

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107928

基于机器视觉的受电弓滑板厚度检测方法研究

刘文婧 赵俊 王少锋

(内蒙古科技大学 机械工程学院 包头 014010)

摘要:良好的弓网关系是电气化铁路正常运行的重要因素之一,应用机器视觉技术对滑板厚度进行测量,可以减少由人为误差导致的弓网事故。通过对实验室环境下拍摄的滑板图片进行图像灰度处理、透视校正、滑板图像滤波、滑板图像增强处理完成图像预处理,提出对滑板图像进行边缘检测和形态学开闭运算后采用图像追踪的方法,实现滑板边缘提取和定位,计算得到滑板厚度最小值。对滑板进行测量实验,由该方法得到的数值与实测值进行对比分析,得到的测量结果误差基本在 ± 0.5 mm。结果表明所提出的图像处理方法可以实现滑板磨损检测,对现场实际应用研究有很大的价值。

关键词:受电弓滑板;透视校正;边缘检测;图像追踪;厚度计算

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

Pantograph slide thickness detection method research based on machine vision

Liu Wenjing Zhao Jun Wang Shaofeng

(School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Good pantograph net relationship is one of the important factors for the normal run of electrified railway. Using machine vision technology to measure the thickness of pantograph slide can reduce the pantograph net accidents caused by human error. The pantograph slide pictures taken in the laboratory environment were processed by image grayscale processing, perspective correction, pantograph slide image filtering and pantograph slide image enhancement. This paper proposes a method of image tracking after edge detection and morphology open and close operation on pantograph slide image, realize the pantograph slide edge detection and positioning. The minimum value of pantograph slide thickness is calculated. Carry out measurement experiment to the pantograph slide, and the results obtained by this method were compared with the measured values, and the measure error was basically ± 0.5 mm. The results show that the image processing method proposed can realize the pantograph slide abrasion detection and has great value to the practical application research.

Keywords: pantograph slide; perspective correction; edge detection; image tracking; thickness calculation

0 引言

随着我国电气化铁路不断向高密度、高速度、高负荷的方向发展,对弓网运行的安全性提出了更高的要求。弓网故障与事故严重制约了电气化铁路的发展,成为铁路提速、安全运行的一大障碍^[1]。磨损量过大严重影响受电弓工作,如果不及时更换会造成自动降弓和滑板断裂,不及时发现,也会对机车的运行埋下安全隐患。然而目前,对于受电弓滑板的检测主要还是依靠传统的人工检测方法,进行修程检测时,列车必须在库内停车、降弓及断电,确认安全后,检修人员利用钢尺测量。人工检测法效率低、容易产生误

差,近些年的其他检测方法主要有超声波检测法^[2]、激光扫描检测法^[3]、图像检查测量法^[4]。超声波检测需要安装的探头数量较多,安装精度亦要求很高,检测精度受高速运行的影响,激光扫描检测方法较为复杂,整个系统较为繁琐,检测过程中容易产生很多误差因素。这些检测方法由于都有一定的局限;而基于机器视觉的图像检测算法,系统检测精度高、成本低、检测稳定性较好^[5]。

文献[6]中提出在利用原有边缘检测算法后采用 TRIZ 理论对算法优化,能够计算滑板厚度,但由于在图像预处理方面算法方面构建不足,算法精确度受外界环境影响较大。文献[7]提出基于自适应 Canny 边缘检测的滑板厚度计算

收稿日期:2021-09-23

方法,可以实现滑板厚度磨损曲线的计算,但是滑板拍摄过程产生透视畸变对精度有一定影响。文献[8]提出一种级联滤波器滑板图像滤波的方法,采用自适应阈的边缘检测算法检测滑板边缘,利用 Hough 变换定位滑板底面边缘,可以实现滑板厚度计算,但大部分滑板底面边缘不完全为直线,算法存在一定的局限性。

