

基于能量中心的电力机车接触导线几何参数视觉检测方法

潘雪涛^{1,2,3}, 屠大维¹, 邬华芝²

- (1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;
2. 常州工学院 光电工程学院, 江苏 常州 213002;
3. 常州市光电子材料与器件重点实验室, 江苏 常州 213002)

摘要:传统的电力机车接触导线几何参数检测方法存在若干不足。根据检测要求和磨损后接触线的图像特征,提出了基于双目视觉技术的在线、非接触、多参数综合测量方法。对基于 LOG 算子的线条边缘图像处理方法的误差进行了深入的理论分析,在此基础上提出了采用图像能量中心算法的边缘定位新方法,并进行了数值模拟。仿真结果表明:能量中心算法的抗干扰和抗模糊能力更强,定位精度更高。以不同高度、拉出值和磨损宽度的圆钢为检测对象进行了验证实验,并与激光测距仪和数显式游标卡尺检测的结果进行了比对。实验表明,能量中心算法的边缘检测精度优于 LOG 算法,同时,提出的测量方法示值误差小、重复性较好,能够满足接触线在线、非接触综合检测的需要。

关键词:电力机车接触导线; 双目视觉技术; 光电检测; LOG 算子; 能量中心
中图分类号: TN206 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-4105-06

Visual inspection method on geometric parameters of electric locomotive contact wire based on energy center

Pan Xuetao^{1,2,3}, Tu Dawei¹, Wu Huazhi²

- (1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. School of Optoelectronic Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;
3. Changzhou Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Devices, Changzhou 213002, China)

Abstract: There are certain deficiencies in detection methods on the traditional electric locomotive contact wire geometry parameters. Based on the testing requirements and image characteristics of the worn wire, the integrated measurement method of online, non-contact, multi-parameter was proposed based on binocular vision technology. In-depth theoretical analysis had been conducted on image edge detection based on LOG algorithms, on which new methods of edge location by means of energy center algorithm were proposed, and numerical simulations were conducted. Simulation results show that the algorithm of energy centers has got stronger anti-jamming and anti-blur capabilities, with higher positioning accuracy. Verification experiments are carried out by using round steel with different heights, stagger values and wear widths as the detection object, and it is compared with the results tested by the laser rangefinders

收稿日期: 2014-04-11; 修订日期: 2014-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(60774102); 江苏省教育厅自然科学基金项目(13KJD460001);

江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师培养项目; 上海市智能制造及机器人重点实验开放式课题(ZK1408)

作者简介: 潘雪涛(1973-), 男, 副教授, 博士生, 主要从事激光微纳加工、信息处理、光电检测技术方面的研究。Email: pxtpqz@163.com

导师简介: 屠大维(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光机电一体化精密机械及仪器等方面的研究。

Email: tdwshu@staff.shu.edu.cn

and digital display vernier calipers. Experimental results show that the edge detection by means of energy center algorithm is more accurater than LOG algorithms. Simultaneously, the measurement method proposed in this paper has smaller indication errors, better reproducibility, and it can meet the integrated needs of online, non-contact testing on the contact line.

Key words: electric locomotive contact wire; binocular vision technology; photoelectric detection; LOG algorithms; energy center

0 引言

在电气化铁路的施工和日常运营中，需要对电力机车接触导线(以下简称为接触线)的几何参数(导线高度、拉出值、磨损宽度)实时测量,以便进行及时调整,避免局部磨损加大导致使用寿命缩短^[1]。传统检测方法包括利用传感器阵列检测法、激光扫描法等测量接触线高度和拉出值,由巡检员工采用游标卡尺测量接触线磨损宽度等^[2-3]。这些方法均不能实现多个参数的在线综合测量,且效率低、危险大,无法满足频繁检测和实时监控的需求。利用接触线磨损面受光照后的光反射率显著增强、磨损边缘较为清晰,以及图像边缘近似为线条边缘等特征,提出基于双目视觉测量方案、并采用图像能量中心算法获取边缘定位的新方法,实现接触线几何参数非接触在线综合测量,可确保机车运行安全。

1 双目视觉技术在接触线几何参数检测中的应用

当光源照射到接触线,其磨损面的光反射率比未磨损部分显著增大,使得磨损后接触线图像边缘呈较为清晰的线条状边缘,如图 1 所示。因此,利用双目视觉技术,对图像边缘点 A、B 进行精确的空间坐标定位,就能够实现其几何参数的非接触综合测量。

