

基于 Otsu 分割与边缘检测的钢丝绳缺陷检测方法研究

戴若辰¹, 赵明富¹, 汤斌^{1*}, 代理勇¹, 巫涛江^{1,2}, 蒋上海¹

¹重庆理工大学智能光纤感知技术重庆市高校工程研究中心, 重庆市光纤传感与光电检测重点实验室, 重庆 400054;

²电梯智能运维重庆市高校工程中心, 重庆 402260

摘要 电梯钢丝绳是承载轿厢重量的关键部件, 针对钢丝绳断丝无法在线检测的问题, 提出一种采用高光谱图像处理识别断丝的方法。选取样本与背景图像差异较大的特殊波段图像, 将 Otsu 自适应阈值分割与 Hough 变换相结合, 根据钢丝绳图像中直径所包含的像素数判断钢丝绳断丝程度是否达到报废要求。实验表明, 此方法的均方误差、峰值信噪比和结构相似度分别达到 650.9、19.9957 和 0.9404, Otsu 阈值分割与 Hough 变换结合对于电梯钢丝绳图像处理是有效的, 可以实现对电梯钢丝绳断丝的检测, 为钢丝绳快速缺陷检测提供了新的解决方法。

关键词 光谱学; 钢丝绳; 高光谱图像; Otsu 阈值分割; 边缘检测

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1630006

Wire Rope Defect-Detection Method Based on Otsu Segmentation and Edge Detection

Dai Ruochen¹, Zhao Mingfu¹, Tang Bin^{1*}, Dai Liyong¹, Wu Taojiang^{1,2}, Jiang Shanghai¹

¹Intelligent Fiber Sensing Technology of Chongqing Municipal Engineering Research Center of Institution of Higher Education, Chongqing Key Laboratory of Fiber Optic Sensor and Photodetector, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

²Tielian Operation and Maintenance of Chongqing Municipal Engineering Research Center of Institution of Higher Education, Chongqing 402260, China

Abstract An elevator wire rope is a key component for carrying the weight of carriages. To address the problem that wire rope defects cannot be detected online, a method to identify broken wires using hyperspectral image processing is proposed. First, the spectral band image with the greatest difference between the sample and background was selected. Then, Otsu adaptive threshold segmentation combined with the Hough transform was used. The number of pixels in the diameter of the wire rope in the image was used to determine whether the extent of breakage meets the scrapping requirement. The mean square error, peak signal-to-noise ratio, and structural similarity values experimentally obtained using this method were 650.9, 19.9957, and 0.9404, respectively. Results indicate that combining Otsu threshold segmentation and the Hough transform to process images of elevator wire ropes is effective, providing a new method for the rapid detection of wire rope defects.

Key words spectroscopy; wire rope; hyperspectral images; Otsu threshold segmentation; edge detection

OCIS codes 300.6170; 100.2000; 300.6340

收稿日期: 2020-09-08; 修回日期: 2020-10-08; 录用日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(61805029)、重庆市教委科研基金项目(KJQN201905605)

通信作者: *tangbin@cqut.edu.cn

1 引言

钢丝绳是一种常在工程中用于牵引、提升和承载的重要机械部件,其在长时间工作过程中,由于疲劳与弯折,可能会出现断丝现象。2012 年 9 月 13 日,武汉东湖景园小区工地上,一部载满粉刷工人的电梯,电梯钢丝绳突然断裂,厢体呈自由落体直接坠到地面,造成 19 人身亡。钢丝绳断丝的出现极大程度危害电梯运行的安全性与稳定性。安全性历来是电梯运行过程中人们关注的重点,电梯的安全运行是其被应用的首要前提。因此,电梯钢丝绳事关生命安全,其断丝检测一直是无损检测^[1]领域里的研究热点。

钢丝绳断丝检测有很多方法,如:漏磁法^[2]、X 射线法^[3]、机械测量法^[4]、声学法^[5]等。电磁法虽然用途最广泛,但对缺陷显示不直观,只能检测表面缺陷;X 射线法对缺陷有高灵敏度,但射线对检测人员的健康有害,必须采取防护措施,且检测周期长,无法实时显示结果;机械测量法需要在停机状态下才能检测,检测效率极低;声学法对缺陷难以定量分析。以上方法存在不直观、效率低、对检测人员健康有害等缺点,而高光谱成像分析不仅处理精度高,且实时、快速,在分类与异常判断领域得到了越来越广泛的关注。徐红梅等^[6]对钢丝绳的高光谱图像进行无缝融合,提高了连接位置的像素精度,能够对融合像素进行准确的断丝检测。刘剑等^[7]将钢丝绳图像能量函数进行归一化,驱使轮廓曲线运动到损坏区域边缘,有效分割出钢丝绳损坏边缘。谢小娟等^[8]利用 Canny 算子与 Hough 变换对钢丝绳正、侧图像进行比较,判断曳引轮槽的异常磨损程度。