本文提出一种通过 Canny 边缘检测和边缘形态学运算实现滑板边缘检测和伪边缘去除后,通过边缘追踪实现滑板上下边缘的提取和定位,完成滑板磨损计算的方法。本文提出的方法中通过透视校正可消除透视畸变对精度的影响,通过边缘追踪的方法可实现滑板边缘的提取定位而不受滑板边缘曲直的影响。整体算法主要包括灰度变换、图像透视校正、图像滤波、图像增强、边缘检测及形态学运算、边缘追踪及磨损曲线计算,实现滑板厚度精确检测。

1 滑板图像预处理算法实现

1.1 滑板图像灰度化及透视校正处理

由于采集到的滑板图像为 RGB 图像,系统存储颜色信息会占用较多空间,增加图像处理时间。因而本文通过图像灰度化将彩色图像转化为灰度图像来减小计算负担,提高图像数据处理速度。文中选取加权平均值法对图像灰度化处理,红绿蓝加权系数分别选取 0.299、0.578、0.114 进行灰度化处理。

图像采集过程相机布置于滑板侧上方,拍摄的滑板图片会产生透视畸变,这种畸变是一种几何图像畸变,具体表现为由于相机未正对目标物体拍摄而形成,具有近大远小、近高远低以及互相平行汇交于一点特点。但在进行图像当中物体尺寸测量时,需要恢复图像中目标物体的真实位置信息,本文采用一种透视变换(perspective transformation)的方法对图像进行几何校正,以消除透视效应,保证图像测量的准确性^[9]。

滑板图像的透视校正^[10]需要获得精确匹配点后,通过匹配点对在两幅图像之间建立几何模型,图像校正的内容主要可以分为图像几何校正和图像灰度校正,通过几何校正实现图像数据对应位置的变换,而灰度校正可以实现相应位置的灰度插值。本文通过棋盘格标定板进行角点检测匹配,来获得多个投影变换方程变换的匹配点,求得投影变换方程的模型参数,更加准确的实现滑板图像的透视校正;将侧方拍摄的图像校正为前方拍摄的效果,消除透视畸变产生的误差。如果图像 A1 中的点 (X_1, Y_1, Z_1) 和图像 A2 中的点 (X_2, Y_2, Z_2) 存在投影变换关系, (X, Y) 为校正后像点,则图像的齐次坐标可表示为:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_2 = XZ_2 \\ Y_2 = YZ_2 \end{cases} \quad (2)$$

从而得到:

$$\begin{cases} X = \frac{K_{11}X_1 + K_{12}Y_1 + K_{13}Z_1}{K_{31}X_1 + K_{32}Y_1 + K_{33}Z_1} \\ Y = \frac{K_{21}X_1 + K_{22}Y_1 + K_{23}Z_1}{K_{31}X_1 + K_{32}Y_1 + K_{33}Z_1} \end{cases} \quad (3)$$

可以令 $Z_1=1$, 则:

$$\begin{cases} X = \frac{K_{11}X_1 + K_{12}Y_1 + K_{13}}{K_{31}X_1 + K_{32}Y_1 + K_{33}} \\ Y = \frac{K_{21}X_1 + K_{22}Y_1 + K_{23}}{K_{31}X_1 + K_{32}Y_1 + K_{33}} \end{cases} \quad (4)$$

由此可以看出,在透视变换方程中,由于每个匹配点对可以提供两个求解方程,而透视变换矩阵中共存在 8 个未知参数,因而至少需要 4 个匹配点才可以求解透视变换方程。为了得到精确的变换矩阵系数,匹配点数量越大,变换结果就越精确。图 1 为透视变换方程匹配点的检测图像,图 2 为进行图像透视校正后的图像。

