

文章编号: 1005-0523(2021)03-0095-07

基于改进 LSD 直线检测算法的钢轨表面边界提取

曹义亲, 何恬, 刘龙标

(华东交通大学软件学院, 江西 南昌 330013)

摘要:针对传统 LSD 直线检测算法容易丢失图像细节, 造成提取直线不连续等不足, 提出一种基于双边滤波改进 Canny 提取边缘图像的 LSD 直线检测算法。利用 Canny 算法提取边缘图像, 基于边缘图像采用 LSD 直线检测算法进行直线提取; 考虑到 Canny 边缘检测中使用高斯滤波, 在降噪的同时会模糊图像边缘, 而双边滤波对于图像边缘有较好的保护作用, 采用双边滤波代替 Canny 边缘检测中的高斯滤波进行边缘图像提取。同时, 将基于双边滤波改进 Canny 提取边缘图像的 LSD 直线检测算法应用到钢轨表面边界提取中。实验结果表明, 改进 LSD 直线检测算法对钢轨表面边界直线提取效果较佳, 相关评价指标得到较大提升, 正常钢轨图像和锈迹钢轨图像的峰值信噪比分别提升 6.49% 和 13.58%, 为后续钢轨表面缺陷识别奠定了基础, 具有一定的实用价值。

关键词:钢轨边界提取; Canny 算法; 双边滤波; 直线检测; LSD 算法

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

本文引用格式: 曹义亲, 何恬, 刘龙标. 基于改进 LSD 直线检测算法的钢轨表面边界提取[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(3): 95-101.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20210706.006

Rail Surface Boundary Extraction Based on Improved LSD Line Detection Algorithm

Cao Yiqin, He Tian, Liu Longbiao

(School of Software, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In view of the shortcomings of traditional LSD line detection algorithm, such as the tendency to lose details and discontinuity of line extraction, this paper presents an LSD line detection algorithm based on bilateral filter proposed to improve Canny edge image extraction. The Canny algorithm was used to extract the edge image, based on which LSD line detection algorithm is used to extract the line. For the Canny edge detection using gaussian filtering, the image edge will be blurred while reducing the noise. The bilateral filtering has a better protection effect on the edge of the image. Therefore, the algorithm adopts bilateral filtering instead of Gaussian filtering in the Canny edge detection to extract the edge image. At the same time, the LSD line detection algorithm based on bilateral filter to improve Canny edge image extraction was applied to the rail surface boundary extraction. The results show that LSD linear extraction algorithm based on Canny edge detection and edge image extraction based on bilateral filtering was better for the linear extraction of rail surface boundary. The relevant evaluation indexes have been greatly improved and the peak signal-to-noise ratio of the experimental images increased by 6.49% and 13.58% respectively. It lays a foundation for the subsequent identification of rail surface defects and has certain practical value.

收稿日期: 2021-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(61663009); 江西省科技支撑计划重点项目(20161BBE50081)

作者简介: 曹义亲(1964—), 男, 教授, 硕士, 研究方向为图像处理与模式识别。E-mail: 244855632@qq.com。

Key words: rail boundary detection; Canny algorithm; bilateral filtering; line detection; a line segment detector (LSD) algorithm

Citation format: CAO Y Q, HE T, LIU L B. Rail surface boundary extraction based on improved LSD line detection algorithm[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(3): 95-101.

在钢轨表面缺陷检测时,采集到的全景轨道图像包含大量碎石、道砟等信息^[1],如果对整幅全景图像进行处理,必然会降低后续缺陷识别与提取的性能;因此对钢轨表面区域进行精准、快速地识别与提取尤为重要^[2-3]。钢轨表面区域提取离不开钢轨两侧边缘的准确识别。