为了提取高光谱图像中样本与背景图像反差较大的特殊波段,本文结合 Otsu 阈值分割与边缘检测算子,提出一种基于 Hough 变换的电梯钢丝绳断丝高光谱图像识别方法,以期实现快速、准确检测电梯钢丝绳断丝状态。

2 实验方法

2.1 钢丝绳检测系统

钢丝绳检测系统的核心为由 Zolix 生产的 Gaiatracer-V10 高光谱相机,如图 1 所示,系统主要由卤素光源、一维扫描样品台、高光谱相机、成像镜头及含采集控制软件的计算机组成,适用于实验室环境下物体的鉴别分析。系统采用宽光谱照明光源,光源波长范围覆盖可见光到短波红外波段(360~960 nm),光源高度及角度可调。将损伤钢

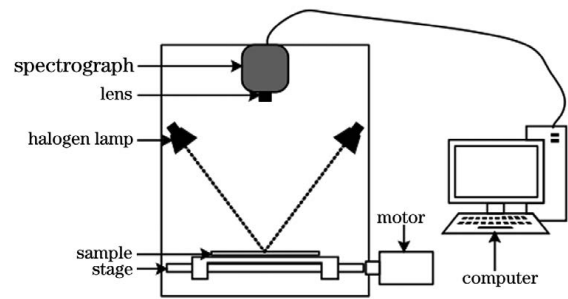


图 1 钢丝绳检测系统

Fig. 1 Wire rope detection system

丝绳样本放置在相机下方的一维扫描样品台上,进行成像。经多次实验,设置参数积分时间为 25 ms,采集到的图像清晰无失真。

2.2 实验样本

实验样本为电梯牵引钢丝绳,为保证研究可靠性,选择型号为 6×25Fi+IWR,直径为 6 mm,表面无伤痕、无折损的钢丝绳。将钢丝绳剪断外层的其中一股,使钢丝绳形成 LF 型损伤,标记断丝处,如图 2 所示。

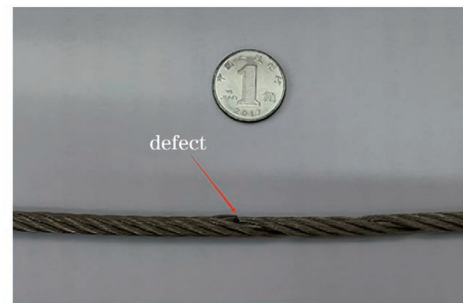


图 2 损伤钢丝绳样本

Fig. 2 Damaged wire rope sample

2.3 光谱校正与预处理

为获得校正所需要的暗电流与参考板数据,在高光谱相机正常工作时,拍摄反射率为 99% 的标准白板,获得白色标定图 I_x 。按照同样方法,关闭光源并盖上镜头盖,获得反射率为 0% 的黑色标定图 I_y ,最后对生成的高光谱图像进行黑白校正,校正表达式为

$$R = \frac{I_x - I_y}{I_x - I_y}, \quad (1)$$

式中 I_x 为原始图像, R 是进行校正之后结果。

在分析前对原始光谱数据进行预处理,其目的是减少光谱数据受到散射、噪声、谱线平移等影响,改善检测模型的效果。本研究采用平滑算法(Savitsky-Golay)对原始光谱进行降噪处理。

2.4 图像阈值分割

图像阈值分割在图像分割领域占有一席之地,

阈值分割优点在于直观且易于实现。采集到的图像 $f(x, y)$ 由不同灰度的像素组成。阈值分割可以简化为函数操作, 即

$$T = T[x, y, p(x, y), f(x, y)], \quad (2)$$

其中 T 为图像分割所需阈值, (x, y) 为像素在空间中坐标, $p(x, y)$ 为像素局部特性, $f(x, y)$ 为像素灰度值。经过阈值化之后的像素为

