

光缆表面缺陷视觉在线高速检测算法研究^①

吉咸阳^{②*} 徐 宁* 杨 庚** 刘逢清* 金仙力**

(* 南京邮电大学电子与光学工程学院 南京 210023)

(** 南京邮电大学计算机学院 南京 210023)

摘 要 随着光缆应用需求增加,在保证产量前提下,针对光缆表面缺陷人工检测效率低、漏检率高的问题,本文提出一种基于机器视觉在线高速检测算法方案。为了达到高速和精确的要求,将在线检测分为实时与准实时的多线程并行处理。在实时处理中,采集图像经图像增强和去噪的预处理,同时运用改进的边缘检测算法进行光缆边界搜索,通过统计过程控制法来进行缺陷预判,产生可疑图像;准实时处理则是对可疑图像进行强、弱边缘检测,重点是采用改进的双向微分算法对弱边缘缺陷分割研究,最后采用分水岭分割算法实现整体缺陷区域分割。通过仿真以及在光缆生产线上实验测试,达到最高 4m/s 的检测速度,满足多型号光缆检测,能够检测出表皮破损、划痕等常见缺陷,为高速线缆生产线自动化提供质量监控手段。

关键词 光缆表面,视觉检测,高速,缺陷分割

0 引 言

光缆表面质量是产品质量的重要组成部分,对其检测是光缆产品检测过程中重要一环。目前,国内光缆生产企业对于光缆表面缺陷的检测主要依赖于人工检测,这种检测方式效率低,漏检率较高,从而制约企业生产发展。相比之下,基于机器视觉的表面缺陷检测涉及到各行各业,包括纺织^[1]、材料^[2]、印刷^[3]、交通^[4]、冶金^[5]、金属加工^[6]、医药等领域,国内外有较多的研究成果,不乏成功的方案与检测系统,利用其实现光缆表面缺陷自动检测成为可能。

目前基于机器视觉对于光缆缺陷检测主要存在问题有:

(1) 生产线上光缆运行速度快,普通光缆的生

产速度可达 2 ~ 5 m/s,微型光缆的速度最高也接近 2 m/s。

(2) 光缆种类繁多导致表面形态不一,表面具有凹凸不平纹理的气吹微缆,由于壁薄成缆时容易造成表皮破损,是检测重点。

(3) 光缆表面缺陷种类繁多,常见的有表皮破损、划痕、鼓包、小孔等,表皮破损是生产线上亟需解决的重要缺陷。

(4) 检测环境位于充满震动、粉尘等复杂工业环境中,采集图像时受外部影响较大。

综上所述,光缆运行速度快导致实时处理数据量大,光缆表面具有复杂纹理以及缺陷种类多导致图像分割算法复杂度高,检测出缺陷需要实时标记、报警,反馈给产线工人立即处理。如何快速地处理实时采集的图像并且使用有效的分割算法对缺陷图像进行处理是光缆缺陷检测的核心问题。

① 江苏省政策引导类计划(BY2016010-01)和江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX18_0854)资助项目。

② 男,1993年生,硕士生;研究方向:数字图像处理;联系人,E-mail:18305161877@163.com
(收稿日期:2018-11-22)

1 相关工作

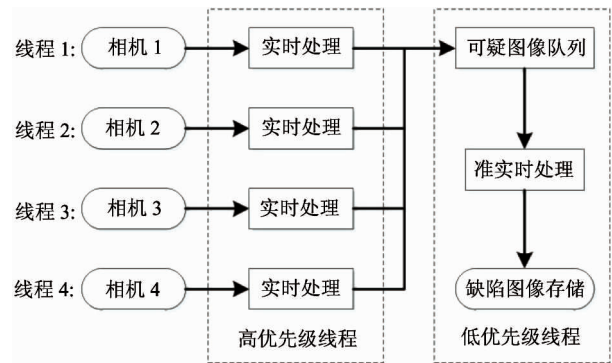
近年来,基于线缆的缺陷检测方面的相关研究逐渐增多,Zhang 等人^[7]针对复杂背景下的线材表面缺陷检测,提出了一种采用小波变换获得采集图像的子图并使用直线检测对子图线材进行检测的方法,降低复杂背景的干扰。Aswini 等人^[8]提出了一种基于形态学的底帽变换的线材表面裂缝的检测方法,对分水岭图像分割算法和形态学的底帽变换算法两种方法进行对比,得出后者相对于前者检测效果更好的结论。国内长飞光纤光缆公司^[9]提出了一种线缆表面缺陷在线检测装置及方法,对于线缆检测过程中照明装置作了详细说明。无锡港湾科技公司^[10]提出了一种基于机器视觉的线缆在线检测方法,主要检测线缆在生产过程中字符的错印、漏印、喷印模糊等。张槐祥等人^[11]研究了复杂光照环境下的线材缺陷自适应分割方法,该方法基于灰度直方图多峰值的特点,给出了峰值选取准则,并在双峰值模糊阈值分割的基础上提出了分段自适应模糊阈值的分割方法。