可将钢轨表面两侧边界看作2条直线进行直线检测。Hough变换是经典的直线检测算法^[4],该算法鲁棒性较好,但检测精度不高^[5],易产生误检,算法只能处理二值图像且耗时较长。针对上述不足,Xu等^[6]提出一种随机霍夫变换算法(random Hough transform, RHT),但由于随机采样,对于复杂图像会存在大量无效采样。朱正伟等^[7]提出一种改进的RHT算法,加快了RHT算法速度,但算法结果易受拟合窗口大小影响。刁燕等^[8]提出一种改进的概率霍夫变换,虽能减少内存,提高算法效率,但易检测出重叠直线。Radon变换也可用于直线检测,处理非二值图像,且其性能优于传统Hough算法^[9],在提取直线特征时,具有很强的抗噪能力,但在检测线段时,不能识别起始与结束位置。彭凯飞等^[10]提出一种结合二分查找法的Radon直线检测算法,大大降低了传统Radon检测运行时间,但在检测夹角较小的直线时容易出现误检。文献[11]提出一种直线检测分割算法(line segment detector, LSD),算法运行时间短,在准确性与精确度方面较其他算法有较大提升,由于LSD算法第一步只通过简单设置阈值的方法剔除小像素点,容易造成边缘处细节丢失。文献[12]结合LSD算法和K-均值聚类,得到车道直线检测结果,虽在复杂环境下能提取出车道,但在车道不连续时,识别效果不佳。孙俊锋等^[13]将局部对比度引入LSD算法,提高了局部光照不均情况下直线检测算法的稳健性,但效率不高。游江等^[14]在传统LSD算法基础上增加了对于候选区域边缘包含像素点数的筛选,能去除伪边缘,提高算法检测性能,不足是容易产生过度分割。王旭^[15]将Edge-Drawing算法与LSD算法结合,在进行LSD算法提取直线前,先

利用Edge-Drawing算法提取边缘图,提高了轮廓的完整性,由于Edge-Drawing算法较为耗时,改进后的LSD算法效率不高。

针对LSD直线检测算法不足,提出一种在边缘图像基础上进行直线拟合的钢轨表面边界直线提取算法。采用双边滤波代替Canny边缘检测中的高斯滤波对图像进行边缘提取,将提取出的边缘图像作为LSD算法的输入进行钢轨边界直线检测。

1 相关算法

1.1 Canny边缘检测

Canny边缘检测由Canny^[16]在1968年提出,并建立了边缘最优化提取的三大准则^[17-18],是图像边缘检测算法中经典且流行的算法之一,传统Canny算法分为以下4步。

1) 图像去噪:对输入图像进行高斯滤波,以滤除图像噪声。高斯滤波原理如下

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

高斯平滑后的图像为

$$F(x, y) = G(x, y) f(x, y) \quad (2)$$

式中: σ 为控制滤波程度参数; $f(x, y)$ 为原图像; $F(x, y)$ 是去噪后新图像。

2) 计算图像像素梯度:利用Sober算子获得图像像素梯度的幅值 M 和方向 θ ,得到可能的边缘集合

$$M = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \frac{G_y}{G_x} \quad (4)$$

检测图像 x 方向和 y 方向信息的Sober模板如下

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

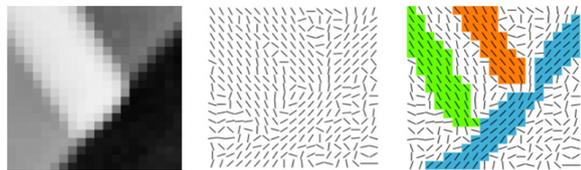
3) 非极大值抑制:抑制梯度小的像素点,保留最大梯度,细化边缘。

4) 双阈值检测:通过设置高阈值和低阈值进行双阈值筛选,进一步处理所得边缘,让边缘更好地闭合,减少断续。

1.2 LSD 直线提取算法

LSD 算法由 Grompone 等^[19]2010 年在结合 Burns 所提算法基础上提出,该算法结合图像梯度和方向信息提取直线,主要包括 3 部分。

1) 生成直线支持区域:通过计算每个像素点的梯度,生成对应梯度场,将在一定阈值内且具有相同梯度的像素相连成为直线支持区域,如图 1 所示。



(a) 原图像 (b) 梯度场 (c) 直线支持区域

图 1 LSD 算法梯度场和直线支持域

Fig.1 Gradient field and line support field of LSD algorithm

2) 直线支持区域的矩形拟合:对于每个直线支持区域我们可以观察它的最小外接矩形,矩形的主轴表示直线支持域的主轴方向,且矩形要覆盖整个区域,该最小外接矩形表示直线信息,如图 2 所示。