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) > T \\ 0, & f(x, y) < T \end{cases} \quad (3)$$

灰度标记值为 1, 对应像素为关注对象; 灰度标记值为 0, 对应像素为背景。若 T 仅取决于 $f(x, y)$, 则阈值是全局的; 若 T 取决于 $f(x, y)$ 和 $p(x, y)$, 则阈值是局部的; 若 T 取决于坐标 (x, y) , 则阈值是自适应的。

由此可见, T 的取值极大程度地影响阈值分割的结果: 若 T 过大, 则出现过分割; 若 T 过小, 则出现欠分割。Otsu (Otsu) 法^[10-12] 目的是确定图像二值化分割阈值。通常情况下, 它被视为阈值选取的最优方法, 计算简单, 不受图像亮度与对比度的影响。方差可以度量前景与背景之间的差别, 使类间方差最大, 可最大限度地降低错误分辨背景与前景的概率。

Otsu 算法中背景与前景两类像素的灰度均值分别为 m_1 和 m_2 , 全局均值为 m_G , 像素被分辨为背景与前景的概率为 p_1 和 p_2 , 因此有

$$p_1 \times m_1 + p_2 \times m_2 = m_G, \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} p_1 = \sum_{i=0}^k p_i \\ m = \sum_{i=0}^k i p_i \\ m_G = \sum_{i=0}^{L-1} i p_i \end{cases}, \quad (5)$$

类间方差表达式为

$$\sigma^2 = p_1(m_1 - m_G)^2 + p_2(m_2 - m_G)^2 = p_1 p_2 (m_1 - m_2)^2, \quad (6)$$

根据(5)式可以求出灰度级 k , 也就是 Otsu 方法的阈值 T 。

此方法无须手动设置参数, 能够自动选择阈值, 适用于选择分离两种区域的单一阈值, 效果较好。

2.5 边缘提取

若某个像素与同行相邻像素的数值不同, 则将该像素标记为 1, 表示此像素为寻找的边缘像素, 否则标记为 0, 表示此像素不是边缘像素。由此方法

处理整个图像 I_{bw} 可得二值边缘图像 I_{edge} , 表达式为

$$I_{edge}(m, n) = I_{bw}(m, n) \oplus I_{bw}(m+1, n), \quad (7)$$

式中 \oplus 表示“异或”, m 为像素横坐标, n 为像素纵坐标, 以此确定像素位置。边缘提取的结果取决于图像分割的效果, 而非图像梯度。Canny 算子^[13] 与 Sobel 算子^[14] 等基于梯度的边缘提取算法^[15] 都存在固定梯度阈值是否适应钢丝绳高光谱图像边缘梯度变化的问题, 在决定采用某种算子之前, 应对结果进行比较。

2.6 基于 Hough 变换的直线检测

Hough 变换主要是通过图像空间中目标图像与背景图像的边缘像素映射到直线参数空间中, 通过搜索参数空间中局部峰值点来确定直线参数。图形空间坐标 (x, y) 变换为 (ρ, θ) , 直线方程变换为极坐标方程:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta. \quad (8)$$

在新的角度-距离参数空间中, 图像中的点变为一条正弦曲线, 而不是正交直角坐标系下的一个点, 这些正弦曲线的交点即直角坐标系下的直线。

3 结果与分析

3.1 钢丝绳高光谱图像

采集到的直径为 6 mm、带有人为制造断丝缺陷的钢丝绳在不同波长下的光谱图像, 如图 3 所示, 高光谱图像是由特定波长范围内的一系列灰度图像组成。高光谱图像信息包括空间中的二维平面坐标信息和波长信息。背景部分与样本部分对不同波段的光线反射率有所不同: 在某些特定波段, 钢丝绳样本中损伤对光线的反射率与背景反射率有较大差别; 而在另一些波段, 损伤对于这些波段的光的反射率与背景反射率差别很小。分析在敏感波段下的光谱图像, 筛选出对钢丝绳样本较敏感的波段图像, 并由这些图像检测钢丝绳是否存在直径损失, 以及其损失程度。

3.2 高光谱图像处理

检测区域的光谱可能会受到背景区域光谱信息的干扰, 所以需要采集到的高光谱图像进行处理。选取一些感兴趣区域^[16] (ROIs), ROI1~ROI5 在背景图像中随机选取, ROI6~ROI10 从含有缺陷部分的钢丝绳中选取, ROI 的形状近似于一个矩形。由图 4(a) 可知, 在 550~650 nm 波段, 钢丝绳上的 ROI 反射率较高, 而背景区域中的 ROI 反射率很低, 与目标区域相比甚至接近于 0。