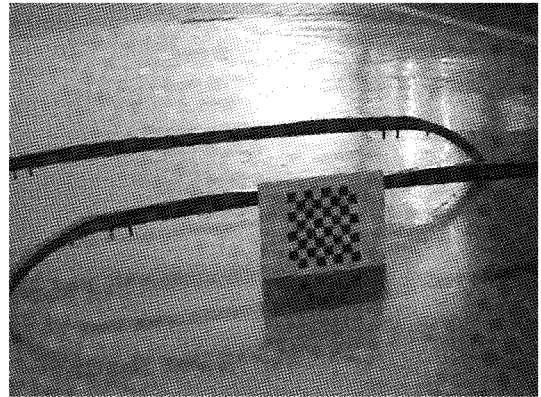


图 1 透视变换方程匹配点检测图像

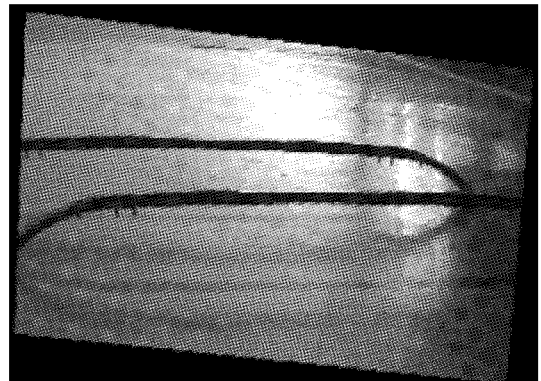


图 2 校正后的滑板图像

1.2 滑板图像滤波处理

由于滑板图像在外部环境采集、转换和传输过程中常受到成像设备与外部环境等因素干扰的影响,使图像产生噪声而质量降低。图像噪声对滑板边缘信息影响较大,因此对图像噪声的去除有很重要的现实意义。本文选择 3×3 中值滤波^[11]对滑板图像去噪处理,中值滤波是图像处理当中经常运用的非线性滤波,原理主要是对图像邻域内

的不同像素值根据灰度等级进行排序,然后选择中间的像素值作为处理后输出的像素。如图 3 所示为添加椒盐噪声后,使用 3×3 和 5×5 中值滤波器进行中值滤波的效果对比,可以发现 3×3 中值滤波器滤波后效果更好。

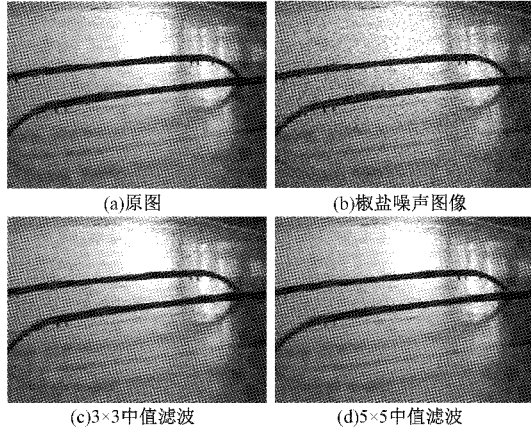


图 3 中值滤波效果对比

1.3 滑板图像增强处理

由于滑板图像在拍摄、传输、接收和处理等过程中不可避免地存在一些干扰,造成图像质量下降,影响图像处理的速度和精度^[12]。这样的图像由于灰度动态范围太小或者图像直方图灰度区间集中,出现图像视觉对比不明显的情况。当像素直方图数值能够分布到所有灰度级区间,且灰度级对应像素值概率分布比较接近时,图像目标对比度明显。本文通过直方图均衡化^[13]处理实现图像增强,对于灰度化的滑板图像,共 L 个灰度等级,其中第 k 个灰度级 r_k 出现的像素个数为 n_k ,图像总像素个数为 N ,则第 k 个灰度级出现的概率为 $P(r_k)$, s_k 为增强后灰度级,进行均衡化处理的变换函数为 $T(r)$ 。滑板图像可根据式(5)、(6)进行直方图均衡化处理。如图 4 所示为直方图均衡化后的效果对比。

