

表面质量控制及检测

钢丝绳锈蚀、磨损缺陷识别研究

黄杰贤^{1,2}, 杨冬涛¹, 欧阳玉平^{2,4}, 洪添胜³

(1.嘉应学院 电子信息工程学院, 广东 梅州 514015; 2.广东振声股份有限公司, 广东 梅州 514787; 3.华南农业大学 工程学院, 广州 510642; 4.华东交通大学 机电工程学院, 南昌 330013)

摘要:目的 发展高性能、低成本基于图像处理技术的钢丝绳缺陷识别方法, 实现钢丝绳磨损、锈蚀缺陷的检测。**方法** 首先采用邻域平均法提取钢丝绳的灰度区域特征, 接着建立了基于熵统计函数以描述、量化灰度分布特征与灰度波动特征, 在此基础上, 选取良品、锈蚀缺陷与磨损缺陷三种类型的样品进行区域灰度、灰度分布、灰度波动特征的量化与提取。**结果** 经观测得到不同类型的样品在三维特征空间分布中具有明显的可区分性, 基于该特点, 可通过设置三维特征的阈值实现对钢丝绳合格品, 锈蚀缺陷, 磨损缺陷进行识别与区分。**结论** 该基于图像处理的检测方法可高效、准确地实现了对钢丝绳的锈蚀、磨损缺陷的识别, 不仅具有学术价值, 更具有实用意义, 非常适用于在线检测。

关键词: 钢丝绳; 缺陷识别; 熵; 灰度分布; 灰度波动

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)10-0187-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.10.029

Corrosion and Wear Defects Recognition of Wire Rope

HUANG Jie-xian^{1,2}, YANG Dong-tao¹, OUYANG Yu-ping^{2,4}, HONG Tian-sheng³

(1.School of Electronic Information Engineering, Jiaying University, Meizhou 514015, China; 2.Guangdong Zhensheng Science Technology Co., Ltd, Meizhou 514787, China; 3.College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 4. School of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

ABSTRACT: The work aims to realize efficient inspection of wear and corrosion defects present in wire ropes by developing a high-performance and low-cost image processing technology-based defect recognition method of wire ropes. Gray area features of the wire ropes were firstly extracted by neighborhood average algorithm. Then a entropy-based statistical function was established to describe and quantize grayscale distribution features and grayscale fluctuation features. On this basis, no-defective product, corrosion defect and wear defect samples were selected to quantize and extract regional grayscale, grayscale distribu-

收稿日期: 2016-03-18; 修订日期: 2016-04-28

Received: 2016-03-18; Revised: 2016-04-28

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-27); 公益性行业(农业)科研专项经费(200903023、201403036); “扬帆计划”引进创新创业团队专项(201312G06)资助; 2014“扬帆计划”博士后扶持项目资助

Fund: Supported by Special Funds for the Construction of Modern Agricultural Industry Technology System (CARS-27), Public Welfare Industry (Agriculture) Special Funds for Scientific Research (200903023, 201403036), Guangdong Sail Plan's Special Funds for Introduction of Innovative Entrepreneurial Team (201312G06) and 2014 Sail Plan's Postdoctoral Supporting Fund

作者简介: 黄杰贤(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事图象处理与模式识别研究。

Biography: HUANG Jie-xian(1982—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: inspecting technology using machine vision.

通讯作者: 洪添胜(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事机电一体化及信息技术在农业中的应用研究。

Corresponding author: HONG Tian-sheng(1955—), Male, Doctor, Professor, Doctoral tutor, Research focus: mechatronics and information technology in agricultural application.

tion and grayscale fluctuation features. The distribution of different types of sample in 3-dimensional characteristic space was observed to have obvious distinguishability. Based on this feature, corrosion and wear defects were detected and recognized by setting 3-dimensional characteristic threshold. The experimental result demonstrates that the image processing-based inspecting method proposed in this paper can recognize corrosion and wear defects efficiently and accurately and is of both academic value and practical meanings, hence it is very fit for real time inspection.