为更直观地反映钢丝绳表面与背景区域反射率

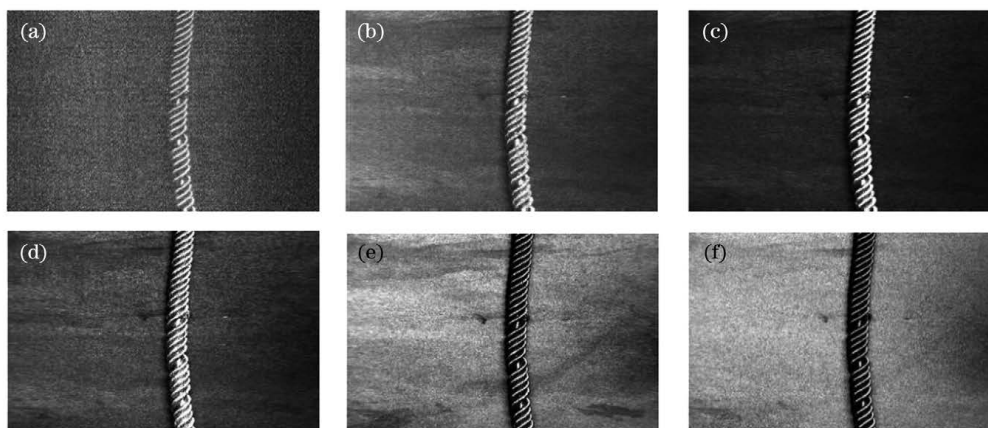


图 3 缺陷钢丝绳高光谱图像。(a)410 nm 波段图像;(b)470 nm 波段图像;(c)566 nm 波段图像;(d)661 nm 波段图像;(e)737 nm 波段图像;(f)793 nm 波段图像

Fig. 3 Hyperspectral images of wire rope with defects. (a) 410 nm band image; (b) 470 nm band image; (c) 566 nm band image; (d) 661 nm band image; (e) 737 nm band image; (f) 793 nm band image

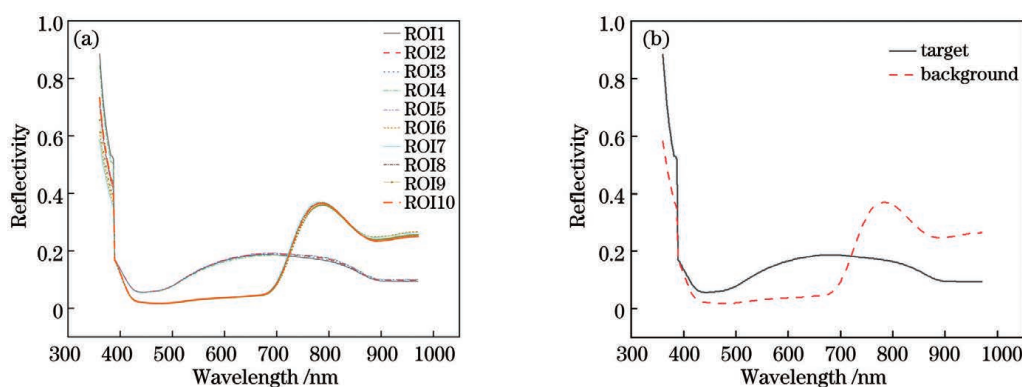


图 4 含有缺陷处钢丝绳区域与背景区域的光谱曲线。(a)随机选取的 ROIs 的反射率;(b)均值处理后两部分 ROI 的反射率

的差别,对图 4(a)的光谱曲线进行均值处理,得到图 4(b),光谱曲线呈现峰谷起伏形状。在 550~650 nm 波段,钢丝绳反射率与背景区域反射率的差别较大。

钢丝绳损伤样本在 406,566,645 nm 波段下的光谱图像与灰度直方图,如图 5 所示。在 406 nm 波段下,钢丝绳样本的高光谱图像极其模糊,从灰度直方图中可以看出背景与目标图像之间的差异较小,通过单一阈值分割方法难以获得良好的分割效果[图 5(a)];在图 566 nm 波段与 645 nm 波段下,钢丝绳样本的高光谱图像更加清晰,背景与目标图像之间的差异明显,可以选取一个最优阈值将图像与背景分割,得到良好的图像分割效果[图 5(b)和图 5(c)]。

