

文章编号 1004-924X(2018)01-0238-07

钢轨磨损视觉测量的轮廓精确快速提取

李文涛, 王培俊*, 唐晓敏

(西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为保证钢轨磨损动态视觉测量的高精度, 综合图像获取和图像处理技术, 实现了清晰光条图像获取和光条中心点亚像素坐标精确提取。根据光条与背景环境亮度的高对比度, 提出一种依据光条亮度的相机自动曝光法, 用于获取清晰的光条图像; 分析图像光条法线方向的亮度衰变特征, 采用动态阈值分割法初步提取光条, 滤除图像背景的同时保留光条法线方向的亮度衰减信息; 根据图像过度曝光信息确定光条中心点像素大致位置, 再对分割的光条图像相对应像素位置点计算 Hessian 矩阵, 获取光条中心点的亚像素坐标。采用 MFC 编写应用程序进行试验, 在不同光照环境和背景物的干扰下, 该方法可精确地提取光条中心, 与经典 Steger 算法相比提取精度偏差为 0.05 pixel, 运算时间节约 40%。试验结果验证了该方法稳定性好, 有较强的抗干扰能力, 较好地满足钢轨磨损测量的现场要求。

关键词: 视觉测量; 自动曝光; 图像处理; 亚像素光条中心

中图分类号: U213.42 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182601.0238

Accurate and rapid contour extraction of visual measurement for rail wear

LI Wen-tao, WANG Pei-jun*, TANG Xiao-min

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

* Corresponding author, E-mail: pjwang123@swjtu.edu.cn

Abstract: In order to ensure the high precision of dynamic visual measurement of rail abrasion, image acquisition and image processing technology were used to get clear light-stripe image and extract the sub-pixel coordinates of the light-stripe accurately. First, according to the high contrast between the light-stripe and the background brightness, a method of automatic exposure of the camera based on the brightness of the light-stripe was proposed, which could ensure a clear image of the light-stripe. Then the dynamic threshold segmentation method was presented to extract the light-stripe preliminarily according to the lightness decay feature of the light-stripe in the normal direction, this method can filter out the background of the image while preserving the normal attenuation of light. Finally, according to the overexposure information of the image to determine the approximate position of the center point of the light-stripe, then the Hessian matrix was calculated for the corresponding pixel position of the segmented image to obtain the sub-pixel coordinates of the light-stripe. Using MFC to write application for testing, under different illumination and background interference, this

收稿日期: 2017-05-08; 修订日期: 2017-07-18.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (No. 51305368); 四川省科技支撑计划资助项目 (No. 2013GZX0154)

method can accurately extract the center of light-stripe, the extraction accuracy is 0.05 pixel and the computation time is reduced by 40% compared with the classical Steger algorithm. Experimental results show that the proposed method has good stability and strong anti-interference ability, can meet the requirements of the rail abrasion measurement.

Key words: visual measurement; automatic exposure; image processing; sub-pixel light-stripe center

1 引言

随着列车运行速度的大幅提升,对如何保证铁路运输的安全提出了更高的要求。在对铁路运输事故具体原因分析中,钢轨的磨损在设备原因中排首位。精确地检测出钢轨的伤损,掌握其损伤的规律,可以保证铁路运输的安全,并能够降低运行和维护的成本^[1-2]。长期以来国内对钢轨磨损的测量都是采用手工测量方式,不仅效率低,而且准确度不高。轨道检测车、意大利 Mermec 公司开发的钢轨断面系统(RPS)以及 Optimess 奥特迈斯道岔检测仪等国外研发的检测系统因其费用昂贵难以推广^[3]。随着计算机技术和图像处理技术的发展,铁路轨道检测将逐渐向高效化和智能化的方向发展,视觉测量技术是未来重要的发展方向。