KEY WORDS: wire-rope; defect recognition; entropy; grayscale distribution; gray fluctuation

丘陵果园立地条件差,难以形成较完善的交通运输网络,农资的运送只能依靠果农的肩挑背负完成,劳动强度大,效率低,严重阻碍了我国山地果园大规模、产业化、现代化发展^[1-2]。近年来,华南农业大学洪添胜团队针对我国国情,研制了一套山地果园钢丝绳牵引式轨道双轨运输机,钢丝绳具有绕度大、柔韧性好等特点,较好地解决了载物车沿起伏弯曲轨道转弯运行等难题^[3-4]。但是,该运输机频繁启停,钢丝绳长久使用容易产生缺陷,导致松绳或断绳等危险。在众多缺陷中,磨损与锈蚀缺陷是最常见、最主要、最迫切解决的缺陷。为了实现在不拆卸状态下对钢丝绳的缺陷检测,采用图像传感器采集图像,并采用图像处理技术对锈蚀、磨损缺陷识别是极佳的选择。目前针对钢丝绳缺陷检测的研究工作中,大部分使用高性能计算机与高分辨率图像传感器对钢丝绳图像进行采集与算法识别,直接导致检测设备价格昂贵。我国农民的购买力有限,许多农资工具依赖政府补贴,为了提升产品竞争力,降低制造成本,尽可能地选取廉价的、低分辨率图像传感器,寻找高效的检测算法,保证缺陷识别的准确性与高效性,是本文研究的重点内容,对于发展现代农业技术,提升山地果园的自动化水平具有重大意义。

鉴于钢丝绳表面进行了镀锌处理,在图像上呈现了较高的亮度。但是,钢丝绳具有绕型结构,即先由钢丝绕成股,再用股绕成绳,钢丝绳图像具有“丝”和“股”两种较明显的纹理特征,图像表面灰度波动大。因此,仅仅通过设置灰度阈值难于识别钢丝绳表面缺陷,大部分缺陷检测的研究集中在对纹理特征的分析工作上。在对钢丝绳基于纹理特征分析的缺陷检测中,主要采用灰度共生矩阵法(GLCM)^[5]、LBP算法^[6]、马尔科夫随机场模型^[7]、Gabor滤波器^[8-9]、小波变换方法^[10]。然而,Gabor滤波器、小波变换方法运行效率低,而且关键参数获取复杂,并不适用于实际的检测应

用。灰度共生矩阵是常用的、重要的描述纹理特征的算法,当设置不同步长、不同角度、不同灰度级时可得到不同的处理效果,因此为了获取最佳的处理结果仍需对多参数进行优化,这就增加了算法使用难度。LBP算法也是常用的纹理描述算法,但LBP算法不具备旋转不变性,当钢丝绳的摆放位置发生改变时,算法失效。为了进一步提高检测效率,尤其是在低分辨率条件下准确、高效地识别缺陷,本文从钢丝绳灰度、纹理梯度入手,对钢丝绳缺陷进行检测,具体内容包括:1)提取钢丝绳的区域灰度特征;2)采用信息熵的方法对纹理灰度、波动分布特征进行描述、量化;3)基于区域灰度特征、灰度分布、波动特征实现钢丝绳磨损、锈蚀缺陷的识别;4)通过实验验证本文提出方法的有效性与优越性。

1 钢丝绳的区域灰度与灰度分布

钢丝绳表面具有起伏不平的结构,直接反映在钢丝绳图像灰度变化上,通过对钢丝绳图像灰度的强弱、分布、波动分析,可有效地描述钢丝绳的表面特征。本文分别建立钢丝绳的区域灰度强弱特征、分布特征与波动特征的函数,实现对钢丝绳特征的提取与缺陷识别。