$$P(r_k) = \frac{n_k}{N} \quad (5)$$

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{N} \quad (6)$$

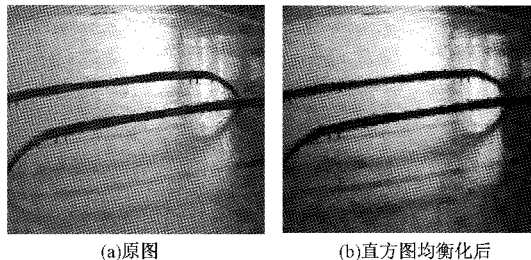


图 4 直方图均衡化后对比图像

2 滑板图像边缘检测、形态学运算及边缘图像追踪实现

滑板厚度计算需利用滑板图像中两条滑板边缘的位置

信息进行计算来求解,因此边缘检测效果直接影响着滑板厚度计算的准确性。对于滑板图像边缘连续性和非直线的特点,本文提出边缘检测后进行图像边缘追踪的方法实现滑板边缘提取和定位。

2.1 滑板边缘检测及形态学运算处理

在实际应用当中,经常使用的边缘检测算子有 Log 算子、Robert 算子、Sobel 算子和 Canny 算子检测算法^[14-15],本文选择 Canny 算子边缘检测处理。首先进行高斯滤波,选用高斯函数 $G(x, y)$ 构造滤波器,然后分别按行和列对预处理后的受电弓滑板图像 $f(x, y)$ 进行卷积操作,进而得到稍有一些模糊的平滑图像 $g(x, y)$ 。如式(7)及(8)所示。

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

$$g(x, y) = f(x, y) * G(x, y) \quad (8)$$

滑板图像边缘检测时,用求偏导数的方法求得图像中每个点的梯度值大小以及该点梯度方向。通过采用邻域一阶偏导数的有限差分方法计算图像 $g(x, y)$ 的梯度大小 $G[g(x, y)]$ 和梯度方向 $\theta(x, y)$,如式(9)和(10)所示。

$$G[g(x, y)] = \left[\left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$\theta(x, y) = \arctan \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right) / \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right) \quad (10)$$

Canny 算子边缘检测时,对滑板图像的梯度幅值进行非极大值抑制,对于图中全局梯度不能确定边缘时,保留图中局部梯度最大的点而抑制非极大值点;对图像各点元素沿梯度方向进行梯度值大小的比较,对于滑板图像的每个点,将邻域中心元素梯度值与沿梯度方向的梯度幅值进行比较,保留极大值对应点为滑板边缘。

最后通过使用两个阈值 T1 和 T2 确定和连接边缘,将由高阈值 T2 得到的图像边缘连接成轮廓,低于低阈值 T1 对应点为非边缘点,梯度值在两阈值之间时,在该点对应的 8 个邻点位置寻找可以连接的边缘,来得到滑板图像的边缘。通过 Canny 算子边缘检测得到的滑板边缘更准确、连续,合理设置阈值使得滑板边缘检测后伪边缘更加减少。

对于 Canny 边缘检测后部分滑板边缘存在断点及伪边缘,本文通过对边缘检测后图像进行形态学运算,即通过对图像边缘进行形态学开闭运算及组合的膨胀和腐蚀运算处理得到更加准确的滑板边缘图像。

2.2 滑板上下边缘图像追踪实现

由于滑板底面边缘为非直线边缘,通过 Hough 变换筛选定位滑板底面边缘存在困难,不能准确定位和提取滑板下边缘,本文提出通过滑板边缘追踪的方法进行边缘定位提取。

边缘追踪是在图像边缘检测后边缘点不够完整,存在不同方向的伪边缘,得到的边缘像素点很少能完整地描绘实际的一条边缘。可以在使用边缘检测算法后,通过边缘

追踪将边缘像素组合成有意义的边缘以及实现滑板边缘像素坐标定位和提取。

边缘追踪的方法是由一点边缘点开始,根据一点边缘点判断准则,寻找下一个边缘点,以此形成目标的边界,边缘起始点可根据像素坐标位置不同判定选择,受电弓滑板图像进行 Canny 边缘检测后,提取了所有梯度变化大的边缘,对应到实物包括受电弓滑板的上下边缘、受电弓背景伪边缘等,为准确提取滑板上下边缘以计算磨损值,需将受电弓滑板上下边缘确定出来。图 5 和 6 为滑板边缘追踪的效果图。