图像处理作为视觉测量领域一种重要的技术手段,受到国内外学者青睐,先后在相机自动曝光、图像分割及光条中心点提取方面开展了系列研究^[4-5]。Haruki 与 Kikiuchi^[6]提出固定权重区域法,将曝光重点放在屏幕中央并把图片分为 6 个区域,每个区域赋予不同权重;杨海涛等^[7]通过为图像直方图峰值区域分配较小的权重来降低不感兴趣区域,再根据图像加权亮度均值的比重确定图像自动曝光参数。钢轨视觉测量图像获取对象为光条,光条在图像中跨度大、占据像素少,难以划分区域赋予权重,而且整幅图像处理难以凸显光条特征。光条中心点提取方法有灰度阈值法、极值法、边缘法等,这些算法虽易于实现,但提取精度不高^[8];经典 Steger 算法^[9]精度高,鲁棒性好,但受光条宽度和背景影响严重,运算量大;孙军华等^[10]提出一种 Kalman 滤波、灰度极值法和 Hessian 矩阵相结合的光条中心点快速提取方法;贾倩倩等^[11]对图像灰度求偏导数和梯度,提取图像灰度变化最激烈部分作为光条中心点。但

现场光条图像存在背景干扰,光条宽度不均,单纯地图像处理而不控制图像获取,难以达到理想效果。

针对上述研究现状,为消除图像背景影响,同时精确提取光条中心亚像素坐标,本文提出一种结合相机自动曝光、动态阈值分割法和 Hessian 矩阵的激光光条中心亚像素坐标提取方法。通过图像中光条像素数量与相机曝光量之间函数关系控制曝光时间实现相机自动曝光;根据光条与背景亮度的关系确定动态阈值,实现初步分割光条;利用 Hessian 矩阵精确提取过度曝光区域的光条中心亚像素坐标。该方法消除了图像背景和光条宽度不均的影响,不仅可精确地提取光条中心点亚像素坐标,而且运算速率较快。

2 测量系统设计

2.1 测量系统总体结构

采用激光视觉测量进行钢轨截面磨损动态测量,构建测量系统如图 1 所示。列车行驶时仅与钢轨内侧接触,因此测量左右股钢轨断面磨损至少需要 2 组激光测量头,每组激光测量头由一个 CCD 工业相机和一个线激光器封装组成。测量头安装在自行研制的测量小车上,确保线激光器光线垂直投射到钢轨,CCD 工业相机可完整采集钢轨截面激光图像。测量时,线激光器垂直投射于钢轨表面形成一条包含钢轨内侧轮廓信息的光条曲线,同时安装于测量小车车轮上的光电编码器则记录行进的距离来定位采集位置。通过 CCD 工业相机获取钢轨激光轮廓图像,经过图像处理系统精确提取图像光条中心点亚像素坐标,然后基于标定相机进行三维重建,得到光平面坐标下的钢轨截面轮廓,最后与标准钢轨截面模型进行对比,实现钢轨断面的磨损测量。钢轨轮廓断面高精度动态测量的关键是获得特征明显的激光轮廓图像和精确提取光条中心点坐标。

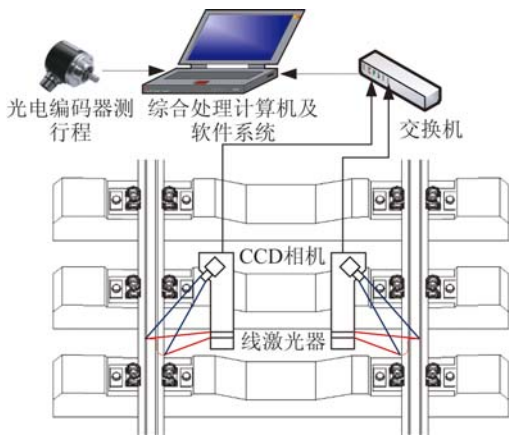


图 1 钢轨磨损动态测量系统

Fig. 1 Dynamic measurement system of rail wear

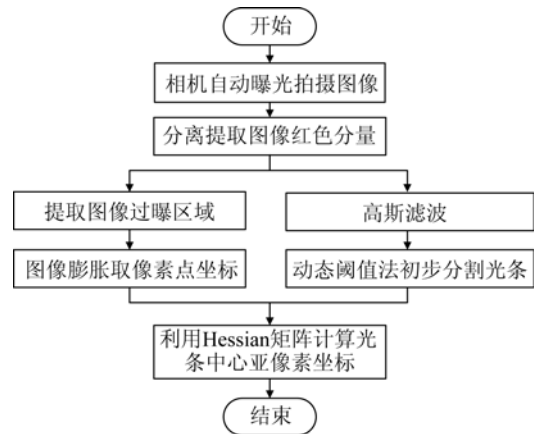


图 3 图像处理流程图

Fig. 3 Flow chart of image processing

2.2 图像获取与处理模型分析

在成都铁路局达州火车站站台 500 m 处实地拍摄钢轨状况如图 2 所示，钢轨工作面为光亮带，其余部分呈深灰色。获取钢轨截面激光图像时，由于环境光和激光影响，会产生噪点。同时，图像中光条具有一定宽度，为提高检测精度，需将光条中心点坐标精确到亚像素级。为解决上述问题，系统图像获取与处理方法如下，其流程图如图 3 所示。