1.1 区域灰度特征的提取

区域灰度特征从总体上反应了在某个区域灰度的强弱程度。本文采取邻域平均法对区域灰度特征进行提取,计算公式如下:

$$g(u,v) = \frac{1}{M} \sum_{(i,j) \in S} f(i,j) \quad (1)$$

式中: $f(i,j)$ 为原始图像; S 为预先确定的邻域; M 为邻域中像素数; $g(u,v)$ 为经邻域平均法进行处理后的结果。将公式(1)分别应用于良品钢丝绳、

磨损缺陷样品与锈蚀缺陷样品的缺陷区域 (图 1 的灰色框选区域), 处理、量化结果如图 1 所示。

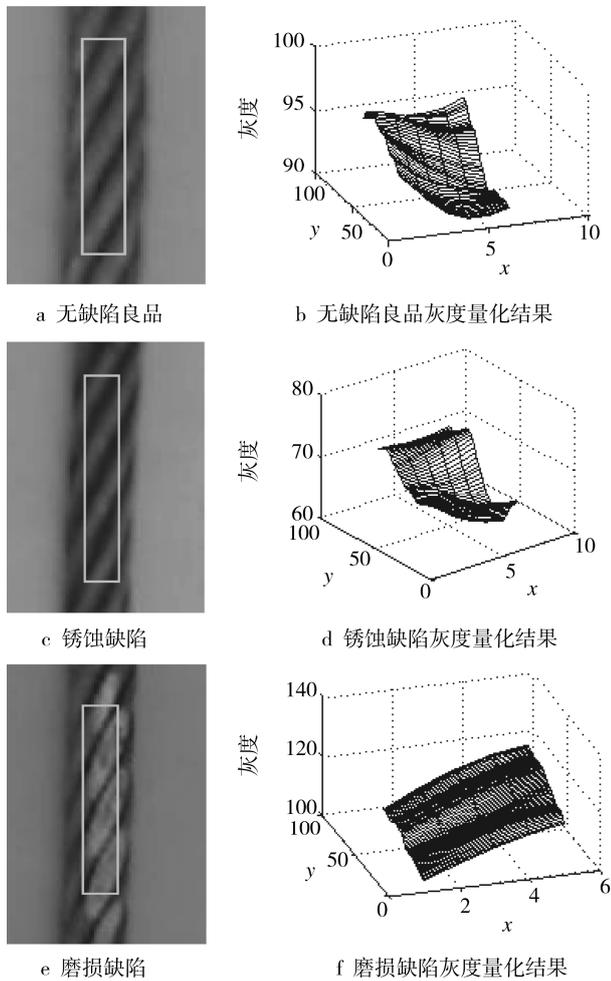


图 1 区域灰度特征

Fig.1 Regional gray feature: a) non-defective, b) gray of non-defective, c) corrosion, d) gray of corrosion, e) scar, f) gray of scar

根据图像的灰度特征量化结果, 无缺陷样品的灰度值在 90~98 区间, 锈蚀缺陷样品的灰度值分布在 60~76 范围, 磨损缺陷样品的灰度值皆高于 100。因此, 区域灰度特征可作为缺陷识别的有效特征, 尤其对于锈蚀缺陷的检测具有极好的区分能力。

1.2 灰度分布特征的量化与提取

钢丝绳表面灰度具有起伏、波动的特点, 在某个区域内不同灰度级的像素按一定的比例分布。当钢丝绳存在缺陷时, 这一比例发生改变, 图 2 为在采集了大量的无缺陷良品、锈蚀缺陷样品与磨损缺陷样品的基础上, 统计像素点落入不同灰度区间的情况——灰度直方图^[11-14]。x 轴为