(a) 原图像 (b) 直线支持域主方向 (c) 矩形拟合

图 2 直线支持域矩形拟合

Fig.2 Line support domain rectangle fitting

3) 直线确认:每个拟合的矩形都需要对应一个直线确认步骤,根据 Helmholtz 原则对拟合矩形进行判断^[20],验证该矩形区域是否可以作为直线提取。Helmholtz 原则通过与一个假设的独立分布值为 $[0, 2\pi]$ 的噪声图相比较,判断是否为直线。在一个分辨率为 $m \times n$ 的图像中,可能出现 $(nm)^{5/2}$ 种直线支持域,直线支持域中像素总数为 n , k 为与拟合矩形同方向的像素总数, δ 为一个确定的精度,直线区域的错误报警数 Q_{NFA} 定义如下

$$Q_{NFA}(r)=(nm)^{5/2}B(n,k,\delta) \tag{7}$$

$$B(n,k,p)=\sum_{j=k}^n \binom{n}{k} p^j (1-\delta)^{n-j} \tag{8}$$

ϵ 为判定阈值,如果 Q_{NFA} 小于 ϵ ,则该直线支持域为直线,原算法中 ϵ 取 1 得到了较好效果,本文也取 1。

2 本文算法

2.1 基于 Canny 提取边缘图像的 LSD 直线检测算法

LSD 直线检测算法在提取输入图像的梯度模值图和方向图的基础上搜索直线支持区域,单纯通过阈值的筛选,剔除梯度值较小的像素点,从而进行直线支持区域搜索,该方法需多次比较像素梯度,且容易丢失细小边缘;因此,采用 Canny 算法先进行边缘图像提取,在边缘图像上搜索直线支持区域,提高算法效率,同时可以有效保护图像细节信息。为此,提出基于 Canny 提取边缘图像的 LSD 直线检测算法(Canny combined with LSD, CLSD)。

CLSD 算法流程图如图 3 所示。

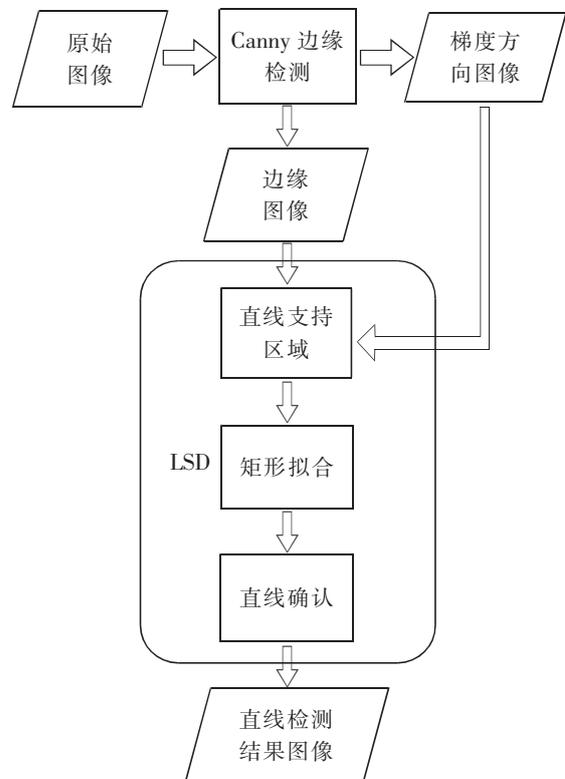


图 3 算法流程图

Fig.3 Algorithm flow chart

2.2 双边滤波改进 Canny 算法

图像边缘检测算法第一步通常都为滤波操作,以减少噪声影响。传统 Canny 边缘检测算法采用高斯线性滤波,在去除噪声的同时,会模糊图像边缘,对边缘提取产生不利影响^[21];因此采用双边滤波,尽可能完整提取图像边缘。