图 2 现场钢轨

Fig. 2 Field rail

(1) 在环境光下，调节 ComputarH0514-MP 工业镜头光圈，使图像背景呈现为灰黑状态，然后投射红色线激光，相机根据激光在图像中的亮度，自动调整相机曝光时间，获取钢轨轮廓光条图像。

(2) 提取图像红色分量，记录过度曝光区域像素点坐标；同时对红色分量图像进行高斯滤波，采用动态阈值法初步分离光条图像。

(3) 对过度曝光区域进行膨胀处理，利用 Hessian 矩阵提取该区域的亚像素坐标，为还原钢轨真实截面轮廓做准备。

3 图像获取与处理算法实现

激光测量图像研究的目的是精确获取光条中心点亚像素坐标，需研究图像获取和光条中心提取两方面因素，其中光条中心提取分为光条形态初步分割和精确提取光条中心亚像素坐标。

3.1 相机自动曝光

在铁路检测现场，测量过程中环境光源不可控，工业镜头的光圈固定，相机信号增益会产生噪点。若手动调节相机曝光，难以精确控制图像亮度；而相机自动曝光能有效解决上述问题，其关键是确定曝光时间。

现场钢轨截面光条图像特征如图 4 所示，激光亮度最大，在直方图的高亮度区域形成峰值，则在曝光时间逐渐增加过程中，光条比背景先过度曝光。

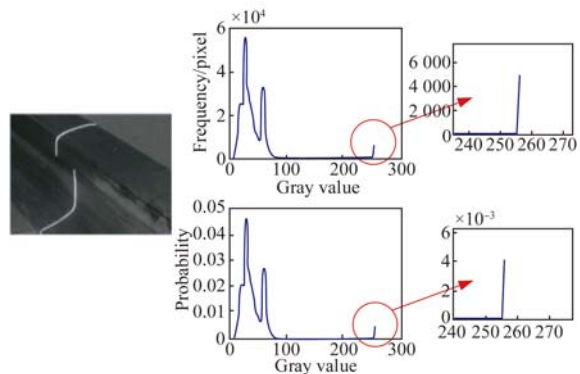


图 4 光条图像直方图

Fig. 4 Light-stripe image histogram

为了确定光条与背景过度曝光的临界点,需测试图像过度曝光像素点数量与相机曝光时间的关系,如图 5 所示。图中曲线①~④光照强度逐渐增强,其中曲线①的光照强度最低,图像背景无过度曝光现象,整条曲线为直线。其余曲线初始部位均近似于直线,此时光条过度曝光像素点数量与曝光时间呈线性关系,随后图像背景发生过度曝光导致过度曝光像素点数量急剧增加,且光照强度越强,增加速度越快。