对钢丝绳样本的上述三个波长的图像利用 Otsu 方法进行阈值分割,分割结果如图 6 所示。在三幅图像之中,图 6(b)中的高光谱图像经过 Otsu 方法阈值分割后的二值图像噪点最少,图像最清晰,

且图 6(a)和图 6(c)的效果不佳。因此,本研究选择高光谱图像中波长为 566 nm 的图像进行处理。

为测试不同边缘提取算法的适应性,将不同的边缘提取算法进行对比,Roberts 算子[图 7(a)]与 Sobel 算子[图 7(b)]对于经过 Otsu 方法处理后的钢丝绳高光谱图像边缘检测效果最好,而 Prewitt 算子[图 7(c)]与 Canny 算子处理后的钢丝绳高光谱图像边缘模糊,出现杂乱线条。

对 Otsu 方法处理后的高光谱图像进行 4 种不同算子边缘检测,经 Hough 变换后得到的样本高光谱图像如图 8 所示。无论是从基于边缘检测算子的效果衡量,还是从 Hough 变换后钢丝绳图像的精细程度来衡量,Sobel 算子[图 8(b)]相较于其他几种算子的图像处理效果最佳,更适用于钢丝绳断丝的检测。Sobel 算子的边缘定位更准确,常用于噪声较多、灰度渐变的图像。Sobel 算子相比 Prewitt 算子增加了对于像素距离的权重,像素距离不同,像

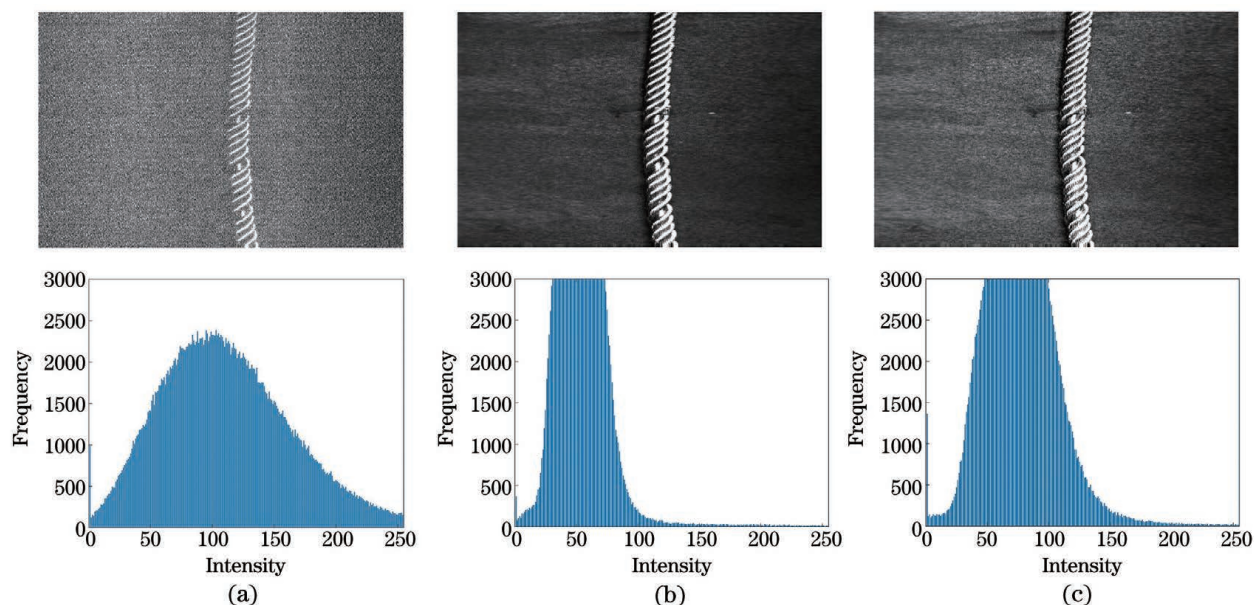


图 5 高光谱图像及灰度直方图。(a)406 nm 波段图像与灰度直方图;(b)566 nm 波段图像与灰度直方图;(c)645 nm 波段图像与灰度直方图

Fig. 5 Hyperspectral images and gray histograms. (a) 406 nm band image and its grayscale histogram; (b) 566 nm band image and its grayscale histogram; (c) 645 nm band image and its grayscale histogram