目前的研究工作对于线缆缺陷检测的硬件照明环境设计比较完善,上述相关论文和专利给出合理的设计结构和设计参数,满足现阶段检测所需的基本照明条件。在算法检测效果方面,多数算法采用基于阈值分割以及边缘检测的传统方法及其改进算法,对于普通光缆(表面光滑)进行缺陷检测以及表面字符提取较为容易,然而应用于表面具有凹凸不平螺纹状气吹微缆检测时,出现缺陷分割精度不高和误报率高的情况。在算法检测速度方面,现阶段多数算法面对表面光滑、不含有复杂纹理的光缆图像,采用执行速度快的分割算法以提高检测速度。而面对具有复杂纹理气吹微缆时,如果只重视检测效果,无法匹配生产线上光缆运行速度,势必影响企业生产效率。

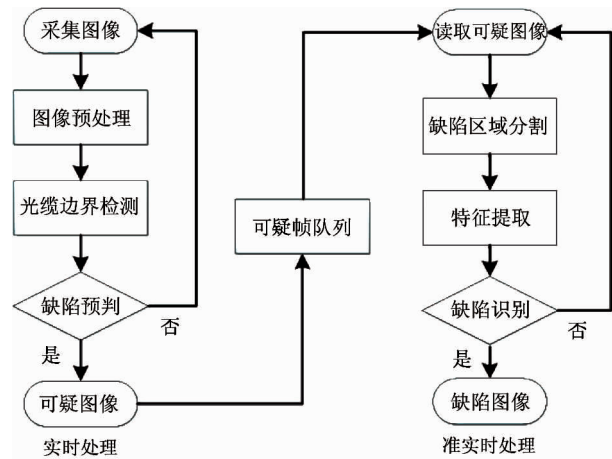
围绕光缆缺陷检测对速度以及精确的要求,采用多线程并行处理技术,将在线检测分为实时处理与准实时处理两部分,以实现在复杂纹理背景光缆图像上缺陷快速分割。

2 检测方案

图 1 为光缆表面缺陷在线高速检测总流程图。



(a) 系统结构流程图



(b) 单相机处理流程图

图 1 光缆表面缺陷在线高速检测流程图

在检测过程中,采用 4 部相机以环绕方式对光缆表面进行图像采集,保证了对光缆表面的全覆盖,光缆的照明方式为暗域照明。4 部相机各自对应一条缺陷检测线程,并行处理实时采集图像,每部相机的检测线程分为实时处理与准实时处理的多线程处理。其中实时处理设置高优先级线程,采用快速检测算法判断当前图像是否为包含缺陷的可疑图像,准实时处理也采用独立线程来处理,主要解决可疑图像的缺陷分割、识别等复杂的图像处理。

实时处理数据量大,旨在从大量采集图像中找到可疑图像,要求算法简单,避免因算法复杂度影响

系统效率。采集图像首先进行图像增强和去噪的预处理,图像去噪采用自适应窗口技术进行动态调整;光缆边界检测中,采用改进的边缘检测算法,去除多余背景,提取出缆面部分;最后采用基于统计过程控制的灰度阈值判断来进行缺陷预判,可疑图像送入到可疑图像队列中保存并进入后续的准实时处理,如果非可疑图像,则进行下一帧的判别。

准实时处理对可疑图像进行复杂图像分割,经实时处理后所要处理的数据量大大变少,弥补了算法耗时的影响。首先从可疑图像队列中取出相应图像,进行强、弱边缘缺陷检测,重点是采用改进的微分算法对弱边缘缺陷研究;通过形态学操作相加,采用分水岭分割算法实现整体缺陷区域分割;最后对缺陷图像进行标记、保存,并报警反馈给产线工人及时处理。