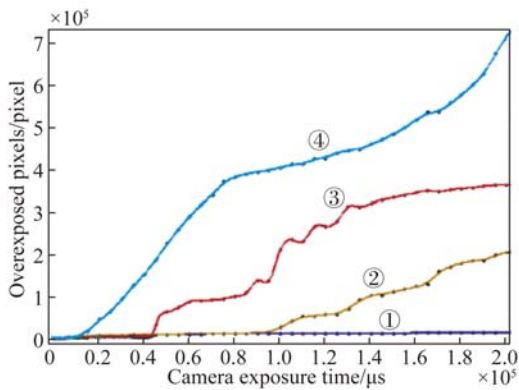


图 5 过度曝光像素点与曝光时间关系

Fig. 5 Relationship between overexposed pixels and camera exposure

根据上述特征,利用光条过度曝光像素点数量与相机曝光时间线性关系确定曝光时间。本测量系统所采用相机分辨率为 $1\ 280 \times 960$,相机曝光控制范围为 $50 \sim 200\ 000\ \mu\text{s}$ 。激光线宽约为 $1\ \text{mm}$,所拍摄的图像幅面高度约为 $200\ \text{mm}$,拍摄视角与图像主视方向夹角约为 30° ,则激光线宽占据图像大约 $5\ \text{pixel}$ 。激光投射在钢轨上的位置为轨头、一侧的轨腰以及轨底表面。根据实际投射情况,在 AutoCAD 中绘制出投射在钢轨一侧的激光线条,利用软件计算出光条长度约为 $250\ \text{mm}$ 。根据相机拍摄位置与拍摄角度,光条在图像中占据像素数量约为:

$$N_0 = (960 \times 250 \times 5 \times \cos 30^\circ) / 200 \approx 5\ 196\ \text{pixel}. \quad (1)$$

根据实验现场情况,选取曝光时间间隔 $e = 3\ 000\ \mu\text{s}$,计算每张图像中光条最亮像素点的个数 $N_i (i = 1 \cdots n)$,当 $N_i > 6\ 000$ 时停止拍摄。在该组数据中找出最接近 $5\ 196$ 的两个量 N_j 与 N_{j+1} ,其对应的曝光时间为 E_j 与 E_{j+1} ,且 $e =$

$E_{j+1} - E_j$ 。由光条过度曝光像素点与曝光时间呈线性关系,曝光时间确定为:

$$E_{\text{Auto}} = E_j + \frac{e}{N_{j+1} - N_j} (N_0 - N_j), \quad (2)$$

其中 $j < i$,且 j 为正整数。

3.2 图像光条动态阈值初步分割

投射激光为红色,将光条图像进行 RGB 通道分离,如图 6 所示,红色分量图像中光条特征明显强于其他颜色分量图像,因此选用红色分量图像来提取钢轨截面光条。红色分量图像的光条信息主要分布在高灰度值的区域,背景主要分布在低灰度值的区域,前景和背景亮度之间存在较大间隔。同时,钢轨表面漫反射导致光条边缘亮度衰减,为了保证在分割光条的同时最大程度地保留光条边缘亮度信息,提出一种基于图像亮度信息的动态阈值分割法,将图像平均亮度和光条中心亮度 255 的平均值作为亮度阈值初步分割光条。光条形态初步分割步骤为:

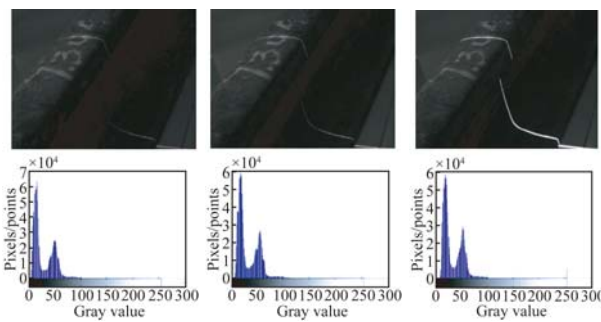
(1) 计算图像的直方图;

(2) 计算图像背景的平均亮度 \bar{R} ,将 \bar{R} 与 255 的平均值 $T = (\bar{R} + 255) / 2$ 作为图像分割的阈值;

(3) 对图像进行阈值分割,将小于等于 T 的像素置为 0 ,将大于 T 的像素点保持原样;

$$\text{dst}(x, y) = \begin{cases} \text{src}(x, y), & \text{if } \text{src}(x, y) > T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (3)$$

(4) 对图像进行高斯平滑。



(a)蓝色分量直方图 (b)绿色分量直方图 (c)红色分量直方图
(a)Blue component histogram (b)Green component histogram (c)Red component histogram

图 6 RGB 通道分离图像

Fig. 6 RGB channel separation image

3.3 光条中心点亚像素坐标提取

理想情况下,光条亮度在法线方向上变化最快,并且服从高斯分布,偏差为 σ ,且光条中心点在法线方向上符合 3 个条件:零阶最大值、一阶过

零点和二阶极小值。利用零阶最大值初步确定光条中心范围,利用一阶过零点和二阶极小值来精确提取光条中心点亚像素坐标,具体过程如下。

3.3.1 确定提取区域

在图像采集过程中,由于测量对象表面的漫反射以及传感器信号的衰减,可能导致光条过度曝光区域像素点不连续,因此需要对图像过度曝光区域进行膨胀处理,连接断点。图像膨胀即是求局部最大值,进行卷积的核大小为 3,膨胀处理表达式为:

$$f(x, y) = \begin{cases} \max, f(x+x', y+y') \\ (x', y'), element(x', y') \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