图 6 不同波长下的图像阈值分割结果。(a)406 nm 波段图像;(b)566 nm 波段图像;(c)645 nm 波段图像

Fig. 6 Image threshold segmentation results at different wavelengths. (a) 406 nm band image; (b) 566 nm band image; (c) 645 nm band image

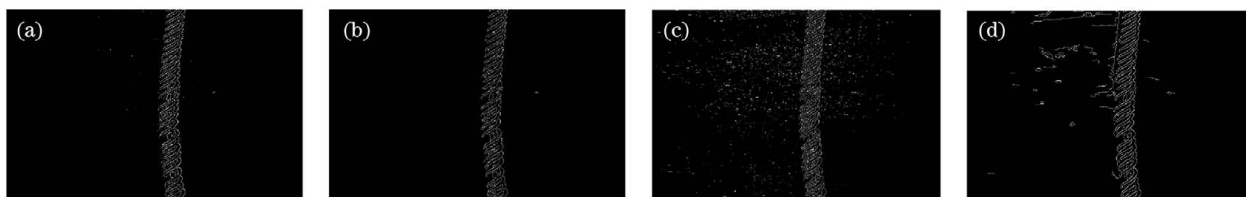


图 7 基于不同算子的边缘检测结果对比。(a)Roberts 算子;(b)Sobel 算子;(c)Prewitt 算子;(d)Canny 算子

Fig. 7 Comparison of edge detection results based on different operators. (a) Roberts operator; (b) Sobel operator; (c) Prewitt operator; (d) Canny operator

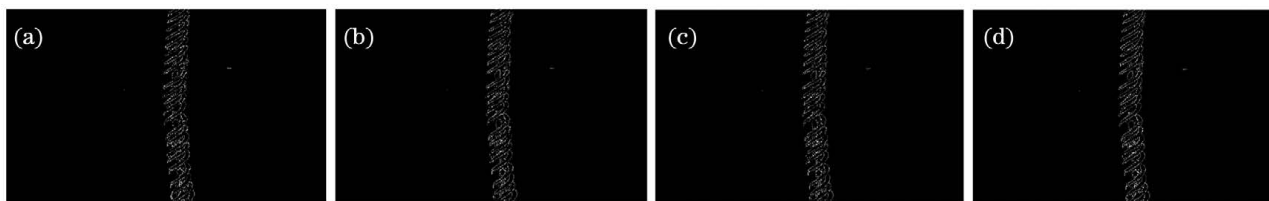


图 8 Hough 变换后高光谱图像。(a)基于 Roberts 算子;(b)基于 Sobel 算子;(c)基于 Prewitt 算子;(d)基于 Canny 算子

Fig. 8 Hyperspectral images after Hough transform. (a) Based on Roberts operator; (b) based on Sobel operator; (c) based on Prewitt operator; (d) based on Canny operator

素对当前待检测像素点的影响不同(距离近的像素点对当前像素的影响更大;距离远的像素点对当前像素的影响更小),利于达到锐化图像并突出边缘轮廓,与 Prewit 算子、Roberts 算子相比检测效果更好。

3.3 结果与评价

根据图 8(b)所示的钢丝绳图像边缘 Hough 变

换结果,计算钢丝绳不同位置的直径像素,各位置的直径像素个数 N 如表 1 所示。本研究利用绝对离差中位数(MAD)找出上述直径像素数据中的异常点。由表 1 可知,所有观察点像素数的中位数 $M = 92.02$ 。该方法不会受到极端大的或极端小的数值的影响,计算简便,意义明确,能够较准确地反映总体各单位标志值的离差程度。

表 1 钢丝绳不同位置像素个数

Table 1 Number of pixels at different positions of the wire rope

| Position | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Number of pixels N_i | 94.13 | 91.01 | 93.02 | 92.14 | 63.01 | 91.00 | 92.02 |
| Absolute deviation value | 2.11 | 1.01 | 1.00 | 0.12 | 29.01 | 1.02 | 0 |
| Distance value | 2.09 | 1.00 | 0.99 | 0.12 | 28.72 | 1.00 | 0 |