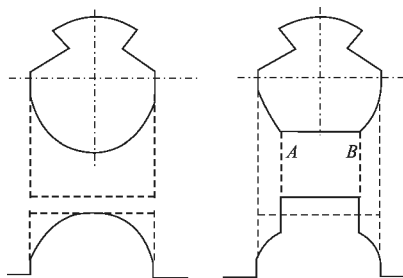


图 1 导线磨损前后反射光强度曲线

Fig.1 Reflected light intensity curve before and after wire is worn

如图 2 所示,两个摄像机水平反向放置于列车车顶,通过安装在其前方的反射镜,在空间交汇形成一光电靶面。光电靶面的大小和位置可以通过调整反射镜的角度得以实现,以确保接触线位于光电靶面内。图像平面和被测接触线之间构成一个三角形,基于视差和光学三角原理^[4-6]就可以实现边缘点的坐标定位。

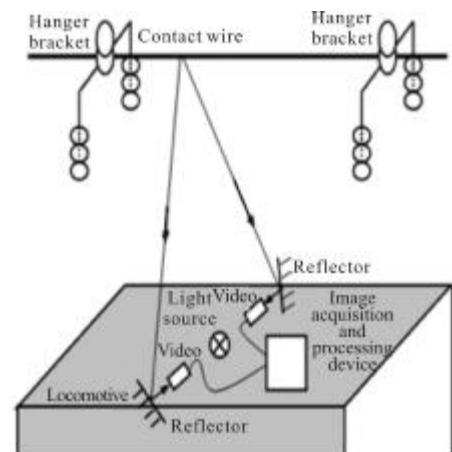


图 2 接触线几何参数双目视觉测量示意图

Fig.2 Schematic diagram of contact wire geometry parameters by binocular vision measurement

边缘点空间坐标定位原理如图 3 所示。两摄像机对称布站,图像传感器光敏面尺寸均为 $2T$,镜头

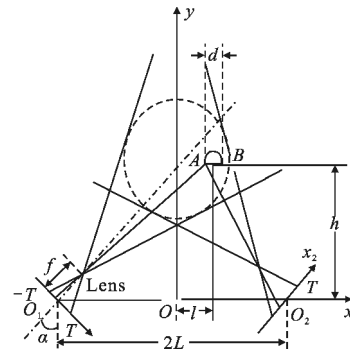


图 3 边缘点坐标测量原理图

Fig.3 Schematic diagram of measuring edge point coordinates

焦距均为 f , 两光敏面中心距为 $2L$, 摄像机光轴与 y 坐标轴之间的夹角均为 α 。

若光电靶面内接触线磨损面边缘点 $A(x_A, y_A)$ 在传

$$y_A = \frac{2x_{1A}x_{2A}(L\sin\alpha - f)\sin\alpha - (x_{1A} - x_{2A})(2L\sin\alpha - f)\cos\alpha - 2Lf^2\cos^2\alpha}{(x_{1A} - x_{2A})f\cos 2\alpha - (x_{1A}x_{2A} + f^2)\sin 2\alpha} \quad (2)$$

同理, 可得 B 点坐标值。对 A 、 B 两点进行坐标定位后, 根据几何关系就可获得接触线距车顶的高度 h 、拉出值 l 和磨损面宽度 d 。

2 接触线磨损边缘定位算法

2.1 LOG 算子及其误差分析

接触线几何参数测量的准确性取决于磨损面边缘点 A 、 B 的精确定位, 因此找寻一种合适的边缘定位算法是本测量方案的关键。通常, 线条边缘的特征提取可转化为寻找两个独立阶跃信号的边缘点来实现。对于阶跃边缘, 其边缘点与图像信号的一阶导数极值点和二阶导数过零点一致。事实上, 利用二阶导数过零点检测阶跃边缘的最佳算子是 LOG 算子^[8]。

然而, 上述结论是在一个独立边缘的条件下得到的。磨损接触线有两个边缘, 如果磨损较小, 相邻边缘的间距比较小。此外, 高速运行中车辆产生的振动、材料的不均匀等因素, 实际接触线的磨损边界会产生模糊。再加上环境条件的影响, 图像信号带有噪声, 这些因素都会导致相邻边缘之间的相互影响, 从而降低边缘点的定位精度, 带来较大的测量误差^[9]。简单起见, 以理想一维连续二值图像为例进行分析。信号模型为:

$$t(x) = \sum_{i=0}^{n-1} (-1)^i U(x - e_i) \quad (3)$$

其中, $U(x - e_i) = \begin{cases} 1 & x \geq e_i \\ 0 & x < e_i \end{cases}$, e_i 为信号边缘点, $i=0, 1, 2, \dots, n-1$ 。