记录进行膨胀处理后图像亮度为 255 的像素坐标 $(x'_1, y'_1) \cdots (x'_k, y'_k)$, k 为亮度为 255 像素点总数。

3.3.2 计算光条法线方向

光条的法线方向 (n_x, n_y) 即是像素点 Hessian 矩阵的最大绝对特征值 e 对应的特征向量。计算动态阈值初步分割光条图像像素点 $(x'_1, y'_1) \cdots (x'_k, y'_k)$ 位置处的 Hessian 矩阵:

$$\mathbf{H}(x', y') = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中: r_{xx}, r_{xy}, r_{yy} 分别是图像二阶 x 方向偏导、二阶 y 方向偏导和二阶 xy 方向偏导。

图像一阶与二阶偏导数通过与高斯核卷积计算得到,其中高斯核 k 的大小由线宽 l 确定:

$$k = 2 \times \lceil 3 \times l / \sqrt{3} - 1 \rceil + 1. \quad (6)$$

3.3.3 精确提取光条中心点亚像素坐标

假设 (x_0, y_0) 为光条中心点像素,其灰度值为 $f(x_0, y_0)$ 。沿法线方向对函数值进行泰勒展开:

$$f((tn_x + x_0), (tn_y + y_0)) = f(x_0, y_0) + tn_x r_x(x_0, y_0) + tn_y r_y(x_0, y_0) + \frac{1}{2} t^2 n_x^2 r_{xx}(x_0, y_0) + t^2 n_x n_y r_{xy}(x_0, y_0) + \frac{1}{2} t^2 n_y^2 r_{yy}(x_0, y_0), \quad (7)$$

其中: (n_x, n_y) 为光条法线方向, t 为增量。

当光条中心点位于 (x_0, y_0) 像素点处时,则满足 $f((tn_x + x_0), (tn_y + y_0))$ 对 t 的偏导数为 0, 可得:

$$t = - \frac{n_x r_x + n_y r_y}{n_x^2 r_{xx} + 2n_x n_y r_{xy} + n_y^2 r_{yy}}, \quad (8)$$

如果

$$(tn_x, tn_y) \in \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right] \times \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right], \quad (9)$$

则说明一阶导数过零点位于当前像素内,再加上法线方向上二阶导数极小值 e 小于一定阈值,通过两层判断来精确的提取出光条中心点亚像素坐标。

4 试验与分析

图像处理系统硬件采用 MV-EM120C/M 彩色 CCD 工业相机、ComputarH0514-MP 定焦 5 mm 工业镜头、FU 一字线激光器。测量头的布置如图 1 所示,自主设计组装。在 Windows7 系统下基于 MFC 编写应用程序。图像处理计算机配置为 Intel Core i7-3370 3.4 GHz CPU, 4 G 内存。检测对象为 60 直钢轨,在不同光照条件以及在背景中放置干扰物情况下测试 5 组数据,实验结果见图 7。图 7 中 a1~a5 为自动曝光拍摄图形,相机曝光量见表 1; b1~b5 为动态阈值初步分割光条图像; c1~c5 为本文提出方法提取的光条中心图像; d1~d5 为经典 Steger 算法提取的光条中心图像。