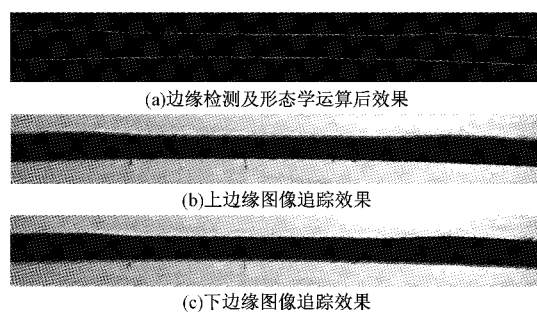


图 5 滑板 1 边缘追踪效果

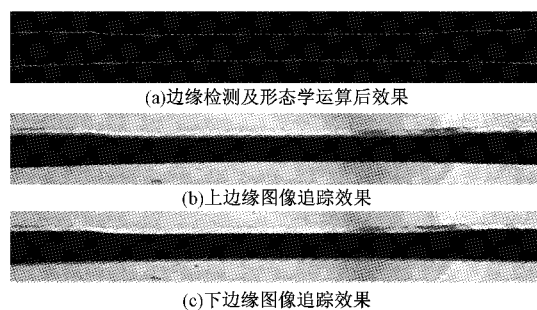


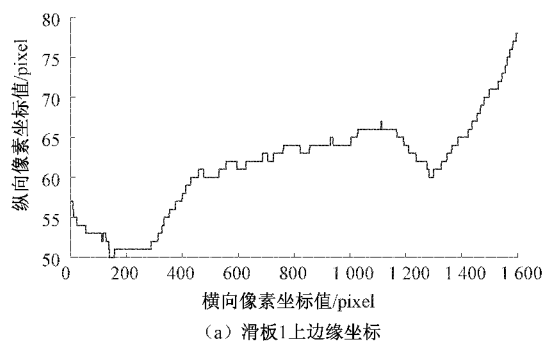
图 6 滑板 2 边缘追踪效果

3 滑板边缘像素坐标定位提取实现

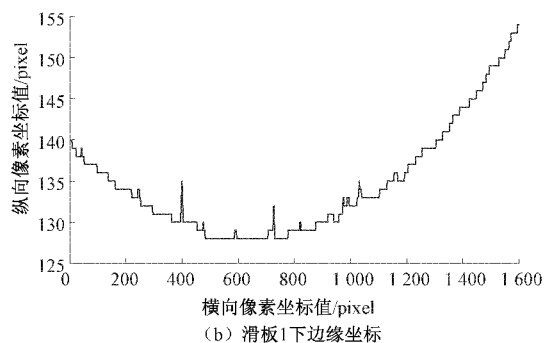
滑板厚度的计算必须准确得到每个像素距离代表的实际距离大小。因而需要通过滑板边缘追踪算法定位出滑板边缘像素坐标来计算像素距离。本文根据滑板的像素位置坐标可以将滑板的上下边缘像素坐标提取,为下一步的厚度计算做准备。滑板边缘的起始点坐标为二值图非零点,由于每条滑板边缘的坐标起始位置即像素纵坐标不同,因而可以将两条滑板的上下边缘起点分别定位出来,进而得到滑板的边缘及边缘坐标。如图 7 和 8 为受电弓滑板边缘像素坐标图。

4 滑板厚度计算

滑板厚度计算通过滑板边缘纵向坐标的差值计算,由于滑板两端为非磨损区,本文中将两端滑板厚度近似为 40 mm。由于受电弓在运行当中碳滑板与接触网接触有一定范围,即接触网线与滑板摩擦磨损范围;正常情况下,以