灰度区间, 每个区间单位为 10, y 轴为像素落入不同灰度区间的比例。

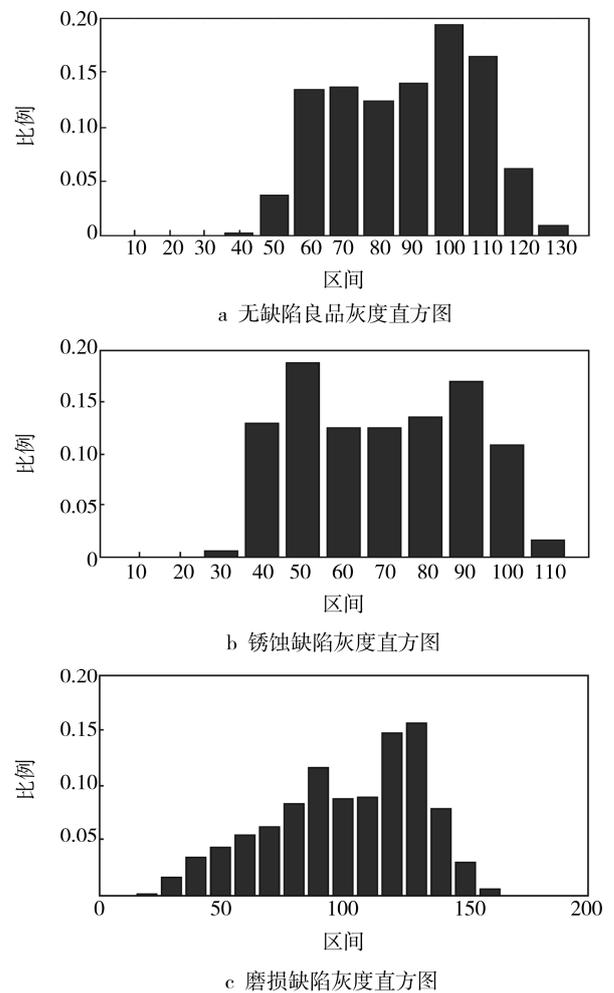


图 2 灰度直方图

Fig.2 Gray histogram: a) gray histogram on non-defective, b) gray histogram on corrosion, c) gray histogram on scar

图 2 直方图中, 无缺陷良品、锈蚀样品、磨损样品在灰度分布上表现出了不同的形态。无缺陷样品的像素分布在 40~130 区间, 锈蚀样品的像素分布在 30~110 区间, 相对于无缺陷样品的分布更为均匀与偏小, 磨损样品的像素在直方图分布中最广泛。根据不同类型样品的灰度分布特点, 建立基于熵的灰度分布特征的度量方法, 具体公式如下:

$$E = \sum_{i=1}^N i \cdot P(i) \cdot \log_2 P(i) \quad (2)$$

式中: i 为灰度区间级, $i=1$ 时, 表示 0~10 灰度区间, $i=n$ 时, 表示 $10 \times (n-1) \sim 10 \times n$ 灰度区间; N 为最高灰度区间级; $P(i)$ 为像素落入 i 灰度区间级比例。将公式 (2) 分别对图 2a、b、c 直方图进行度量, 分别得到 24.58、18.32、34.38 三种