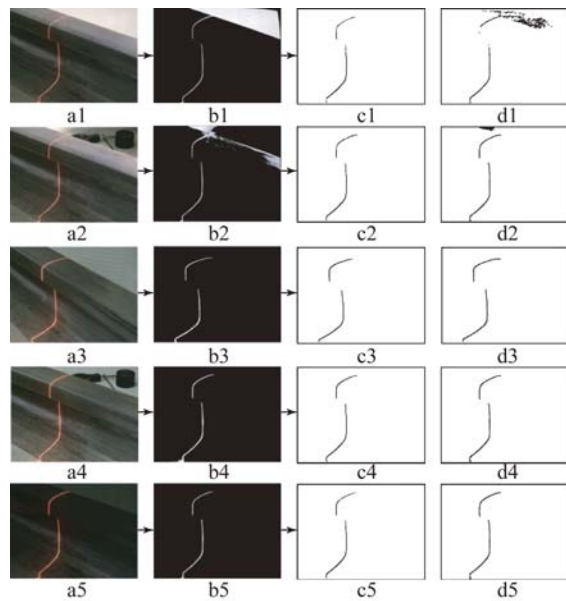


图 7 钢轨轮廓提取结果

Fig. 7 Results of rail profile extraction

表 1 图像拍摄相机曝光量

Tab. 1 Camera exposure of images (μs)

拍摄图像	a1	a2	a3	a4	a5
曝光量	60 180	77 140	152 744	162 321	129 619

由于图像光条的粗细不均匀,而经典 Steger 算法对光条宽度敏感,当线条宽度大于限定值时,光条的边缘像素也会被提取。图 7 中 d1~d5 的光条中心提取图像轨底中心线两边都存在杂点,而 c1~c5 中光条中心提取图像光条两边未出现杂点且光条中心提取清晰。a1 和 a2 由于环境光较强,通过动态阈值分割不能完全分割出光条形态特征,d1 采用 Steger 算法提取光条中心未成功,d2 则存在比较多的杂点,而 c1 和 c2 采用本文方法可以满足要求提取出光条中心点坐标。

对上述 a3~a5 图像使用本文方法和经典 Steger 算法都成功提取出光条中心的 3 幅图像,分别取每幅图像对应的光条中心点坐标轨头和轨腰部分的 3 个点,共计 18 个点进行比较,结果见表 2。

表 2 光条中心点亚像素坐标提取结果

Tab. 2 Extraction results of sub-pixel (pixel)

图像	Steger 算法(x, y)	本文方法(x, y)
a3	(135.971,473.907)	(135.964,473.886)
	(300.368,320.982)	(300.299,320.986)
	(340.252,322.952)	(340.202,322.965)
	(475.927,450.008)	(475.905,450.011)
	(624.93,460.001)	(624.975,460.001)
	(779.816,429.859)	(779.861,429.89)
a4	(100.995,527.987)	(100.991,527.978)
	(230.871,389.993)	(230.854,389.997)
	(311.719,390.015)	(311.623,390.033)
	(446.121,487.993)	(446.204,487.985)
	(596.308,492.017)	(596.158,492.01)
	(760.782,447.785)	(760.835,447.843)
a5	(100.939,528.858)	(100.946,528.871)
	(246.233,389.999)	(246.297,390.002)
	(306.182,390.001)	(306.166,390)
	(455.851,488.007)	(455.878,488.004)
	(580.409,491.99)	(580.376,491.988)
	(779.815,430.814)	(779.808,430.808)

本文方法提取的光条中心点亚像素坐标与经典 Steger 算法提取的光条中心点亚像素坐标比较,相对偏差大小约为 0.05 pixel。由于拍摄的 1280×960 规格图像对应相机视场高约为 200 mm,因此图像光条轮廓转换为钢轨实际轮廓尺寸所对应偏差约为 0.01 mm,满足铁路检测精度要求^[12]。

$$200/960 \times 0.05 \approx 0.01 \text{ mm.} \quad (10)$$

图像处理过程中,光条中心点亚像素坐标提取为较耗时环节,现场测量应以提高效率为前提,本文方法对比 Steger 算法在运行速度上提速 40%,见表 3。

表 3 光条中心点亚像素坐标提取运行速度

Tab. 3 Extraction speed of sub-pixel coordinates of light-stripe center (s)

图像	Steger 算法	本文方法
a1	5.947 227	1.091 385
a2	3.175 105	1.708 278
a3	3.185 397	1.769 273
a4	3.057 870	1.772 789
a5	2.929 118	1.424 472