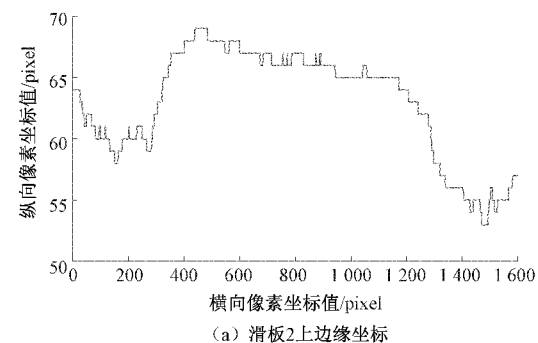


(a) 滑板1上边缘坐标

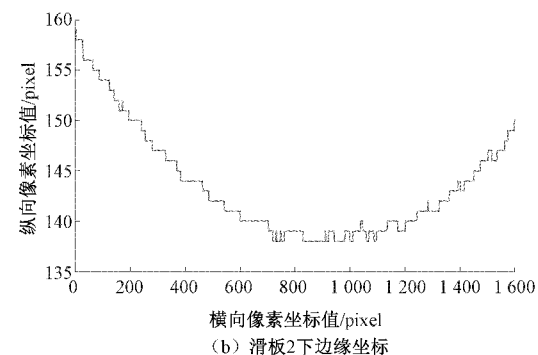


(b) 滑板1下边缘坐标

图 7 滑板 1 两条边缘坐标检测结果



(a) 滑板2上边缘坐标



(b) 滑板2下边缘坐标

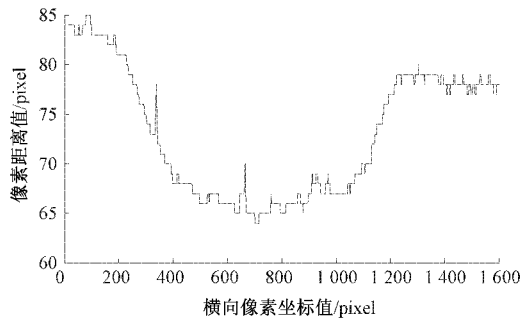
图 8 滑板 2 两条边缘坐标检测结果

碳滑板中点为基准,滑板工作范围在±400 mm 范围内,即滑板的磨损范围在±400 mm 范围内。所以一般滑板两侧不存在磨损。计算出的磨损曲线两侧包含一部分弓头厚度区域,即磨损曲线两侧最高点,由于滑板边缘检测结果以一侧为起点,并且最终另一侧结束并不需要完全位于弓头上,所以在滑板采集的图像当中以图像中点向两边截取总长度

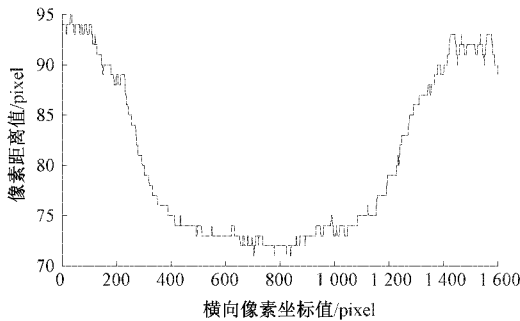
为 1 600 pixel 的滑板区域。本文当中以截取的整个滑板区域两条边缘间距最大值为滑板厚度的最大值。且将检测到的最大值作为碳滑板出厂厚度 40 mm 来近似计算,以此为标准对碳滑板上的每一点厚度进行计算。具体流程如下:

- 1) 计算滑板两条边缘曲线在竖直方向的像素距离曲线。
- 2) 计算像素距离曲线对应的最大像素距离 D 。
- 3) 剩余厚度计算参数为 $40/D$ 。
- 4) 实际磨损曲线为每一点的像素距离 d 乘以厚度计算参数的得到,即为 $d \times 40/D$ mm。