根据 GB/T 31821—2015^[17]《电梯主要部件报废技术条件》,可知如果磨损等导致钢丝绳直径小于或等于公称直径的 90%,则此钢丝绳达到报废标准。由表 1 可知,位置 5 的距离值过大,该位置处直径损失与公称直径的比值为

$$D_5 = \frac{|N_5 - M|}{M} \times 100\% = 31.53\%, \quad (9)$$

故可以判定这个点为离群值点。

在图像处理效果的评价方法^[18]中,常用图像均方误差(MSE)和峰值信噪比(PSNR)作为评价指标,MSE 和 PSNR 是客观标准,与人眼视觉感知的差距较大,MSE 越低,PSNR 越高,则效果越好。对一副大小为 $P \times Q$ 的图像,MSE 的表达式为

$$\sigma_{MSE} = \frac{1}{P \times Q} \sum_{0 \leq i \leq P} \sum_{0 \leq j \leq Q} [f(i, j) - g(i, j)]^2, \quad (10)$$

式中 $f(i, j)$ 表示未处理图像, $g(i, j)$ 表示处理后的图像。

结构相似度(SSIM)用来表征人眼感知到的图像结构信息的相似度,SSIM 越高,表示处理后的图像越接近原始图像,表达式为

$$F_{SSIM} = L(x, y)C(x, y)S(x, y), \quad (11)$$

式中:

$$\begin{cases} L(x, y) = \frac{2\bar{x}\bar{y} + C_1}{\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + C_1} \\ C(x, y) = \frac{2S_x S_y + C_2}{S_x^2 + S_y^2 + C_2} \\ S(x, y) = \frac{S_{x,y} + C_3}{S_x S_y + C_3} \end{cases}, \quad (12)$$

其中, $L(x, y)$, $C(x, y)$, $S(x, y)$ 分别为原图像 x 与待测图像 y 的均值(亮度)、方差(对比度)和结构

相关系数; \bar{x}, \bar{y} 分别为图像 x, y 的均值; S_x, S_y 分别为图像方差; $S_{x,y}$ 为协方差; C_1, C_2, C_3 为常数。SSIM 介于 0 和 1 之间,越接近 1,表示处理后图像与原图像越相似。

表 2 给出不同方法处理效果。由表 2 可知, Otsu 阈值分割与 Hough 变换结合之后 MSE 和 PSNR 比单独使用 Otsu 阈值分割和 Hough 变换效果好,SSIM 与单独使用 Otsu 阈值分割相比稍有下降,但十分接近。所以 Otsu 阈值分割与 Hough 变换结合的方法对于高光谱图像处理是有效的。

表 2 不同方法处理效果

Table 2 Treatment effect of different methods

| Treatment method | MSE | PSNR | SSIM |
|-------------------|--------|---------|--------|
| Otsu segmentation | 1888.4 | 15.3699 | 0.9572 |
| Hough transform | 5316.8 | 10.8743 | 0.0024 |
| Otsu+Hough | 650.9 | 19.9957 | 0.9404 |

4 结 论

提出基于高光谱图像的电梯牵引钢丝绳断丝检测方法。通过提取单一波段的高光谱图像,进行 Otsu 与边缘检测算子结合的图像处理,对比不同部位的钢丝绳显示直径,判断钢丝绳的异常断丝情况,可得以下结论:

1) 与基于传统彩色图像处理检测方法相比较,基于高光谱图像的检测对设备的要求简单,且提取单一波段图像对于减少噪声、分割背景的效果更好,是一种实时、快速的无损检测方法。