双边滤波是一种非线性滤波,可以在降低噪声的同时保护边缘信息^[22-23]。双边滤波同时考虑了图像像素值域差异与空间域信息^[24]。在图像的平面区域,像素变化范围小,对应值域权重约为 1,相当于对输入图像做高斯模糊,此时主要由空间域权重起作用;在边缘区域,像素变化范围大,值域权重变大,可以保持输入图像的边缘信息。

设 I_q 为输入图像, I_p 为输出图像, p 为目标像素, q 为任意像素, σ_r 表示值域标准差, σ_s 表示空间域标准差,用 G_r 表示值域信息, G_s 表示空域信息,则

$$G_r = \exp\left(-\frac{\|I_p - I_q\|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (9)$$

$$G_s = \exp\left(-\frac{\|p - q\|^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (10)$$

双边滤波器滤波结果 h 可表示为

$$h = \frac{1}{W_q} \sum_{p \in s} G_s(p) G_r(p) I_p \quad (11)$$

$$W_q = G_s(p) G_r(p) = \sum_{p \in s} \exp\left(-\frac{\|p - q\|^2}{2\sigma_s^2}\right) \exp\left(-\frac{\|I_p - I_q\|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (12)$$

式中: W_q 为窗口内值域权重和,用于权重归一化。

2.3 双边滤波改进 Canny 提取边缘图像的 LSD 直线检测算法

基于双边滤波改进 Canny 提取边缘图像的 LSD 直线检测算法 (bilateral filter to improve Canny combined with LSD, BFCLSD), 在基于 Canny 提取边缘图像的 LSD 直线检测算法的基础上,用双边滤波代替原 Canny 边缘检测的高斯滤波,得到图像的边缘图,将边缘图像和像素梯度方向图作为 LSD 直线检测算法的输入进行直线提取。

BFCLSD 算法步骤如下。

- 1) 将彩色图像转为灰度图像。
- 2) 双边滤波代替传统 Canny 算法中的高斯滤波,得到结构较好的边缘图像^[25],将该边缘图像作为输入图像。

3) 对输入图像进行高斯核采样,为避免图像出现锯齿效应,缩放尺度取 0.8。

4) 计算每个像素梯度方向的梯度值,水平方向梯度为 g_x ,垂直方向梯度为 g_y 。

$$g_x(x, y) = \frac{i(x+1, y) + i(x+1, y+1) - i(x, y) - i(x, y+1)}{2} \quad (13)$$

$$g_y(x, y) = \frac{i(x, y+1) + i(x+1, y+1) - i(x, y) - i(x+1, y)}{2} \quad (14)$$

$$\theta = \arctan \frac{g_x(x, y)}{-g_y(x, y)} \quad (15)$$

$$G(x, y) = \sqrt{g_x^2(x, y) + g_y^2(x, y)} \quad (16)$$

式中:像素 (x, y) 的灰度值为 $i(x, y)$;梯度方向为 θ ;梯度模值为 $G(x, y)$ 。

5) 对所有梯度值进行 [0, 1 023] 排序,简单分为 1 024 个等级,将梯度值最大的点作为种子结点往下搜索,直到遍历完整幅图像。

6) 小梯度值抑制,梯度值小于 ρ 的像素将被拒绝归入后续直线支持域中,直接设置为已使用。

$$\rho = \frac{e}{\sin \tau} \quad (17)$$

式中: e 为梯度量化过程中出现的误差边界,设定为 2; τ 为后续算法中出现的角度容忍度。

7) 选择一个像素作为种子节点,将其作为起点,在阈值为 $[-\tau, \tau]$ 内的点中进行区域搜索,每扩散一个像素,就将该像素状态设置为已使用,直至生成直线支持区域。图 4(a) 是原图像,图 4(b)~图 4(d) 分别是 τ 取 $11.5^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ 时的实验效果。