对其用尺度为 σ 的 LOG 算子进行边缘检测的结果为:

$$f''(x)h_\sigma''(x) * t(x) = \sum_{i=0}^{n-1} [(-1)^i h_\sigma''(x) * U(x - e_i)] = \frac{1}{\sigma^3\sqrt{2\pi}} \sum_{i=0}^{n-1} (-1)^i (x - e_i) \exp\left(-\frac{(x - e_i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中: $h_\sigma(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$ 。

传感器上对应成像点的坐标值分别为 x_{1A} 、 x_{2A} , 则 A 点坐标值为^[7]:

$$x_A = \frac{(x_{1A} + x_{2A})(L - f\sin\alpha)f}{(x_{1A} - x_{2A})f\cos 2\alpha - (x_{1A}x_{2A} + f^2)\sin 2\alpha} \quad (1)$$

对任意一条边缘 x_k , 公式(4)变为:

$$f''(x_k) = \frac{1}{\sigma^3\sqrt{2\pi}} \left[\sum_{i=0}^{k-1} (-1)^i (x_k - e_i) \exp\left(-\frac{(x_k - e_i)^2}{2\sigma^2}\right) + \sum_{i=0}^{n-1} (-1)^i (x_k - e_i) \exp\left(-\frac{(x_k - e_i)^2}{2\sigma^2}\right) \right] \quad (5)$$

当各边缘相距较远, 其间距 $|x_k - e_i| \gg \sigma$, 公式(5)中 $\exp\left(-\frac{(x_k - e_i)^2}{2\sigma^2}\right) \approx 0$, 即 $f''(x_k) \approx 0$, 此时边缘点与二阶导数过零点一致。若边缘间距 $|x_k - e_i|$ 等于甚至小于 σ , $f''(x_k) \neq 0$, 边缘点不再是二阶导数过零点, 此时采用 LOG 算法进行边缘检测误差较大。

显然, 对边缘 x_k 影响最大的是相邻边缘。若只考虑相邻三个边缘, 由公式(5)可得:

$$f''(x_k) = \frac{1}{\sigma^3\sqrt{2\pi}} \left[(-1)^{k-1} (x_k - e_{k-1}) \exp\left(-\frac{(x_k - e_{k-1})^2}{2\sigma^2}\right) + (-1)^{k+1} (x_k - e_{k+1}) \exp\left(-\frac{(x_k - e_{k+1})^2}{2\sigma^2}\right) \right] \quad (6)$$

只有当 $|x_k - e_{k-1}| = |e_{k+1} - x_k|$ 时, $f''(x_k) = 0$ 。但是根据磨损接触线的图像特征, 这一条件不可能满足, 故基于 LOG 算法的磨损接触线边缘定位精度较低。

2.2 基于能量中心的图像边缘定位算法

对于连续二值图像, 不管其边缘间距如何变化, 图像能量中心(中点)的位置并不会受到影响, 故可以采用能量中心算法^[10-12]先确定图像信号区间的波谷和波峰的中心位置, 在此基础上反算出边缘点。

参考文献[12]提出了采用固定阈值确定图像区间的方法。但是受环境、视距的影响, 图像质量会发生变化, 固定的阈值很有可能将波谷或波峰丢失。如图 4 所示, 若预先设定阈值 T_1 、 T_2 , 会导致四个波谷丢失。设计中提出了改进的浮动阈值法确定图像区间。首先检测出信号的某一极值点 x_i , 找到与其相邻的波谷(或波峰)值 x_{i-1} 、 x_{i+1} , 根据公式(7)计算出 a 、 b , 将其作为决定波峰(或波谷)区间的阈值, 而图像区间即为 $[x_a, x_b]$ 。

$$a = \frac{f(x_i) + f(x_{i-1})}{2} \quad b = \frac{f(x_i) + f(x_{i+1})}{2} \quad (7)$$