2) 基于高光谱图像的钢丝绳断丝检测,可采用像素长度间接表征钢丝绳实际直径的损失量。

3) 对于钢丝绳断丝检测,使用 Otsu 阈值分割与 Hough 变换结合的方法比单独使用 Otsu 阈值分割和 Hough 变换的检测效果更好。

参 考 文 献

- [1] Gao S, Wang Q H, Fu D D, et al. Nondestructive detection of sugar content and firmness of red globe grape by hyperspectral imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1030004.
高升, 王巧华, 付丹丹, 等. 红提糖度和硬度的高光谱成像无损检测 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1030004.
- [2] Yan X L, Zhang D L, Pan S M, et al. Online nondestructive testing for fine steel wire rope in electromagnetic interference environment [J]. *NDT & E International*, 2017, 92: 75-81.
- [3] Ma H W, Mao Q H, Zhang X H. Intelligent monitoring technology study process for steel cord conveyor belt in coal mine [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(2): 213-219, 396.
马宏伟, 毛清华, 张旭辉. 矿用强力带式输送机智能监控技术研究进展 [J]. *振动·测试与诊断*, 2016, 36(2): 213-219, 396.
- [4] Huang Q, Li Z, Xue H Q. Multi-body dynamics co-simulation of hoisting wire rope [J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2018, 53(1): 36-45.
- [5] Ridge I M L, Zheng J, Chaplin C R. Measurement of cyclic bending strains in steel wire rope [J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2000, 35(6): 545-558.
- [6] Xu H M, Chen Y. Broken wire rope inspection system design research based on hyperspectral [J]. *Computer Simulation*, 2012, 29(8): 242-245.
徐红梅, 陈印. 基于高光谱的钢丝绳断丝检测系统设计研究 [J]. *计算机仿真*, 2012, 29(8): 242-245.
- [7] Liu J, Zhao Y, Wei S B. Elevator wire rope image detection method based on improved GAC model [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2017, 33(1): 184-192.
刘剑, 赵悦, 韦松伯. 基于改进 GAC 模型的钢丝绳图像检测方法 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2017, 33(1): 184-192.
- [8] Xie X J, Yang N X, Chen J X, et al. Wear recognition method for traction wheel groove of elevator based on image processing [J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(11): 122-128.
谢小娟, 杨宁祥, 陈建勋, 等. 基于图像处理的电梯曳引轮轮槽磨损识别方法 [J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(11): 122-128.
- [9] Beitollahi M, Hosseini S A. Using Savitsky-Golay smoothing filter in hyperspectral data compression by curve fitting [C] // *Electrical Engineering (ICEE)*, Iranian Conference on, May 8-10, 2018, Mashhad, Iran. New York: IEEE Press, 2018: 452-457.
- [10] Yang Y R, Bu Y, Xu J H, et al. Measurement of surface defects of optical elements based on spectral estimation and multispectral technique [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0904002.
杨言若, 步扬, 徐静浩, 等. 基于光谱估计与多光谱技术的光学元件表面疵病检测 [J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0904002.
- [11] Chen Y T, Li Y Y, Yao T T. Ship detection from remote sensing image under complex sea conditions [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18): 181007.
陈彦彤, 李雨阳, 姚婷婷. 复杂海况下遥感图像舰船目标检测方法研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18): 181007.
- [12] Yang T, Tian H W, Liu X M, et al. Research on image segmentation algorithm based on edge detection and Otsu [J]. *Computer Engineering*, 2016, 42(11): 255-260, 266.
杨陶, 田怀文, 刘晓敏, 等. 基于边缘检测与 Otsu 的图像分割算法研究 [J]. *计算机工程*, 2016, 42(11): 255-260, 266.
- [13] Lin X, Li J H, Wang S L, et al. Recent advances in passive digital image security forensics: a brief review [J]. *Engineering*, 2018, 4(1): 66-89.
- [14] Zhang Q, Jia F X, Yin T T. Design of real-time image edge detection system based on improved Sobel algorithm [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2018(2): 101-104, 108.
张棋, 贾方秀, 殷婷婷. 基于改进 Sobel 算法的实时图像边缘检测系统设计 [J]. *仪表技术与传感器*, 2018(2): 101-104, 108.
- [15] Zhang H X, Wang C, Liu X, et al. Image edge detection algorithm and its new development [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2018, 54(14): 11-18.
张红霞, 王灿, 刘鑫, 等. 图像边缘检测算法研究新进展 [J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(14): 11-18.
- [16] Sun X, Pan T, Ren F J. Facial expression recognition using ROI-KNN deep convolutional neural networks [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016(42): 883-891.
孙晓, 潘汀, 任福继. 基于 ROI-KNN 卷积神经网络的面部表情识别 [J]. *自动化学报*, 2016(42): 883-891.
- [17] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of

China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: specification for discard of the main parts of lifts. GB/T 31821—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国

家标准: 电梯主要部件报废技术条件 GB/T 31821—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

- [18] Qian F, Sun T, Guo J, et al. Multi-scale SSIM algorithm based on wavelet transforms[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2015, 30(2): 317-325.

钱方, 孙涛, 郭劲, 等. 基于小波变换的多尺度 SSIM 算法[J]. 液晶与显示, 2015, 30(2): 317-325.