3 实时处理

依据缺陷检测流程,在实时处理部分,采集图像经预处理后,通过光缆边界检测提取出缆面图像,再进行缺陷预判,产生可疑图像送入到可疑图像队列中。

3.1 图像预处理

由于检测环境位于充满震动、粉尘等复杂工业环境中,采集图像时易受光照条件、采集设备等因素影响,引入差错和干扰,造成图像质量下降,并对后续缺陷预判和分割产生影响。因此,通过图像增强、去噪的预处理,可获取高质量的图像。

3.1.1 图像增强

通过基于频域变换的同态滤波法减少光照不足引起的图像质量下降,并对缺陷部分进行细节增强,这样既保证图像原貌,又对细节部分进行增强。在频域中,采用 1 阶布特沃斯低通滤波器,其滤波函数为

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + [D(u,v)/D_0]}$$

其中, $u、v$ 表示频域变量; $D(u,v)$ 为任意一点到中心变换的距离; D_0 为影响滤波器带宽的截止频率,通过对截止频率 D_0 的设置,可滤除相应的低频信息,实现图像对比度增强。如图 2(a2)、(b2)、(c2)

所示,通过设置不同的 D_0 进行对比。 $D_0 = 0.4$ 时图像灰度分布更加均匀,实现图像对比度增强。

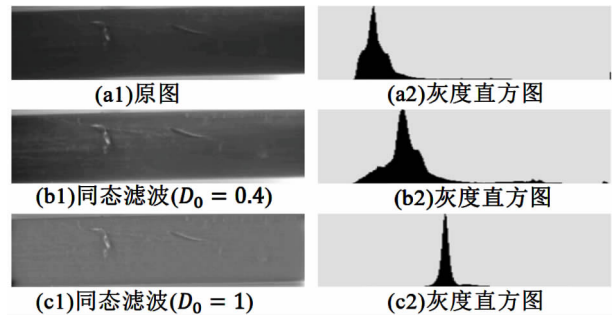


图 2 光缆图像增强效果对比

3.1.2 图像去噪

“椒盐噪声”是光缆图像采集过程中一种常见的噪声形式,通过基于中值滤波的方法进行图像去噪,还原噪声点的原始灰度值。为了适应光缆噪声分布特点,采用自适应窗口技术并进行动态调整,其改进的算法流程如图 3 所示。

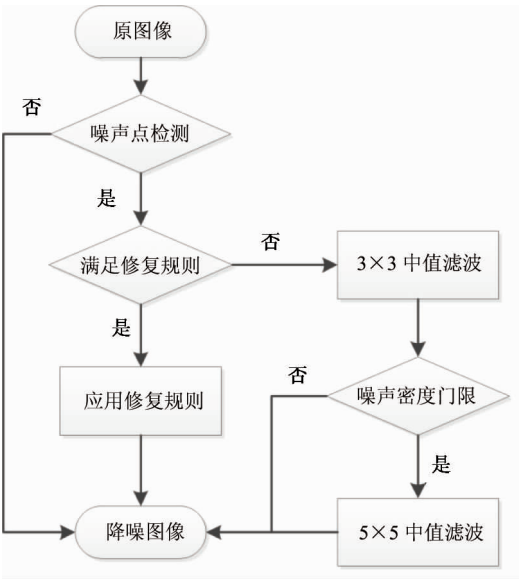


图 3 光缆图像去噪流程图

为了模拟实际环境,在仿真过程中引入噪声密度 $\rho = 30\%$ 的“椒盐噪声”,采用传统的 5×5 中值滤波以及本文改进的算法进行对比,其仿真结果如图 4 所示。从图中可以看出,传统的中值滤波已经不能满足实际去噪需求,图中依旧有许多噪声点存在,改进的算法不仅滤除图中噪声点,而且光缆区域