最终得到的两条碳滑板边缘像素距离曲线如图 9 所示,图 10 为滑板厚度最小值大小和位置的标注,其中横坐标为像素位置,纵坐标为碳滑板剩余厚度,单位为 mm。



(a) 滑板1滑板边缘像素距离曲线



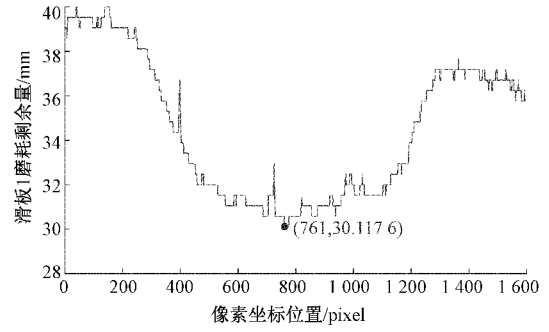
(b) 滑板2滑板边缘像素距离曲线

图 9 滑板边缘像素距离曲线

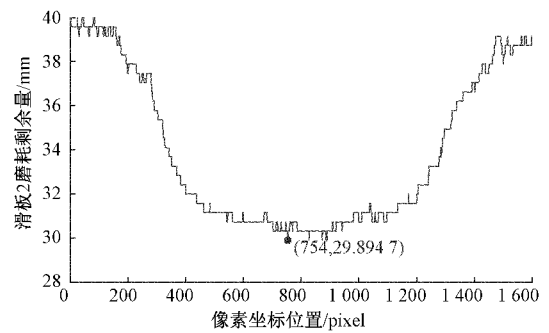
5 测量试验及测量数据分析

由于滑板厚度的检测测量偏差为 0.5 mm 范围时,完全能满足受电弓日常检测的要求。本文基于机器视觉的受电弓滑板厚度检测算法研究,滑板磨损厚度检测误差范围为 0.5 mm 以内就可以达到检测要求;受电弓滑板随着机车的运行,会产生不同程度的磨损,日常检修需要依靠现场人工测量得到滑板厚度。人工测量过程容易产生测量误差,实验对同一滑板进行多次测量,通过对测量数据计算测量均值,将人工测量均值与算法测量值进行比较,从而验证算法的精确性,如表 1~3 所示。

由于滑板磨损值没有标准值可以参考,文中将人工测量的数值作为参考基准,令几组人工测量值作为标准值与



(a) 滑板1滑板厚度最小值及其位置



(b) 滑板2滑板厚度最小值及其位置

图 10 滑板厚度最小值

表 1 滑板厚度人工测量数值及均值

滑板编号	人工测量次数			人工测量均值
	1	2	3	
1	31.20	30.02	30.60	30.60
2	30.60	30.42	30.00	30.33
3	31.90	31.62	32.06	31.86
4	32.60	32.80	32.96	32.78
5	36.80	36.62	36.98	36.80
6	35.68	35.78	35.96	35.81

表 2 算法系统滑板厚度测量数值

滑板编号	本算法测量数值
1	30.12
2	29.89
3	31.45
4	33.20
5	36.95
6	35.11

表 3 滑板厚度人工测量均值和系统算法测量值及偏差

滑板编号	人工测量平均数值	系统算法测量数值	误差值
1	30.60	30.12	-0.48
2	30.33	29.89	-0.44
3	31.86	31.45	-0.41
4	32.78	33.20	0.42
5	36.80	36.95	0.15
6	35.81	35.11	-0.70