存在一定差异的度量结果。为了验证该度量方法对于区分良品与非良品的有效性，将公式(2)分别应用于图3的无缺陷区域、磨损缺陷区域与锈蚀缺陷区域，量化结果如图3所示。

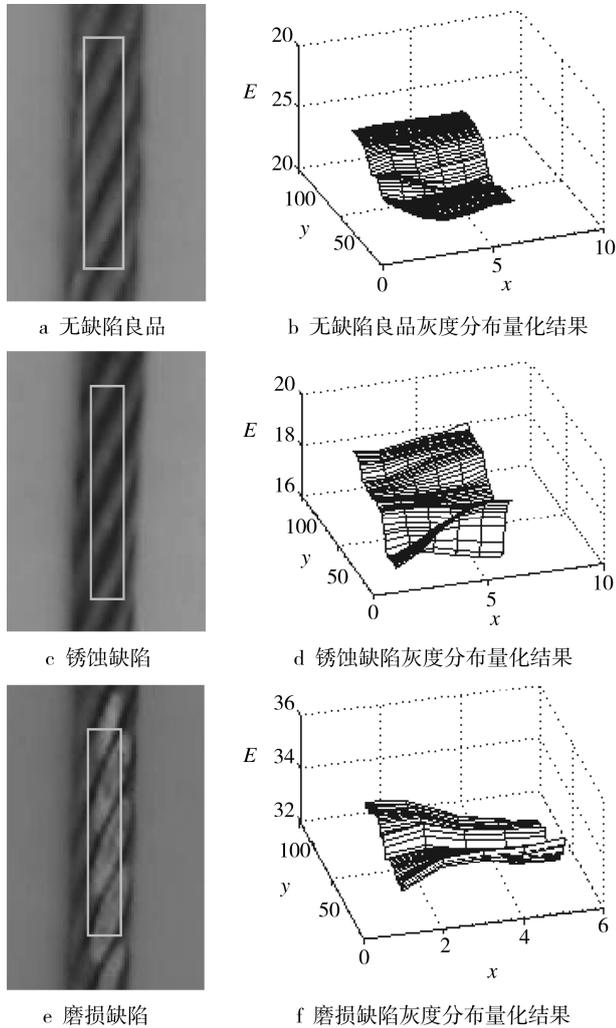


图3 灰度分布特征

Fig.3 Feature of gray distribution: a) non-defective, b) gray distribution on non-defective, c) corrosion, d) gray distribution of corrosion, e) scar, f) gray distribution of scar

观测图3的实验结果得到：无缺陷区域的灰度分布特征的量化值在22~27之间，锈蚀区域的量化值低于20，磨损缺陷区域的量化值高于32。根据以上3种类型样品的量化结果表明，基于公式(2)提取的灰度分布特征可作为缺陷判定的重要方法。

2 灰度波动特征的量化与提取

纹理梯度广泛地应用于纹理特征提取(表达式如(3)所示)。变量 $C(u,v)$ 主要反映了图像局部灰

度波动的剧烈程度，将其分别应用于钢丝绳无缺陷良品、锈蚀缺陷样品、磨损缺陷样品的灰度波动特征提取、量化，并对落入不同纹理梯度级的像素数量进行统计，统计结果如图4所示。

$$G_y = [f(x-1, y+1) + 2f(x, y+1) + f(x+1, y+1)] - [f(x-1, y-1) + 2f(x, y-1) + f(x+1, y-1)]$$

$$G_x = [f(x+1, y-1) + 2f(x+1, y) + f(x+1, y+1)] - [f(x-1, y-1) + 2f(x-1, y) + f(x-1, y+1)]$$

$$C(u, v) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \tag{3}$$

无缺陷良品、锈蚀样品、磨损样品之间在纹理梯度分布上的差异性与灰度分布特征类似——锈蚀样品的灰度波动程度最小，磨损样品的灰度波动程度最大。同理，采用公式(2)对图4a、b、c纹理梯度进行量化得到结果分别为20.4、16.67、40.12，与灰度分布特征的量化结果大小顺序相同，其中磨损样品的量化结果更具可区分性。

