

复杂情况下受电弓滑板边缘的检测

朱燕玉

包头钢铁职业技术学院冶金化工系, 内蒙古 包头 014010

摘要 受电弓是电气列车重要的受流装置,受电弓滑板磨损程度影响着弓网之间的配合情况。对受电弓滑板磨损故障的自动测量,是实现受电弓自动化检测的重要手段之一。根据视觉测量系统所拍摄的受电弓滑板图像的特点,利用基于部分面积作用的亚像素边缘定位算法,提出一种滑板上边缘和下边缘的精确识别算法。通过与其他常见边缘提取算法进行对比,证明了所提算法的可行性和优越性。

关键词 机器视觉; 受电弓; 滑板; 亚像素边缘提取; 边缘识别

中图分类号 U216.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061501

Edge Detection of Pantographic Slide Under Complex Circumstance

Zhu Yanyu

Department of Metallurgy and Chemical Engineering, Baotou Iron and Steel Vocational Technical College, Baotou, Inner Mongolia 014010, China

Abstract Pantograph is an important equipment of current collector for the electric train. The abrasion of the pantographic slide affects the coordination of pantograph-catenary system. Automatic measurement of pantographic slide abrasion is one of the important means to realize the automatic fault inspection of pantograph. According to the image characteristics of pantographic slide captured by the vision measuring system, an accurate recognition algorithm for upper and lower edges of the slide is proposed. The proposed algorithm is fulfilled by employing the accurate sub-pixel edge location method based on partial area effect. By comparing with other common edge extraction algorithms, the feasibility and superiority of the proposed algorithm are proved.

Key words machine vision; pantograph; slide; sub-pixel edge extraction; edge recognition

OCIS codes 150.1135; 150.3040; 330.7325; 330.5000

1 引言

受电弓是电力机车运行时重要的受流装置,受电弓与接触网的配合状况直接影响着电力机车受流质量。受电弓在列车运行时存在机械摩擦和电气磨损。如果不及时对受电弓滑板进行检测,容易留下隐患,影响列车的安全运行。目前,国内常见的滑板磨损测量通常是列车入库停车,列检人员登顶使用游标卡尺或者卷尺测量。这种测量方式受人为为主观因素影响较大,测量精度不高,且在高压危险环境下,工作人员存在重大人身安全隐患。受电弓滑板厚度的非接触、自动化测量是确保铁路电气化列车安全运行的重要保障^[1-2]。

随着计算机技术的发展,机器视觉技术在铁路自动化检测领域得到了越来越多的应用^[3-6]。在目标识别或者图像分割中,边缘提取是图像分析的重要步骤^[7-8]。常见的图像边缘有“阶跃型”和“屋脊型”两种形式^[9]。受电弓滑板与背景板以及受电弓支撑架之间具有理想的边缘分界,因此,滑板边缘属于阶跃型边缘。复杂环境下受电弓滑板边缘的精确提取是完成受电弓滑板磨损测量的前提条件。冯倩等^[1]结合文献^[10-11]中的算法获取了受电弓滑板边缘,取得了较满意的结果。罗鹏等^[12]根据光学三角测量原理,设计了一套测量机车受电弓滑板磨损的装置,滑板磨损检测精度达到 0.5 mm,满足了铁道部的要求。涂晓斌^[13]根据发明问题解决理论

收稿日期: 2017-11-20; 收到修改稿日期: 2017-12-21

作者简介: 朱燕玉(1974—),女,硕士,高级工程师,主要从事轧钢工艺和设备设计、材料加工工艺等方面的研究。

E-mail: iam_zhuyanyu@163.com

(TRIZ)提出了一种受电弓滑板图像边缘检测算法,较好地完成了受电弓滑板磨耗的测量任务。本文针对列车入库时,在检测棚安装多组双目立体视觉测量系统,对受电弓滑板以仰拍方式进行拍照,以测量系统获得的滑板图像为研究目标,重点分析滑板侧面上边缘与下边缘的提取算法,实现受电弓滑板上边缘和下边缘的自动识别,为后续的滑板磨耗测量做准备。