本算法的测量数值进行比较;通过两种测量方式的数值差作为算法系统误差值进行精度分析。由表1~3数据可知,在给定被测数据当中,有一根滑板的算法测量厚度值与人工测量值的偏差为0.7 mm,其余被测滑板的算法测量厚度值与人工测量值数据偏差都小于 ± 0.5 mm。由此可以发现,对于由算法得到的受电弓滑板厚度测量值仅有个别偏差较大,超过了 ± 0.5 mm,大部分测量数据的偏差在 ± 0.5 mm以内;另外,在本领域已有的研究成果中,文献[16]提出的基于计算机视觉的滑板磨耗检测算法中,算法测量的磨耗数据与实际测量的误差在1 mm;文献[17]提出的通过边缘检测和相机标定及磨耗曲线融合方法中,精确性实验得到的系统测量数据与实际测量数据相比偏差基本集中在0.8 mm。通过对比研究分析说明了本文算法对滑板厚度测量具有较高的精确度。

6 结 论

本文研究了一种基于机器视觉的受电弓滑板厚度检测算法,通过对滑板图片进行图像灰度处理、透视校正、滑板图像滤波、滑板图像增强处理完成图像预处理,本文提出通过透视校正来减少拍摄过程由透视畸变产生的误差,且针对滑板上下边缘非直线特点,提出一种对滑板图像进行边缘检测和形态学开闭运算后采用图像追踪的方法,实现滑板边缘提取和定位,通过计算得到滑板厚度磨耗值;研究分析表明该方法对滑板边缘的定位提取准确,厚度磨耗检测精度较高,算法鲁棒性较好。

参考文献

- [1] 谢毅,寇峻瑜,姜梅,等. 中国铁路发展概况与技术展望[J]. 高速铁路技术,2020,11(1):11-16.
- [2] 尹保来,王伯铭. 超声波测距原理在受电弓磨耗检测中的应用[J]. 机车电传动,2008(5):57-59.
- [3] 张新龙. 基于单目视觉激光扫描成像的受电弓磨损检测系统设计[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2019.
- [4] 胡雪冰. 基于图像处理的受电弓故障在线检测系统研究[D]. 南京:南京理工大学,2019.
- [5] 魏秀琨,所达,魏德华,等. 机器视觉在轨道交通系统状

态检测中的应用综述[J]. 控制与决策,2021,36(2):257-282.

- [6] 涂晓斌. 基于机器视觉的受电弓磨耗检测系统研究[D]. 广州:广东工业大学,2013.
- [7] 陈叶健,姚小文,张永,等. 城轨列车受电弓滑板磨耗检测技术研究[J]. 铁道标准设计,2018,62(1):127-132.
- [8] 陈双. 基于图像处理的受电弓故障检测算法研究[D]. 南京:南京理工大学,2017.
- [9] 胡学龙. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社,2019.
- [10] 冯登超,陈刚,肖楷乐,等. 遥感图像的几何精校正研究[J]. 国外电子测量技术,2012,31(5):41-43,73.
- [11] 章毓晋. 图像工程(中)图像分析:第4版[M]. 北京:清华大学出版社,2018.
- [12] 吴松. 基于图像的机车入库受电弓滑板故障检测研究[D]. 南京:华东交通大学,2018.
- [13] 赵小川. MATLAB 图像处理能力提高与应用案例[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2014.
- [14] 田如安,李筠,杨海马,等. 基于机器视觉的汽车减震杆检测系统[J]. 电子测量技术,2019,42(22):103-106.
- [15] 陈晓荣,刘亚茹,石高辉. 基于机器视觉的光纤几何参数检测算法设计[J]. 电子测量技术,2019,42(6):82-86.
- [16] 江思阳. 基于计算机视觉的城市轨道交通弓网磨耗病害检测技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- [17] 姚小文. 基于图像处理的城轨列车受电弓检测技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2017.

作者简介

刘文婧,博士研究生,讲师,主要研究方向为机器视觉检测。

E-mail: nkd_lwj@imust.cn

赵俊(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为机器视觉检测。

E-mail: Yunfei0704@126.com

王少锋,博士,教授,主要研究方向为机器视觉研究与应用。

E-mail: wsffree@163.com