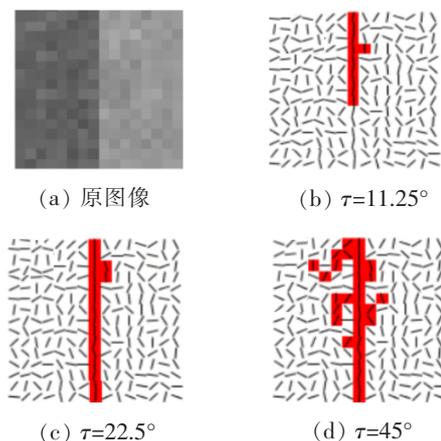


图 4 从顶部中间像素开始的 3 个角度容忍度实验结果
Fig.4 Experimental results of three angle tolerances starting from the top middle pixel

图 4 显示角度容忍度 τ 设置为 22.5° , 实验效果更好,本算法 τ 取 22.5° 。

8) 矩形拟合,上一步形成的直线支持区域为一系列离散点,需要将直线支持域包含在一个矩形框

R 内, R 为包含直线支持域的最小矩形, 矩形 R 的方向就为直线支持域的主方向, 矩形的中心 (G_x, G_y) 。

$$G_x = \frac{\sum_{j \in Region} G(j)x(j)}{\sum_{j \in Region} G(j)} \quad (18)$$

$$G_y = \frac{\sum_{j \in Region} G(j)y(j)}{\sum_{j \in Region} G(j)} \quad (19)$$

式中: $G(j)$ 是像素 j 的梯度幅值; j 用于遍历矩形区域内的所有像素。

9) 计算 Q_{NFA} , 确认直线, 如式(7), 式(8)。

3 基于改进 LSD 直线检测算法的钢轨表面边界提取

为验证基于双边滤波改进 Canny 提取边缘图像的 LSD 直线检测算法的有效性, 将其应用到轨道图像的轨面区域提取中, 对钢轨表面两侧边缘直线进行提取, 检验其实际应用效果。

采用 MATLAB R2018a 软件编程, 在 Win10 操作系统环境下进行实验。对 LSD 直线提取算法、文献[15]算法、CLSD 和 BFCLSD 算法进行仿真实验对比, 实验图像选取采集到的两类图像, 第一类图像为正常钢轨全景图像, 第二类图像为生锈钢轨全景图像。

3.1 主观评价

对正常钢轨全景图像图 5(a) 分别进行 LSD 算法直线提取、文献[15]算法直线提取、CLSD 算法直线提取和 BFCLSD 算法直线提取, 为便于观察, 提取出的直线用红色标出。实验结果如图 5(b)~图 5(e) 所示。

原图像直接进行 LSD 直线检测, 所得结果如图 5(b), 钢轨表面两侧边缘已大致识别出来, 但对于右侧钢轨表面上方由于光照不匀产生的阴影边缘, 也当作直线识别出来, 这样容易造成最终钢轨边缘识别不准确; 图 5(c) 为文献[15]中 LSD 算法与 Edge-Drawing 算法结合后的提取结果, 钢轨两侧直线提取较为完整, 但碎石边缘的检测比钢轨主体的检测效果更好, 没有突出钢轨主体直线检测效果; 图 5(d) 为 CLSD 提取结果, 可以看到该算法相比于 LSD 算法对于钢轨边缘直线提取更加连续, 直线提

取效果较好, 不足的是该算法对于图像的降噪效果不佳, 可以看到轨面产生较多噪点; 图 5(e) 为 BFCLSD 算法直线提取结果, 钢轨表面两侧边缘已基本识别出来, 且直线较连续, 轨面也无其它误检, 碎石、轨枕及扣件部分被检测为直线的概率远小于以上 3 种算法, 整体来说检测效果较好。

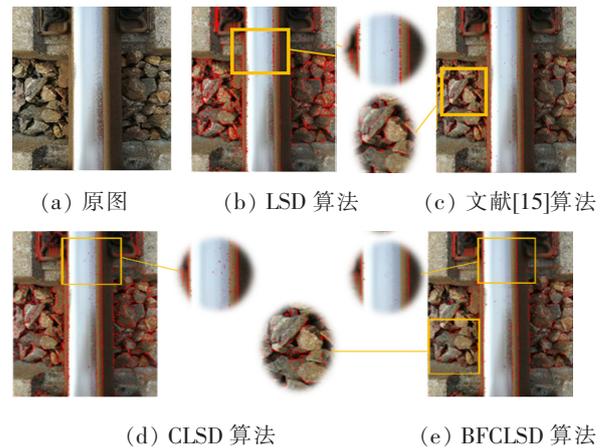


图 5 不同算法对正常钢轨全景图像直线检测
Fig.5 Linear detection of normal rail panoramic image by different algorithms