2 受电弓滑板上边缘和下边缘的识别

2.1 图像预处理

考虑到相机和背景板的安装情况,在检测棚两侧分别安装两套双目立体视觉测量系统,为了保证背景

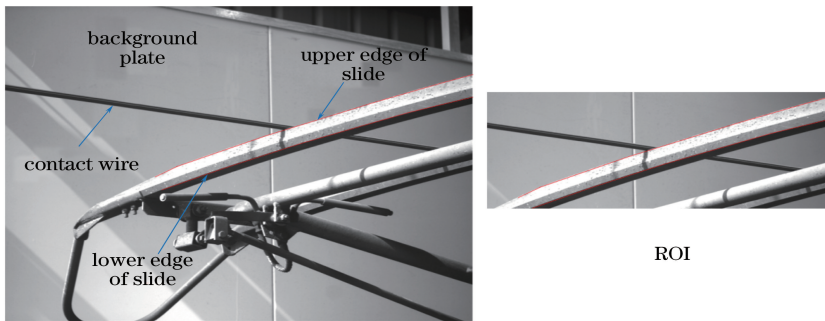


图1 受电弓滑板拍摄图像

Fig. 1 Image of pantographic slide

2.2 图像边缘的亚像素提取

文献[14]提出一种基于部分面积作用的亚像素边缘提取方法,可以准确提取图像边缘的像素坐标和边缘的梯度方向。假设在像素 (i, j) 处有一边缘经过,如图2所示,则该像素的灰度值可以定义为:

$$I_{i,j} = \frac{A \cdot S_A + B \cdot S_B}{h^2}, \quad (1)$$

式中 A 和 B 为边缘两侧像素灰度值, S_A 和 S_B 为 A 和 B 灰度值在该像素内分别所占的面积, h 为一个像素边长,且满足 $h^2 = S_A + S_B$ 。

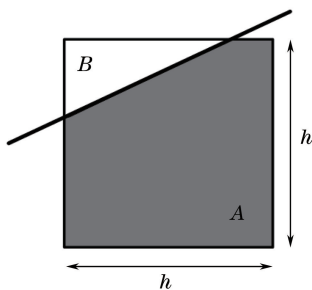


图2 有直线边缘经过的像素灰度值求取模型

Fig. 2 Pixel grey value calculation model with straight edge

板在相机视野内,分别使相机对受电弓滑板远处半端部分进行图像拍摄。每次受电弓进入检测棚时,都会精确触发光电对射开关,发出信号启动检测棚两端的光源和相机,对受电弓滑板进行补光和拍照。因此,每一次对受电弓的成像,滑板在图像中的位置基本固定。根据这一特性,可以确定滑板的感兴趣区域(ROI),排除了其他复杂背景的干扰。检测棚右侧立体视觉测量系统中一个相机拍摄的远处半端的受电弓图像如图1所示,图像的分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 2450 \text{ pixel}$,选取目标ROI区域为 $[400:1200, 700:2450]$ 。受电弓图像在实际拍摄中,不可避免地存在一些图像噪声,本研究采用中值滤波来滤除图像噪声。

不失一般性,以二次曲线模型 $y = cx^2 + bx + a$ 为图像边缘,如图3所示,该曲线将图像分为上下两个灰度部分,曲线上方像素灰度值记为 B ,曲线下方像素灰度值记为 A ,以像素 (i, j) 为中心,选取 5×3 的矩形框, S_L 、 S_M 和 S_R 分别为矩形框中第一列、第二列和第三列中各像素灰度值的和。在矩形框中,每一列处于边缘下方像素的面积为:

$$\begin{cases} L = \int_{-3h/2}^{-h/2} \left(cx^2 + bx + a + \frac{5h}{2} \right) dx = \frac{13}{12}ch^3 - bh^2 + ah + \frac{5h^2}{2} \\ M = \int_{-h/2}^{h/2} \left(cx^2 + bx + a + \frac{5h}{2} \right) dx = \frac{1}{12}ch^3 + ah + \frac{5h^2}{2} \\ R = \int_{h/2}^{3h/2} \left(cx^2 + bx + a + \frac{5h}{2} \right) dx = \frac{13}{12}ch^3 + bh^2 + ah + \frac{5h^2}{2} \end{cases} \quad (2)$$