的细节得以保存。

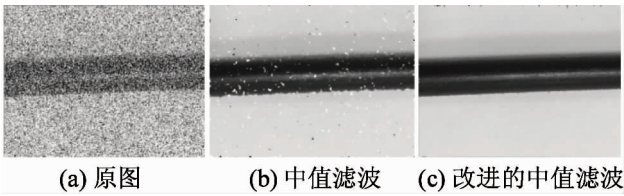


图 4 两种算法滤波结果对比

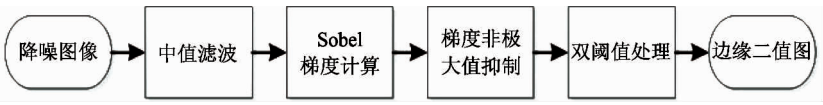


图 5 改进的 Canny 边缘检测算法处理流程图

边缘二值图在径向灰度投影后,背景区域存在许多“尖峰”,如图 6(b)所示,采用插值法对灰度投影直方图进行平滑。平滑后的直方图,为了准确寻找出光缆区域的边界位置,采用阈值边界搜索法进行边界位置搜索,对于不同型号的光缆设定相应的阈值条件,从直方图上下两侧向中间寻找光缆边界,返回满足阈值条件的坐标,从而提取出光缆区域,如图 6(d)所示。

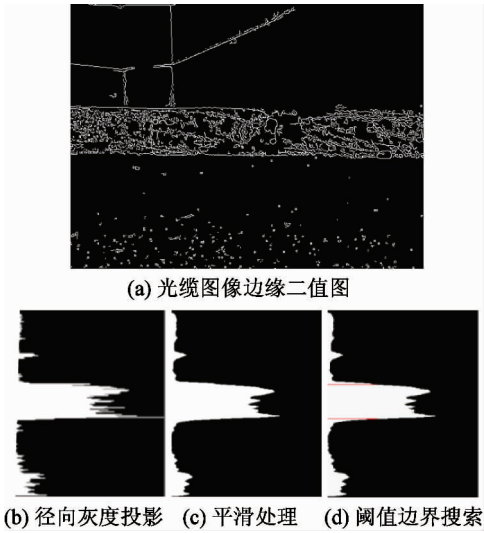


图 6 光缆边界检测

3.3 缺陷预判

实时处理过程中,采集图像经预处理以及光缆边界检测后,需要对光缆图像进行缺陷预判产生可疑图像。缺陷预判要求算法简便,旨在从实时采集

3.2 光缆边界检测

原始采集图像是包含有光缆和背景区域,需要通过边缘检测算法予以去除背景。为了提取完整光缆区域,同时抑制背景中边缘响应,在传统的 Canny 边缘检测算法基础上,对其前置滤波器做了变换,用中值滤波代替传统的高斯滤波。不仅滤除背景中噪声干扰,同时减少对光缆图像边缘信息影响,其算法流程如图 5 所示。

图像中寻找包含有缺陷的可疑图像,满足快速检测需求,采用基于统计过程控制的灰度阈值判断来进行可疑图像预检测。统计过程控制法是利用统计分析技术实时监控产品质量,并对异常给予报警,可将其应用于缺陷快速检测^[12]。

对于一盘待检测的新缆,首先进行单帧测试,取出一帧未含有缺陷的缆面图像,如图 7 所示,根据图像的灰度值计算出图像均值 T 、标准差 σ ,以确定图像的上下限 $[T + k\sigma, T - k\sigma]$,其中 k 为常数。开始检测后依据此上下限对实时采集图像进行缺陷预判,若图像灰度值超过此上下限,则判定为包含有缺陷的可疑图像,送入到可疑图像队列中进行后续准实时处理;若在此上下限之中,则舍弃并进行下一帧判别。标准差 σ 与合格率之间的关系如表 1 所示,实验验证,当 $k = 3$ 时,满足实际检测需要。



图 7 未含有缺陷的缆面图像

表 1 标准差与合格率之间的关系

管控标准	1σ	2σ	3σ
合格率	68.27%	95.45%	99.73%
管控标准	4σ	5σ	6σ
合格率	99.994%	99.99994%	99.9999998%

4 准实时处理

准实时处理从可疑图像队列中提取可疑图像,对其进行缺陷区域分割,通过缺陷搜索、拟合,将缺陷区域标注出来,最后对缺陷图像进行保存并向用户报警,其中缺陷区域分割为准实时处理部分重点研究内容。

光缆表面诸多种类缺陷可归结为两类,如图 8 所示,强边缘缺陷与光缆区分明显,分割容易;而弱边缘缺陷区分不明显,是缺陷分割研究重点。针对强、弱边缘缺陷特点不同,采用不同的分割算法实现。