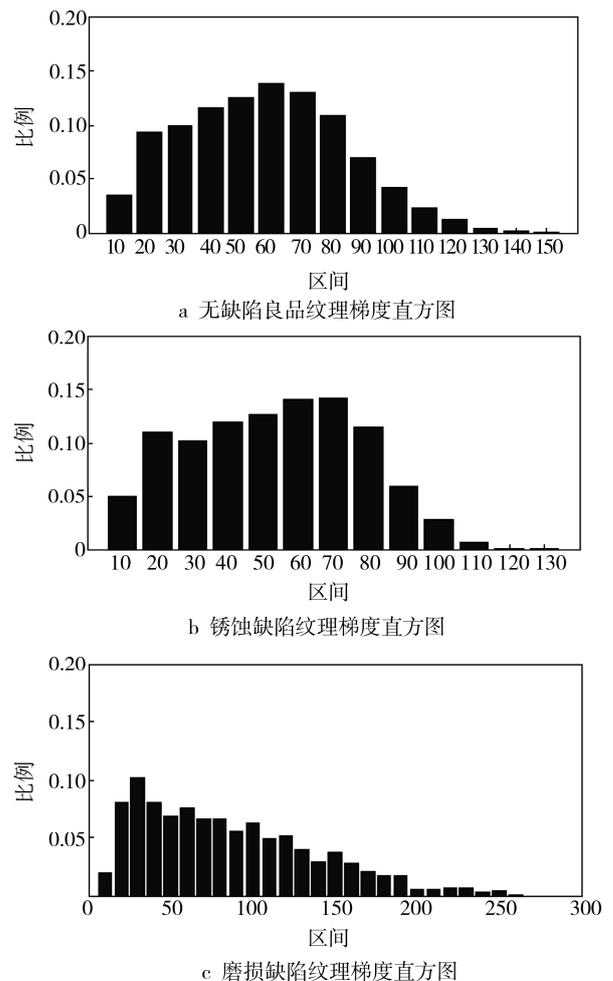


图4 灰度直方图

Fig.4 Texture gradient histogram: a) texture gradient histogram on non-defective, b) texture gradient histogram on corrosion, c) texture gradient histogram on scar

对图 5 样品作进一步验证性实验，结果得到，无缺陷良品的灰度波动量化值于 18~25 范围内，锈蚀缺陷样品的量化值落入 10~17 的区间，灰度波动特征对于区分无缺陷样品与锈蚀样品的能力相比较于区域灰度特征与灰度分布特征并不强。但对于识别磨损缺陷却表现出极高的敏感度——磨损样品的灰度波动量化值明显高于无缺陷良品与锈蚀缺陷样品。

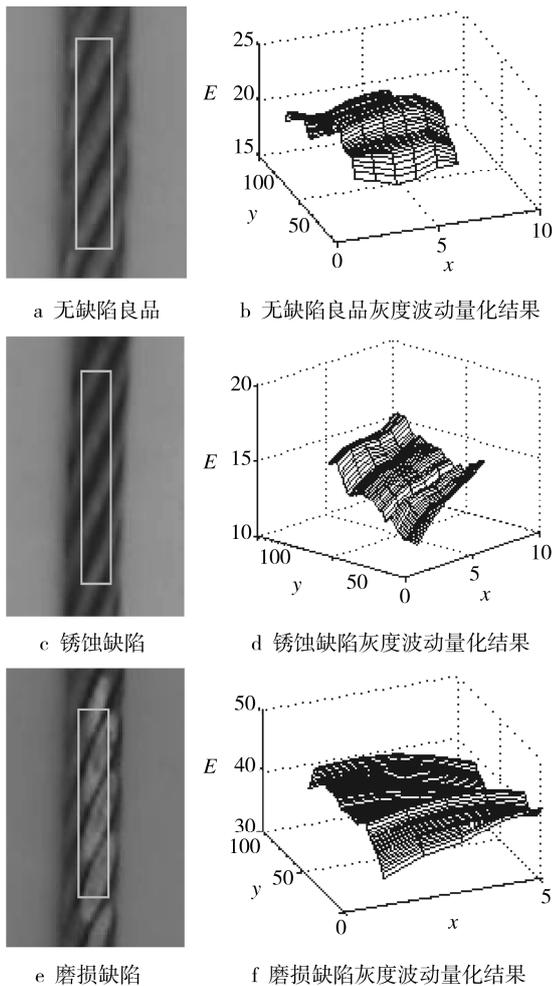


图 5 灰度波动特征

Fig.5 Feature of gray fluctuation;a) non-defective, b) gray fluctuation on non-defective, c) corrosion, d) gray fluctuation of corrosion, e) scar, f) gray fluctuation of scar