为了计算方便,令 $h = 1 \text{ pixel}$,由以上关系可以得出边缘二次曲线模型的各项系数:

$$\begin{cases} c = \frac{S_L + S_R - 2S_M}{2(A - B)} \\ b = \frac{S_R - S_L}{2(A - B)} \\ a = \frac{2S_M - 5(A + B)}{2(A - B)} - \frac{1}{12}c \end{cases} \quad (3)$$

灰度值 A 和 B 为:

$$\begin{cases} A = \frac{1}{3}(I_{i,j+2} + I_{i+1,j+2} + I_{i+1,j+1}) \\ B = \frac{1}{3}(I_{i-1,j-1} + I_{i-1,j-2} + I_{i,j-2}) \end{cases} \quad (4)$$

图像在竖直方向上距像素 $I(i, j)$ 中心的距离, 即该边缘在像素 (i, j) 竖直方向上的亚像素位置为 $(0, a)$ 。

在 (i, j) 位置处边缘点归一化的法向量为:

$$N = (n_x, n_y) = \frac{A - B}{\sqrt{1 + b^2}} [b, -1] \quad (5)$$

利用上述描述的亚像素边缘提取方法, 可以精确求取图像边缘点的亚像素位置、法向量以及边缘两侧图像的灰度值等特征, 对后续滑板上下边缘的识别具有重要意义。

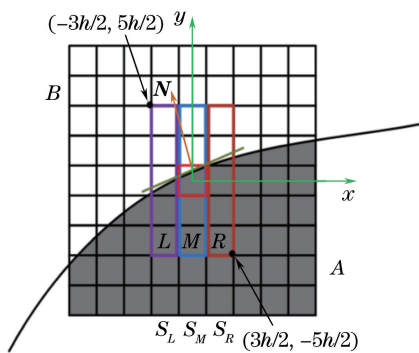


图3 二次曲线边缘求取模型

Fig. 3 Model of edge calculation by a second order curve

利用上述方法, 对受电弓滑板图像进行边缘提取, 由于所拍摄受电弓滑板近似呈水平方向, 为了减小其他竖直方向边缘的干扰, 只提取水平方向上的边缘, 受电弓滑板边缘的提取效果如图4所示, 其中的蓝色箭头表示边缘在该像素点位置处的归一化法向量, 显示了此点处边缘的梯度信息。上述算法对边缘两侧灰度阈值差值有较强的敏感性, 当边缘两侧灰度值的差值超过一定阈值时, 此点就被默认为边缘点。根据滑板上下边缘成像的整体情况, 选取适当的阈值, 使滑板边缘能被顺利地检测出来。同时, 由于滑板侧面以及周围的复杂情况, 也检测出了一些干扰边缘, 例如滑板侧面最底部支撑架的边缘、