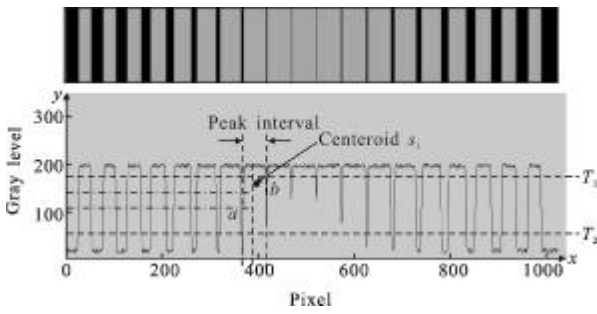


图 4 一维连续二值图像、灰度曲线及其波峰区间

Fig.4 One-dimensional continuous binary images, gray curve and peak interval

对图像区间 $[x_a, x_b]$ 内各点,按公式(8)计算其加权算术平均值^[12]:

$$\bar{x}_i = \sum_{m=a}^b \left[\frac{x_m f(x_m)}{\sum_{m=a}^b f(x_m)} \right] \quad (8)$$

则图像能量中心 S_i 对应的像素坐标值即为 \bar{x}_{si} 。

令图像的 n 个边缘为 e_0, e_1, \dots, e_{n-1} , $n-1$ 个中心点为 $s_0, s_1, s_2, \dots, s_{n-2}$ 。则有:

$$\begin{cases} e_0 + e_1 = 2\bar{x}_{s_0} \\ e_1 + e_2 = 2\bar{x}_{s_1} \\ \vdots \\ e_{n-2} + e_{n-1} = 2\bar{x}_{s_{n-2}} \end{cases} \quad (9)$$

解之得:

$$\begin{cases} e_1 = 2\bar{x}_{s_0} - e_0 \\ e_2 = 2\bar{x}_{s_1} - 2\bar{x}_{s_0} + e_1 \\ \vdots \\ e_{n-1} = 2\bar{x}_{s_{n-2}} - 2\bar{x}_{s_{n-3}} + \dots + 2\bar{x}_{s_1} - 2\bar{x}_{s_0} - e_0 \end{cases} \quad (10)$$

对于公式(10)中的起始边缘 e_0 ,可以在区间 (x_{i-1}, x_i) 采用 LOG 算子结合线性拟合的方法实现子像素级的边缘定位^[7]。

由上述理论分析可知,对于具有线条边缘的接触线图像,采用能量中心算法确定图像的中心位置,再计算其边缘点坐标的图像处理方法基本不受边缘间相互作用的影响,具有更高的定位精度。

3 数值模拟与实验

3.1 数值模拟

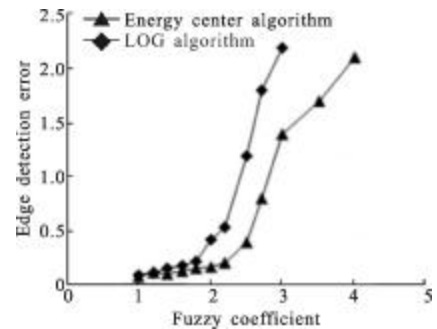
根据公式(3),给定边缘点位置,产生理想的不

同间距的连续二值图像信号,将该信号与高斯函数卷积使其产生模糊,并叠加随机白噪声,得到仿真图像信号。图 4 所示为高斯模糊系数为 1、信噪比 SNR 为 32dB 条件下不同边缘间距的图像信号及其灰度曲线。

编制基于 VC++ 的图像处理程序,对不同间距、模糊程度和信噪比的图像分别进行基于 LOG 算子和能量中心算法的边缘检测仿真实验。限于篇幅,这里仅给出部分仿真实验数据。

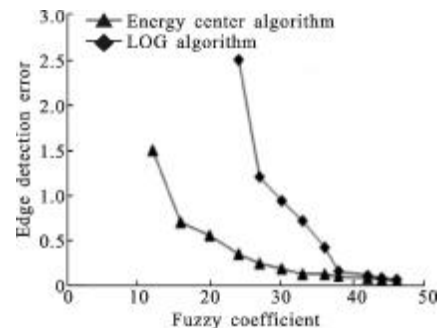
图 5(a)所示为在信噪比为 32 dB 条件下,不同模糊程度图像两种算法边缘检测误差曲线。相同条件下,能量中心算法边缘检测误差小于 LOG 算法;随着模糊系数的增大,两种边缘检测算法的误差均随之增大,但 LOG 算法误差增大十分显著,而能量中心算法相对更加稳定。