分别采用 LSD 算法、文献[15]算法、CLSD 算法及 BFCLSD 算法对生锈钢轨全景图像图 6(a) 进行直线检测, 结果如图 6(b)~图 6(e) 所示, 检测出的线段用红色标出。

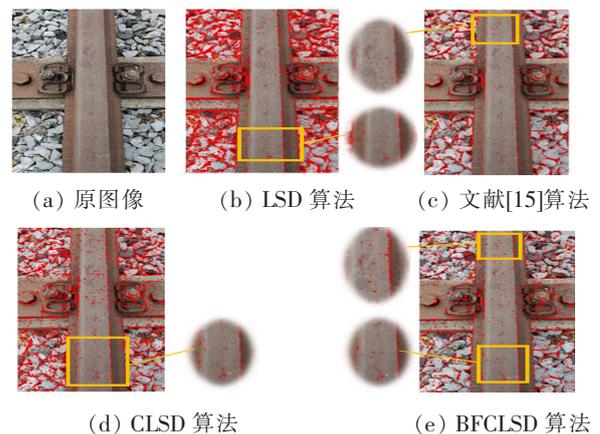


图 6 不同算法对锈迹钢轨全景图像直线检测
Fig.6 Linear detection of rusted rail panoramic image by different algorithms

图 6(b) 为传统 LSD 直线检测算法提取的线段, 提取结果显示检测出的线段短而密集, 而且较粗, 直线提取结果不准确; 图 6(c) 为文献[15]算法提取结果, 可以看出对于碎石和扣件的误检程度明显比

LSD 算法低,但对于钢轨两侧识别效果较差;图 6(d)为 CLSD 提取结果,在钢轨轨面区域,产生很多噪点,对于碎石和扣件部分的误检程度明显高于文献[15]算法;图 6(e)为 BFCLSD 算法实验结果,对于碎石、扣件等无关区域的提取程度比以上 3 种算法低,说明误检程度低,提取出的直线段较细,说明直线提取较精确,不足是虽然钢轨表面右侧边缘提取较前两种算法好,但左侧边缘直线提取改进效果不大。综合图 6 实验结果,对于灰度较低的生锈钢轨两侧边缘的提取,BFCLSD 算法效果最优,但 4 种算法实验效果均有待提高,尤其对于钢轨左侧边缘这种灰度变化缓慢的边缘。

3.2 客观评价

为客观评价 BFCLSD 算法有效性,将原图转换为灰度图,采用峰值信噪比(PSNR)和均方差(MSE) 2 个常用的图像客观评价指标对 LSD 算法、文献[15]算法、CLSD 算法和 BFCLSD 算法提取直线后的结果图像进行比较。

峰值信噪比(PSNR)是使用最广泛的一种图像客观评价指标,PSNR 值越大表示图像失真越小,直线提取结果图像整体质量越好。均方差(MSE)表示结果图像与原图像之间的均方误差,MSE 值越小,说明结果图像与原图像在边缘结构上越相似。

对图 7(a)和图 8(a)分别用 LSD 算法、文献[15]算法、CLSD 算法和 BFCLSD 算法进行直线提取,提取结果如图 7(b)~图 7(e)、图 8(b)~图 8(e)所示。图 7(b),图 8(b)分别为传统 LSD 算法进行直线检测后的二值图像,图 7(c),图 8(c)分别为文献[15]算法直线检测结果,图 7(d),图 8(d)分别为 CLSD 算法直线检测结果,图 7(e),图 8(e)分别为 BFCLSD 算法直线检测结果。