接触线上下边缘以及滑板侧面不规则立体结构所呈现的边缘, 这些都阻碍了滑板边缘的正确提取。

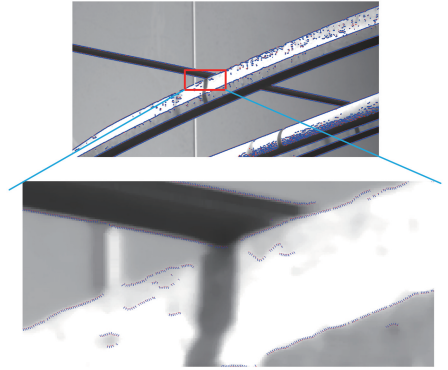


图4 基于部分面积作用的图像边缘的亚像素提取

Fig. 4 Sub-pixel edge extraction based on partial area effect

2.3 滑板边缘的识别

在滑板 ROI 区域内, 需要对上述干扰边缘进行筛选。由于相机以仰拍方式拍照, 补光光源俯视照射, 在图像上表现为滑板底部出现一条狭长的阴影区域, 组成阴影的上下边缘分别是滑板外侧的下边缘和滑板里侧的下边缘。根据滑板阴影区域所提取的边缘特征情况以及滑板边缘两侧厚度情况, 先分析滑板下边缘的检测情况。滑板上边缘检测的具体实现过程如下所述。

从滑板左下边缘点开始, 所求边缘点在竖直方向的梯度方向向上, 且该边缘点两侧由于滑板阴影造成的边缘点两侧的灰度值大于一定阈值, 则可确定此点为滑板的下边缘, 然后按照确定的边缘点以及斜率作为约束, 按上述方法向右不断搜索, 即可实现下边缘的确定。由于背景板的作用, 滑板所成的图像背景比较均匀, 且背景无干扰边缘, 因此, 滑板最右端的上边缘点容易确定。滑板上边缘的确定从滑板最右上边缘点的搜寻开始, 如果边缘点满足以下条件: 边缘点在竖直方向的梯度方向向上, 且该边缘点两侧由于滑板和背景板两侧灰度值不一样, 且大于一定的阈值, 即可确定此点为滑板上边缘初始点。然后, 按照确定的上边缘点以及斜率作为约束, 按上述方法向左不断搜索, 即可实现滑板上边缘的检测。

滑板上边缘和下边缘的识别算法总结如下:

1) 确定滑板左侧下边缘的起始点, 如果左侧最下部的边缘点满足以下条件, 则确定此点为滑板下边缘的起始点:

$$\begin{cases} n_{y,id} > 0 \\ |A_{id} - B_{id}| > T_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $n_{y,id}$ 为左侧下部第 i 个下边缘点的竖直方向的

梯度值, A_{id} 为左侧下部第 i 个下边缘点的下方的灰度值, B_{id} 为左侧下部第 i 个下边缘点的上方的灰度值, T_1 为下边缘点两侧灰度阈值;

2) 确定滑板下边缘的初始点之后, 以此点为搜索起点, 向右搜索连接点, 如果出现中断点, 以当前点之前所确定的边缘点斜率作为约束, 拟合当前中断点, 直至对所有下边缘点完成搜索;

3) 确定滑板右边上边缘的起始点, 如果右侧最上部的边缘点满足以下条件, 则确定此点为滑板上边缘的起始点:

$$\begin{cases} n_{y_{iu}} > 0 \\ |A_{iu} - B_{iu}| > T_2 \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $n_{y_{iu}}$ 为右侧上部第 i 个上边缘点的竖直方向的梯度值, A_{iu} 为右侧上部第 i 个上边缘点的下方的灰度值, B_{iu} 为右侧上部第 i 个上边缘点的上方的灰度值, T_2 为上边缘点两侧的灰度阈值;

4) 确定滑板上边缘的初始点之后, 以此点为搜索起点, 向左搜索连接点, 如果出现中断点, 以当前中断点之前所确定的边缘点的斜率作为约束, 继续确定当前中断点, 直至所有上边缘点搜索完成。

按照以上步骤, 即可实现滑板上边缘和下边缘的精确定位。

3 实验结果与分析

3.1 受电弓滑板上边缘和下边缘检测结果

本算法实现环境为 Matlab 2015a, 所用硬件设备环境为 Intel Pentium CPU G630 4 核, 8 G 内存, Win10 操作系统, 所使用的相机为面阵电荷耦合器件 (CCD) 相机, 型号为 IMPERX-B1411。