图 5(b)所示为模糊系数为 1 条件下,不同信噪比图像两种算法的检测误差曲线。相同噪声下,能量中心算法边缘检测误差要比 LOG 算法小得多;随着



(a) 不同模糊程度图像边缘检测误差曲线

(a) Different degrees of fuzzy image edge detection average error curve



(b) 不同信噪比图像边缘检测误差曲线

(b) Different SNR image edge detection average error curve

图 5 仿真数据

Fig.5 Simulation data

噪声的加大,两种算法的边缘检测误差都会增大,但前者误差变化程度小,而后者检测误差会迅速增大。这表明能量中心算法对噪声并不敏感,抗干扰能力更强。

由此可以得出结论,同等条件下,能量中心算法的定位精度要高于 LOG 算法,其抗噪声和抗模糊能力都要强得多,定位更加稳定、可靠。

3.2 实验

3.2.1 测量装置

接触线距列车车顶为 1700~2500mm,拉出值最大为 400mm,接触导线直径一般为 10.19~14.40mm^[7]。实验中,将直径为 15mm 左右的圆钢用砂轮打磨成不同的宽度模拟不同磨损程度的接触线,同时调整悬挂支架的高度和位置模拟不同的高度和拉出值,如图 2 所示。考虑到测量精度、运算速度以及成本等多个因素,图像传感器选用 Photon Vision System 公司的 LIS1024 线阵 CMOS,其像素分辨率为 1×1024、光敏面尺寸为 7.8 μm×125 μm,摄像机透镜焦距 f 为 30mm。两摄像机对称布站,交汇仰角 α 为 35°,两光敏面中心距为 2000mm^[7]。

3.2.2 实验结果

在双目视觉测量系统的光电靶面内选取了不同高度、拉出值和磨损宽度的模拟导线,分别采用 LOG 算子和图像能量中心算法对采集的图像进行处理,计算其几何参数值。同时与使用博世 DLE70 激光测距仪(测量导线高度和拉出值)、数显式游标卡尺(测量磨损面宽度)检测的结果进行了比对。图 6 为磨损前后圆钢的图像。图 7 给出了部分实验数据比对曲线。

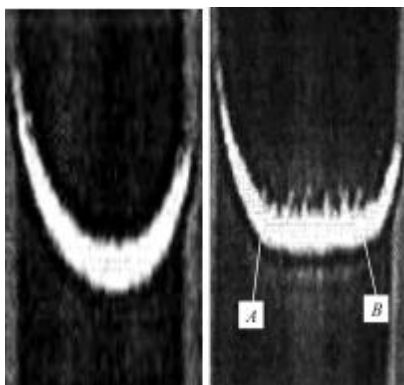
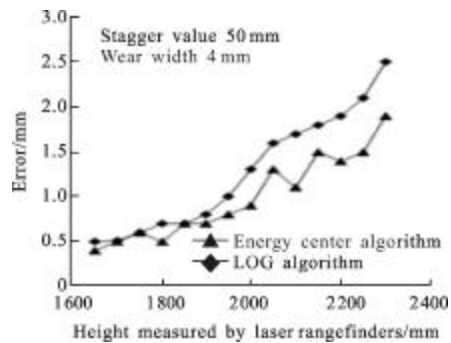


图 6 圆钢磨损前后图像

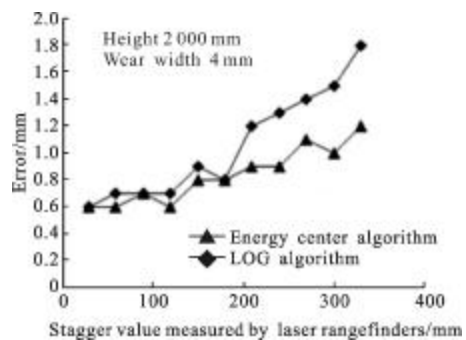
Fig.6 Images before and after round steel is worn