5 结 论

本文提出了一种结合相机自动曝光、动态阈值分割法和 Hessian 矩阵的激光光条中心亚像素提取方法。首先,利用光条在图像中过度曝光像素点的数量来控制相机曝光时间,从而获取清晰光条图像。然后,利用光条与图像背景的高对比度初步分割光条。最后,结合过度曝光像素点位置与分割出的光条形态图,对光条形态图相应位置计算 Hessian 矩阵求取光条中心。此方法保证了图像中光条信息的充分获取,减少背景图像的干扰,避免了人工调节相机的随机性,消除了光条宽度不均匀对中心提取的影响。利用本文方法进行钢轨截面实际测量,与经典 Steger 算法对比实际距离偏差约为 0.01 mm,计算时间节约 40%,提高了视觉测量对环境的适应性的同时也提升了处理速度。

参考文献:

- [1] 占栋, 于龙, 肖建, 等. 钢轨轮廓全断面高精度动态视觉测量方法研究 [J]. 铁道学报, 2015, 37(9): 96-106.
ZHAN D, YU L, XIAO J, *et al.*. Study on high-accuracy vision measurement approach for dynamic inspection of full cross-sectional rail profile [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2015, 37(9): 96-106. (in Chinese)
- [2] 康高强, 李春茂, 秦莉娟, 等. 一种钢轨动态轮廓数据校准方法研究 [J]. 传感技术学报, 2015, 28(2): 221-226.
KANG G Q, LI CH M, QIN L J, *et al.*. Research on a method of calibrating dynamic rail profile data [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(2): 221-226. (in Chinese)
- [3] 华长权, 寇东华, 付石林, 等. 几种钢轨磨损检测方法和仪器的对比分析 [J]. 中国铁路, 2013(4): 67-70.
HUA CH Q, KOU D H, FU SH L, *et al.*. Approach comparison of several rail wear instrumentation and measurements [J]. *Chinese Railways*, 2013(4): 67-70. (in Chinese)
- [4] WANG X H, WAN Y, LI R, *et al.*. A multi-object image segmentation C-V model based on region division and gradient guide [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2016, 39: 100-106.
- [5] 陈恺, 陈芳, 戴敏, 等. 基于萤火虫算法的二维熵多阈值快速图像分割 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 517-523.
CHEN K, CHEN F, DAI M, *et al.*. Fast image segmentation with multilevel threshold of two-dimensional entropy based on firefly algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 517-523. (in Chinese)
- [6] HARUKI T, KIKUCHI K. Video camera system using fuzzy logic [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1992, 38(3): 624-634.
- [7] 杨海涛, 常义林, 王静, 等. 一种基于亮度直方图的自动曝光控制方法 [J]. 光学学报, 2007, 27(5): 841-847.
YANG H T, CHANG Y L, WANG J, *et al.*. A new automatic exposure algorithm for video cameras using luminance histogram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 841-847. (in Chinese)
- [8] 李凤娇, 李小菁, 刘震. 基于多尺度分析的激光光条中心点坐标提取方法 [J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1110002.
LI F J, LI X J, LIU ZH. A multi-scale analysis based method for extracting coordinates of laser light stripe centers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1110002. (in Chinese)
- [9] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113-125.
- [10] 孙军华, 王恒, 刘震, 等. 钢轨磨损动态测量中激光光条中心的快速提取 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 690-696.
SUN J H, WANG H, LIU ZH, *et al.*. Rapid extraction algorithm of laser stripe center in rail wear dynamic measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 690-696. (in Chinese)
- [11] 贾倩倩, 王伯雄, 罗秀芝. 光切法形貌测量中光条中心的亚像素提取 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 390-396.
JIA Q Q, WANG B X, LUO X ZH. Extraction of central positions of light stripe in sub-pixel in 3D surface measurement based on light sectioning method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 390-396. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国铁道部. 高速铁路有砟轨道线路维修规则(试行) [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
People's Republic of China Ministry of Railways. *Maintenance Rules for Ballasted Track High-speed Railway Track(Trial)* [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2013. (in Chinese)

作者简介:



李文涛(1991—),男,湖北仙桃人,博士研究生,2013年于西南交通大学获得学士学位,主要从事视觉测量与数字化图像处理方面的研究。E-mail: jxsjtao@my.swjtu.edu.cn

导师简介:



王培俊(1962—),女,浙江宁波人,教授,1983年于西南交通大学获得学士学位,1987年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2004年于西南交通大学获得博士学位。2002~2003年瑞典LUND大学访问学者。主要从事数字化设计与检测、虚拟设计、VR技术等研究。E-mail: pjwang123@swjtu.edu.cn