考虑到背景板的安装范围和相机的视野, 分别在检测棚两侧安装一组双目立体视觉测量系统, 对

受电弓滑板远处半端部分进行拍照。以任意时刻拍摄的两组受电弓滑板图像边缘检测为例, 如图 5 所示, 第一行图像为检测棚左侧安装的两组相机所拍摄的某一时刻的受电弓图像, 第二行图像为检测棚右侧安装的两组相机所拍摄的受电弓图像。根据受电弓在图像中的实际位置, 令 $T_1 = 200, T_2 = 100$ 。按照上述提出的算法, 滑板上边缘和下边缘的提取结果分别如图 5 中红色线所示。可以看到, 所提算法能够精确检测出滑板的上下边缘, 并且根据滑板边缘亚像素信息, 可以为边缘点的匹配与三维重建提供重要基础。

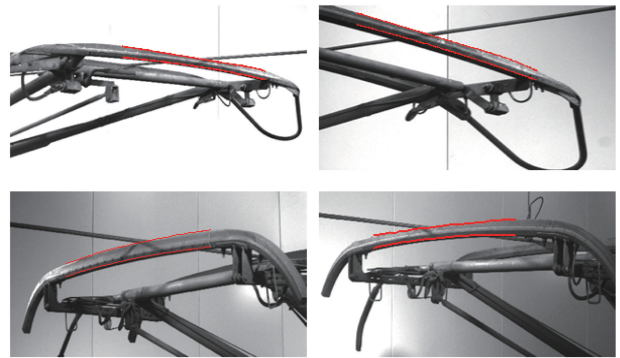


图 5 利用所提算法检测出的滑板上边缘和下边缘
Fig. 5 Upper and lower edge of pantographic slide by using the proposed algorithm

3.2 与其他边缘提取方法的对比和分析

其他常见的、经典的边缘提取算法也有很多种, 比如一阶导数的边缘检测算子 (例如 Sobel 算子^[10]), Canny 边缘检测算法^[11], 以及基于结构森林方法的快速边缘提取^[15]。为了验证所提算法的优越性, 利用上述常见的算法对受电弓滑板分别进行边缘提取, 并与本算法提取滑板边缘的结果进行对比, 如图 6 所示。

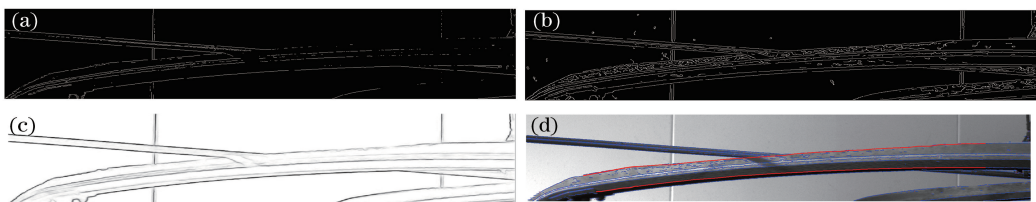


图 6 不同算法对受电弓滑板边缘的检测结果。(a) Sobel 算法; (b) Canny 算法; (c) 结构森林方法; (d) 所提算法
Fig. 6 Edge detection results of pantographic slide by using different methods. (a) Sobel algorithm; (b) Canny algorithm; (c) structured forest algorithm; (d) proposed algorithm

从图 6 可以看出, 基于一阶描述子的 Sobel 梯度算子对滑板下边缘的响应不敏感, 滑板下边缘大部分线段都没有检测出来, 且上边缘断续严重, 影响后续边缘的识别; 基于 Canny 边缘的检测算法对滑板侧面不相干的边缘过于敏感, 检测出过多无关边

缘, 对滑板上边缘的精确识别造成很大的干扰; 基于结构森林方法的边缘提取方法虽然能较准确地提取出滑板侧面各个边缘轮廓, 并且噪声边缘少, 但所检测出的边缘不是单像素边缘, 需要进一步地去细化各个边缘, 降低了边缘的提取精度, 且各个边缘点信

