外侧测量误差均小于一个像素,且测量结果相对平稳。文献[8]提出的单侧圆孔尺寸测量误差为 2 个像素附近,相比之下,本文测量误差更小。

#### 4 结 论

为动态检测铁轨上圆孔两侧尺寸是否合格,本文提出了一种动态测量圆孔两侧尺寸的新方法。利用边缘检测、记忆化搜索等提取图像中外圆的圆心和半径,并将其设为 ROI 区域,然后在 ROI 区域利用极坐标系搜索的方法得到内圆轮廓点,最后对轮廓点利用迭代拟合法得到内圆半径,从而精确测量圆孔的内外侧尺寸。实验结果表明,本方法具有鲁棒性,能准确检测不同位置的圆孔图像。此外,在 3 种不同光照实验下的测量误差均小于两个像素,而将光照度调至 2 000 lx 时,检测误差小于一个像素。该研究为

自动化检测钢轨圆孔尺寸提供了一种方法,对于测量孔类零件尺寸也具有一定的参考价值。本方法的不足之处在于:需要人为设置光功率。在黑暗环境中,光照度过小时,本方法无法识别钢轨圆孔图像,未来需要设计自适应光源解决这一问题。

### 参考文献

- [1] 李昊鹏,封文静. 钢轨接头螺栓孔裂纹无损检测研究[J]. 甘肃科技,2012,28(20):51-52,61.
- [2] 刘世林. 浅析铁路线路的常见病害及养护维修[J]. 企业技术开发,2015,34(26):152,154.
- [3] 陈爱军. 钢轨螺栓孔裂纹的原因及采取的措施[J]. 民营科技,2018,24(5):28.
- [4] 刘磊,孟海洋,李超. 关于普速铁路钢轨接头病害的分析与整治措施[J]. 城市建筑,2020,17(8):153-154.
- [5] 王凯,周律,章佳佳. 基于机器视觉的圆孔零件内外径尺寸精密检测[J]. 农业装备与车辆工程,2018,56(9):59-62.
- [6] 谢红,廖志杰,邢廷文. 一种非接触式的圆孔形零件尺寸检测[J]. 电子设计工程,2016,24(19):155-158.
- [7] DANG A T, HSU Q C, TRUONG T T. A simple method for dimensional measurement of ring-shaped objects using image processing technique [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2021,115(11):3657-3678.
- [8] 党长营,贾立功,曾志强,等. 基于机器视觉的双金属铸件圆孔测量方法[J]. 制造技术与机床,2021,71(6):96-99.
- [9] 谢俊,李玉萍,左飞飞,等. 基于机器视觉的孔类零件尺寸在线检测[J]. 电子测量技术,2021,44(2):93-98.
- [10] 刘文婧,赵俊,王少锋. 基于机器视觉的受电弓滑板厚度检测方法研究[J]. 电子测量技术,2021,44(24):128-133.
- [11] 沈正福,汪惠芬,袁堂晓. 基于机器视觉的尺寸检测智能工位设计[J]. 计算机测量与控制,2021,29(7):91-94,105.
- [12] 田贝乐,牛宏侠,刘义健. 一种优化的 Canny 边缘检测算法[J]. 铁路计算机应用,2021,30(10):14-18.
- [13] 黄梦涛,连一鑫. 基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报,2021,42(10):199-209.
- [14] 胡蓓. 同心同向椭圆检测算法[J]. 信息技术,2013,37(6):129-132,136.
- [15] 李雄,曾世亨,谌文,等. 基于图像处理的果园圆形落果拾取机器人设计[J]. 现代计算机,2021,27(26):117-120.
- [16] 曲佩琦,蒋瑜,苏明旭,等. 基于图像光散射颗粒粒度测量方法研究[J]. 计量学报,2021,42(4):469-475.

### 作者简介

陈旭昂,硕士研究生,主要研究方向为图像处理、机器视觉等。

E-mail:2998457163@qq.com

余学才(通信作者),教授,主要研究方向为光电目标检测、图像处理等。

E-mail:yxc@uestc.edu.cn