分别计算两类图像经 LSD 算法、文献[15]算法、CLSD 算法、BFCLSD 算法直线提取后图像相应的 PSNR 值和 MSE 值取平均值,所得结果如表 1 所示。

表 1 不同算法客观评价结果

Tab.1 Objective evaluation results of different algorithms

图像	评价指标	LSD 算法	文献[15] 算法	CLSD 算法	BFCLSD 算法
第一类 图像	PSNR	24.794	25.226	24.305	26.404
	MSE	13.719	12.742	13.609	8.248
第二类 图像	PSNR	20.472	21.214	21.384	23.253
	MSE	51.948	37.894	26.174	15.528

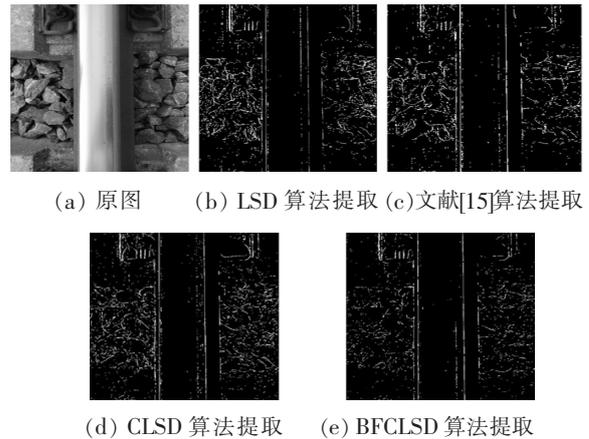


图 7 不同算法对正常钢轨全景图像直线提取结果
Fig.7 Linear extraction results of panoramic image of normal rail with different algorithms

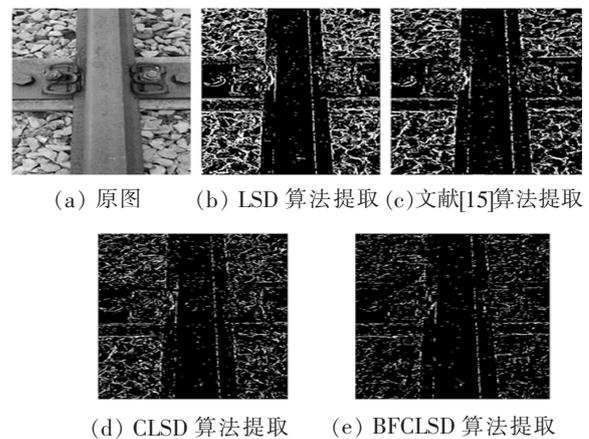


图 8 不同算法对锈迹钢轨全景图像直线提取结果
Fig.8 Linear extraction results of rusted rail panoramic image by different algorithms

从表 1 可看出,第一类图像(正常钢轨全景图像)经 BFCLSD 算法实验过后的平均峰值信噪比较传统 LSD 算法提升了 6.49%,第二类图像(锈迹钢轨全景图像)经 BFCLSD 算法实验过后的平均峰值信噪比较传统 LSD 算法提升了 13.58%,BFCLSD 算法实验后两类实验图像的直线提取结果图的平均峰值信噪比在 4 种算法中均最大,说明该算法直线提取后的结果图失真最小,图像质量较高;BFCLSD 算法实验结果图的平均均方差最小,说明还原度较另外 3 种算法都有较大提升,符合原图像的直线轨迹,实验结果较好。

因此,经仿真实验并结合主客观评价,本文提出的基于双边滤波改进 Canny 算法提取边缘图的 LSD 直线检测算法能较准确地提取钢轨表面边缘直线,有效减轻后续轨道表面缺陷检测工作量,对

钢轨表面缺陷检测研究具有一定的实用价值。

4 结论

为更准确地提取钢轨表面区域,提出一种基于双边滤波改进 Canny 算法提取边缘图的 LSD 直线检测算法并应用到轨面边缘直线提取中,仿真实验结合主观和客观评价表明:

1) 新算法对提取轨道图像中钢轨表面边缘直线较相关算法有较好的效果提升,为后续钢轨表面区域提取以及钢轨表面缺陷的检测、识别和分类奠定了基础,具有一定的实际意义。

2) 实验过程发现,对于灰度较低的图像和直线边缘灰度变化缓慢区域,直线检测算法效果不佳。在后续研究中将对低灰度图像中的直线检测与提取作进一步研究。

参考文献:

- [1] 贺振东,王耀南,刘洁. 基于背景差分的高铁钢轨表面缺陷图像分割[J]. 仪器仪表学报,2016,37(3):640-649.
- [2] ZHANG H, JIN X, WU Q M J, et al. Automatic visual detection system of railway surface defects with curvature filter and improved gaussian mixture model[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(7): 1-16.
- [3] WANG K, ZHANG G C. Research on image edge detection based on improved ant colony algorithm[J]. Compute Engineering and Application, 2017, 53(23): 171-176.
- [4] HOUGH P V H. A new method and means for recognizing complex pattern; US, 3069654[P]. 1962: 12-18.
- [5] 张喜民,余奇颖,张金博,等. 基于机器视觉的手机尾插件精密测量方法研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(10):47-54.
- [6] XU L, OJA E, KULTANEN P. A new curve detection method: randomized hough transform(RHT)[J]. Pattern Recognition Letters, 1990, 11(5): 331-338.
- [7] 朱正伟,宋文浩,焦竹青,等. 基于随机 Hough 变换改进的快速圆检测算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(7): 1978-1983.
- [8] 刁燕,吴晨柯,罗华,等. 基于改进的概率 Hough 变换的直线检测优化算法[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 170-178.
- [9] DEANS S R. Hough transform from the Radon transform[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1981, 3(2): 185-188.
- [10] 彭凯飞,沈学举,黄富瑜,等. 基于二分查找的 Radon 变换直线检测改进算法[J]. 半导体光电, 2019, 40(3): 438-443.
- [11] GROMPONE V G R, JAKUBOWICZ J, MOREL J M, et al. LSD: a fast line segment detector with a false detection control[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2010, 32(4): 722-732.
- [12] LIU W, LI S. An effective lane detection algorithm for structured road in urban[C]//Intelligent Science and Intelligent Data Engineering. Berlin, Germany: Springer, 2013: 759-767.
- [13] 孙俊锋,丁少闻,张小虎,等. 结合像素局部对比度的直线特征检测算法[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(6): 31-38.
- [14] 游江,唐力伟,邓士杰,等. 基于改进 LSD 的立体组合靶标自动编码算法研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(32): 80-87.
- [15] 王旭. 直线提取算法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.
- [16] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [17] DEMIGNYD, LORCA F G, KESSAL L. Evaluation of edge detectors performances with a discrete expression of Canny's criteria[C]//International Conference on Image Processing Los Alamitos. CA, USA: IEEE, Computer SOC Press, 1995.
- [18] DEMIGNY D, KAMLE T. A discrete expression of Canny's criteria for step edge detector performances evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(11): 1199-1211.
- [19] BURNS J B, HANSON A R, RISEMAN E M. Extracting straight lines[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(4): 425-455.
- [20] DERICHE R, FAUGERAS O. Tracking line segments[J]. Image and Vision Computing, 1990, 8(4): 261-270.
- [21] 张桂梅,徐继元,刘建新. 一种新的基于自适应分数阶的活动轮廓模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 1045-1056.
- [22] 王福斌,孙海洋,王宜文,等. 飞秒激光烧蚀光斑图像的双边滤波增强及 FCM 分割[J]. 激光与红外, 2020, 50(5): 630-633.
- [23] 肖进胜,王文,邹文涛,等. 基于景深和稀疏编码的图像去雨算法[J]. 计算机学报, 2019(9): 2024-2034.
- [24] 张红英,朱恩弘,吴亚东. 一种基于细节层分离的单曝光 HDR 图像生成算法[J]. 自动化学报, 2019, 45(11): 2159-2170.
- [25] 易三莉,陈勇,贺建峰. 建立新型边缘泄露补偿机制的四阶方程图像平滑方法[J]. 电子学报, 2016, 44(4): 813-820.