3 基于区域灰度、灰度分布、灰度波动特征的缺陷识别

通过上述研究得到：区域的灰度特征对于识别锈蚀缺陷最具优势，灰度波动特征对于磨损缺陷具有最高的敏感度，灰度的分布特征也是非常有效的缺陷检测方法。基于以上分析，本文采用区域灰度、

灰度分布与灰度波动 3 种特征联合方法对缺陷进行识别。分别选取 80 个无缺陷良品、锈蚀缺陷样品与磨损缺陷样品，观测其在区域灰度、灰度分布、灰度波动三维特征的分布情况（如图 6 所示）。图 6 中， x 轴表示区域灰度特征； y 轴表示灰度分布特征； z 轴表示灰度波动特征。

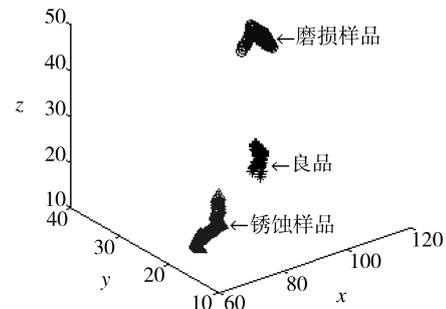


图 6 样品三维分布

Fig.6 3-dimensional spatial distribution

观测 3 种类型样品的三维分布得到，不同类型样品在三维空间中具有明显的界限，验证了基于三种特征可对缺陷实现识别的可行性。

4 缺陷识别实验

缺陷识别实验中^[15]，选取 500 个无缺陷良品，400 个磨损缺陷样品，500 个锈蚀缺陷样品，在 2.4G 双核处理器，2G 内存 PC 机的硬件平台，Matlab7.0 软件平台上进行实验。根据已采集样品的经验值设置判别阈值。当区域灰度值小于 85，则判定为锈蚀缺陷；当灰度波动特征值大于 100，则判定为磨损缺陷；当区域灰度值大于 85，且灰度波动特征值小于 100，且灰度分布特征值落入 20~28 区间内，则判定其为无缺陷良品。缺陷识别实验结果见表 1。

表 1 缺陷识别实验

Tab.1 Defect recognition experiment

类型	样品数	准确识别数	准确率/%
无缺陷良品	500	488	97.6
磨损缺陷样品	400	398	99.5
锈蚀缺陷样品	500	486	97.2
总样品	1400	1372	98

实验结果表明，本文提出的方法应用于钢丝绳的缺陷识别时具有较高的准确率，处理一幅 30×150 的钢丝绳图像(半径为 7.7 mm,长度为 38.5

mm 的钢丝绳) 的时间为 20 ms, 满足在线检测的要求。

5 总结与展望

本文提出了灰度分布特征与灰度波动特征的量化方法。通过提取钢丝绳的区域灰度特征、灰度的分布特征与灰度波动特征实现对钢丝绳缺陷的识别, 准确率高达 98%。检测直径为 7.7 mm、长度为 38.5 mm 的钢丝绳只需 20 ms, 满足实际应用的需求, 对于发展高性能、低成本的、与双轨运输机配套的钢丝绳检测设备具有重大意义。未来研究工作的重点为: 1) 提升算法的通用性上, 检测算法可覆盖更多种类型的钢丝绳缺陷识别; 2) 增强算法的适应能力, 当检测对象为同一类型缺陷但新旧不同时, 仍可实现正确的识别。

参考文献:

- [1] 洪添胜, 苏建, 朱余清, 等. 山地橘园链式循环货运索道设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 108—111.
HONG Tian-sheng, SU Jian, ZHU Yu-qing, et al. Circular Chain Ropeway for Cargo Transportation in Mountain Citrus Orchard[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 108—111.
- [2] 洪添胜, 杨洲, 松淑然, 等. 柑橘生产机械化研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 105—110.
HONG Tian-sheng, YANG Zhou, SONG Shu-ran, et al. Mechanization of Citrus Production[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 105—110.
- [3] 文韬, 洪添胜, 朱余清, 等. 山地果园索道张紧调节自动控制装置的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 128—131.
WEN Tao, HONG Tian-sheng, ZHU Yu-qing, et al. Design of Automatic Control Device for Ropeway Tension Adjustment in Hilly Orchard[J]. Transaction of the CSAE, 2011, 27(6): 128—131.
- [4] 李震, 卢加纳, 洪添胜, 等. 山地果园钢丝绳牵引货运机超声波避障系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 116—120.
LI Zhen, LU Jia-na, HONG Tian-sheng, et al. Obstacle Avoiding System of Mountain Orchard Steel Wire Rope Traction Cargo Vehicle Based on Ultra-sonic Sensing[J]. 2011, 42(10): 116—120.
- [5] HONGEYCUTT C E, PLOTNICK R. Image Analysis Techniques and Gray-level Co-occurrence Matrices (GLCM) for Calculating Bioturbation Indices and Characterizing Biogenic Sedimentary Structures[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(11): 1461—1472.
- [6] 孙慧贤, 张玉华, 罗飞路. 基于纹理特征的钢丝绳图像分割方法[J]. 光电工程, 2009, 36(4): 123—127.
SUN Hui-bian, ZHANG Yu-hua, LUO Fei-lu. Wire Rope Image Segmentation Method Based on Texture Features [J]. Opto-electronic Engineering, 2009, 36(4): 123—127.
- [7] MANTHALKAR R, BISWAS P K, CHATTERJI B N. Rotation in Variant Texture Classification Using Even Symmetric Gabor Filters[J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(12): 2061—2068.
- [8] 张志安, 冯宏伟. 一种新的基于纹理和空间分布特征的图像检索[J]. 光子学报, 2009, 37(2): 400—404.
ZHANG Zhi-an, FENG Hong-wei. A New Retrieval Algorithm Based on the Texture-Spatial Feature[J]. ACTA Photonica Sinica, 2008, 37(2): 400—404.
- [9] 孙慧贤, 张玉华, 罗飞路. 复杂背景下钢索图像的纹理分割与边界识别[J]. 光子学报, 2010, 39(9): 1666—1671.
SUN Hui-xian, ZHANG Yu-hua, LUO Fei-lu. Texture Segmentation and Boundary Recognition of Wire Rope Images in Complicated Background[J]. ACTA Photonica Sinica, 2010, 39(9): 1666—1671.
- [10] 蒙斌. 基于小波分析的钢丝绳断丝检测技术研究[J]. 矿山机械, 2015, 43(3): 58—61.
MENG Bin. Research on Steel Rope Broken-wire Detection Technology Based on Wavelet Analysis[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(3): 58—61.
- [11] YE Feng, LI Di, HUANG Jie-xian, et al. Flaw Detection on FPC Solder Surface[J]. Circuit World, 2012, 38(3): 142—152.
- [12] 杨冬涛, 黄杰贤, 龚昌来, 等. 基于方向熵的挠性印制电路板基准点定位研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(6): 712—716.
YANG Dong-tao, HUANG Jie-xian, GONG Chang-lai, et al. Research on Marker Points Locating in Flexible Print Board Based on Directional Entropy[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(6): 712—716.
- [13] 杨冬涛, 黄杰贤, 龚昌来, 等. 基于轮廓方向特征的柚子果形检测研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(10): 1175—1179.
YANG Dong-tao, HUANG Jie-xian, GONG Chang-lai, et al. Inspection for Pomelo's Shape Based on Contour Directional Feature[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(10): 1175—1179.
- [14] 杨冬涛, 黄杰贤, 龚昌来, 等. 基于纹理特征的挠性印制电路板焊盘缺陷检测[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(2): 400—402.
YANG Dong-tao, HUANG Jie-xian, GONG Chang-lai, et al. Flexible Printed Circuit Solder's Detection Based on Texture Feature[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(2): 400—402.
- [15] LOH Horng-hai, LU Min-sing. Printed Circuit Board Inspection Using Image Analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(2): 426—432.