息不够充分,阻碍了后续滑板边缘点之间的匹配与三维重建等工作。所提算法检测到的滑板边缘结果如图 6(d)所示。首先,利用基于部分面积作用的亚像素边缘提取算法,成功地提取了图像边缘的丰富信息。然后,根据滑板的成像特点和滑板边缘梯度信息,可以在复杂图像边缘下,快速识别出滑板的上下边缘,并且所求得的边缘均是亚像素级,各个边缘点的位置信息和梯度信息均被求出。因此,利用本算法检测的滑板边缘,可以为后续滑板边缘点的匹配和三维重建打下良好的基础。

4 结 论

根据立体视觉测量系统所拍摄的受电弓图像特点,提出了一种精确的受电弓滑板亚像素级边缘检测算法,实现了在复杂图像环境下滑板上边缘和下边缘的精确定位。通过实验分析可知,所提算法对滑板边缘的提取具有较好的检测效果。与其他经典边缘提取算法相比,所提算法对滑板边缘具有较强的适应性,证明了该算法的优越性和可行性。

参 考 文 献

- [1] Feng Q, Chen W R, Wang Y L, *et al.* Research on the algorithm to measure the pantographic slipper abrasion[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1): 109-113.
冯倩, 陈维荣, 王云龙, 等. 受电弓滑板磨耗测量算法的研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(1): 109-113.
- [2] Sun F H. Design of upper-computer software and handling for measurement system of pantograph slide plate's abrasion[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
孙丰晖. 受电弓滑板磨耗检测系统的设计及调试[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [3] Lu S F, Liu Z. A fast alignment method in sequence images of multiple units train [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0915002.
路绳方, 刘震. 动车组列车序列图像快速对齐方法[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0915002.
- [4] Lu S F, Liu Z. Image comparison and analysis of trouble of moving EMU[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 091503.
路绳方, 刘震. 动车组运行故障动态图像比对分析方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 091503.
- [5] Zou R, Li J K, Xu J X, *et al.* Deflection fault detection for locking plate of freight trains under complex scene[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(4): 917-922.
邹荣, 李健康, 徐家祥, 等. 复杂场景下铁路货车锁紧板偏转故障检测[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(4): 917-922.
- [6] Li T T, Yang F, Xu X L. Method of large-scale measurement based on multi-vision line structured light sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1104003.
李涛涛, 杨峰, 许献磊. 基于多视线结构光传感器的大尺度测量方法[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1104003.
- [7] Zhou L, Yang N. Image scratch detection research based on adaptive binary tree [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 051002.
周琳, 杨娜. 基于自适应二叉树算法的图像划痕检测研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5): 051002.
- [8] Shen H, Li S M, Bo F C, *et al.* On road vehicles real-time detection and tracking using vision based approach[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1076-1083.
沈岷, 李舜酩, 柏方超, 等. 路面车辆实时检测与跟踪的视觉方法[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1076-1083.
- [9] Zhang G J. Vision measurement[J]. Beijing: Science Press, 2008.
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [10] Sobel I E. Camera models and machine perception [D]. Palo Alto: Stanford University, 1970.
- [11] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [12] Luo P, Wang Z Y, Gao X R, *et al.* Abrasion detection of pantographic slipper when locomotive entering warehouse[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(z1): 88-90.
罗鹏, 王泽勇, 高晓蓉, 等. 电力机车入库受电弓滑板磨耗检测[J]. 光电工程, 2004, 31(z1): 88-90.
- [13] Tu X B. Research of pantogtaph wear detection system based on machine vision [D]. Guangzhou: Guangdong University of technology, 2013.
涂晓斌. 基于机器视觉的受电弓滑板磨耗检测系统研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2013.
- [14] Trujillo-Pino A, Krissian K, Alemán-Flores M, *et al.* Accurate subpixel edge location based on partial area effect[J]. Image & Vision Computing, 2013, 31(1): 72-90.
- [15] Dollár P, Zitnick C L. Structured forests for fast edge detection[C]. IEEE International Conference on Computer Vision, 2013: 1841-1848.