由图 7 可知,当接触线磨损较小使得相邻边缘相互影响增大,或者接触线离摄像机较远导致图像



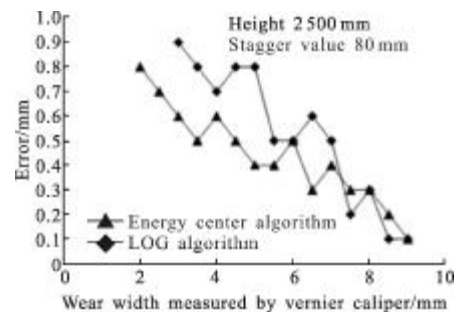
(a) 不同高度接触线测量误差曲线

(a) Error curve of measuring contact line in different heights



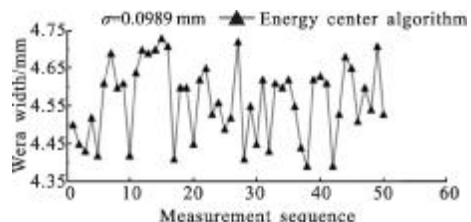
(b) 不同拉出值接触线测量误差曲线

(b) Error curve of measuring different stagger values of contact line



(c) 不同磨损宽度接触线测量误差曲线

(c) Error curve of measuring different wear widths of contact line



(d) 对磨损宽度为 4.5 mm 的接触线 50 次测量分布曲线

(d) Distribution curve of 50 times measuring contact line with wear width of 4.5 mm

图 7 部分实验数据曲线

Fig.7 Experiment data curve

模糊时,采用 LOG 算子进行边缘检测,定位精度降低。而图像能量中心算法受其影响较小,检测精度明显提高,这与理论分析和数值仿真的结论一致。此外,测量装置的模拟实验结果与用激光测距仪和游标卡尺人工测量的结果基本接近,且重复性较好,这表明基于双目立体视觉技术的测量方法可以实现接触线的在线、非接触综合测量。

4 结 论

针对电力机车接触导线几何参数传统检测方法的不足,提出了基于双目立体视觉技术的实时、非接触、多参数综合检测新方法。根据接触线图像信号特征,对利用 LOG 算子进行磨损边缘坐标定位所产生的误差进行了深入的理论分析。在此基础上提出了基于图像能量中心的边缘检测算法,给出了该算法详细的实现过程。编制了基于 VC++ 的图像处理程序对两种算法进行了数值模拟,结果表明能量中心算法的抗干扰和抗模糊能力更强,定位精度更高。以不同磨损宽度的圆钢为检测对象搭建了模拟实验系统,进行了验证实验,同时与激光测距仪和数显式游标卡尺检测的结果进行了比对。实验表明,当接触线磨损较小使得相邻边缘相互影响增大,或者接触线离摄像机较远导致图像模糊时,图像能量中心算法的边缘检测精度优于 LOG 算法,这与理论分析和数值模拟的结论一致。此外,利用该装置测量接触导线高度、拉出值和磨损宽度的最大误差分别为 2 mm、1.2 mm 和 0.1 mm,多次重复测量的标准差为 0.098 9 mm,均能够满足测量要求。

参考文献:

- [1] Yu Wanju. High Speed Electric Railway Catenary [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003. (in Chinese)
- [2] Chen Zhongbin, Zhou Yanfang, Wei Baoquan. Research and fabrication of portable laser measuring instrument for catenaries geometry parameter [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(4): 103-105. (in Chinese)
- [3] Han Zhiwei, Liu Zhigang, Zhang Guinan, et al. Overview of non-contact image detection technology for pantograph-catenary monitoring [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 35(6): 40-47. (in Chinese)
- [4] Sun Yanpeng, Liang Xiao'ao, Lang Yao. FPGA implementation of laser spot center location algorithm based on circle fitting [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(5): 970-973. (in Chinese)
- [5] Fan Fuming, Cheng Liangjun, Xiao Lei, et al. Establishment and analysis of auto-focus model for laser triangulation method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 2028-2032. (in Chinese)
- [6] Xing Jichuan, Luo Xiaohong. Measurement of truck carriage volume with laser triangulation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 3083-3087. (in Chinese)
- [7] Pan Xuetao, Zhang Yafei, Meng Fei, et al. Photo-electronic measurement system on geometry parameter of electric locomotive contact wire [J]. Instrument Technique and Sensor, 2011(3): 38-41. (in Chinese)
- [8] Suen J, Castan S. An optimal liner operator for step edge detection[J]. CVGIP, 1992(2): 112-133.
- [9] Gao Liang, Liu Xiaoyu, Liao Zhiwu, et al. Fuzzy boundary detection algorithm using multi-information fusion [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(11): 2506-2513. (in Chinese)
- [10] Li Zhanli, Liu Mei, Sun Yu. Research on calculation method for the projection of circular target center in photogrammetry [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(10): 2235-2241. (in Chinese)
- [11] Liu Zheng, Shang Yanna. High precision location for multi-scale light spot center[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1586-1591. (in Chinese)
- [12] Liu Ningzhong, Yang Jingyu. Recognition of two-dimension barcode based on midpoint detection [J]. Mini-Micro Systems, 2004, 25(2): 283-286. (in Chinese)