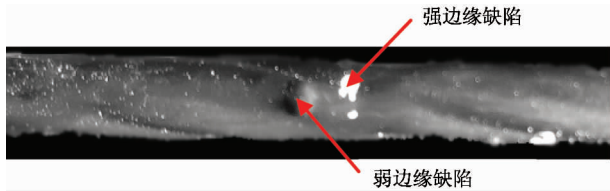


图 8 光缆表面主要缺陷示例

对于强边缘缺陷,由于与光缆区分明显,采用传统的阈值分割算法。3 种常见的阈值分割法处理结果如图 9 所示^[13-15],通过对比发现,最小误差分割算法对于强边缘缺陷分割效果较好,缺陷区域分割明确,同时抑制了光缆表面花纹的干扰。

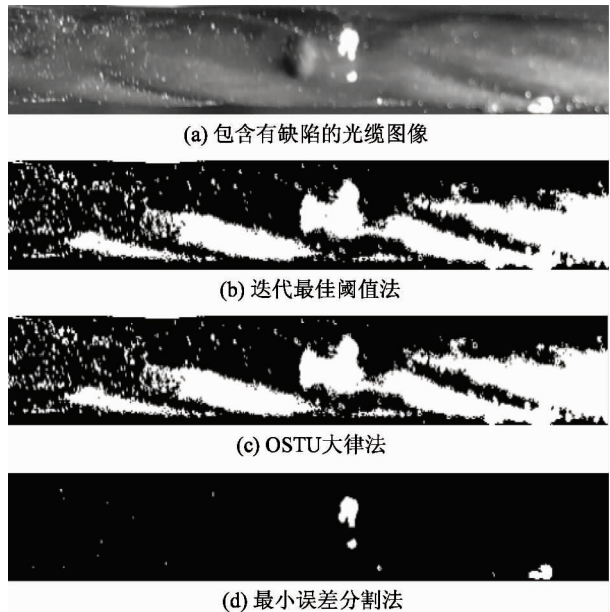


图 9 3 种常见的阈值分割法处理结果

对于弱边缘缺陷,由于边缘灰度变化缓慢,由图 9(d)可知传统的阈值分割算法已不适用,为适应边缘缓变的灰度变化,采用基于微分算子图像处理方法。如图 10(b)所示,传统的 Scharr 算法受缆面花纹影响较大,分割过后缆面纹理过于明显,需对其进行改进。具体为采用水平两个方向的 Scharr 算法对图像求取梯度,并对其处理结果进行合成,如图 10(c)所示,使得光缆表面花纹进一步弱化,经形态学开操作处理后,只有弱边缘缺陷区突显出来,如图 10(d)所示。

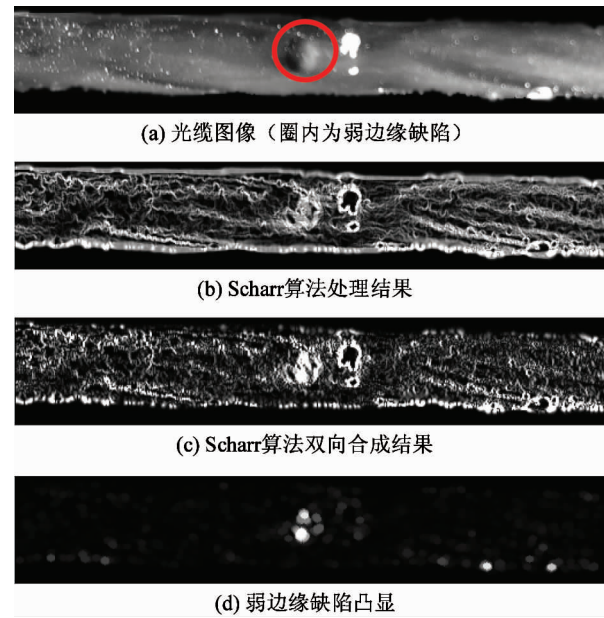


图 10 弱边缘缺陷检测结果

光缆图像经强、弱边缘缺陷检测后,通过形态学操作相加,采用分水岭分割算法实现整体缺陷区域分割,将同一幅光缆图像中强、弱边缘缺陷都分割出来。图 11 是基于图像标记的分水岭分割示例,从图 11(c)可以看出,强、弱边缘缺陷都被提取出来,并没有受到缆面花纹的影响。缺陷分割后得到初始的缺陷二值图,对其进行缺陷轮廓搜索、拟合,在可疑图像中标注出来,方便后续的缺陷识别与分类等复杂的图像处理与分析,如图 11(d)所示。

5 测试分析

为了验证算法方案对光缆表面缺陷检测的效果

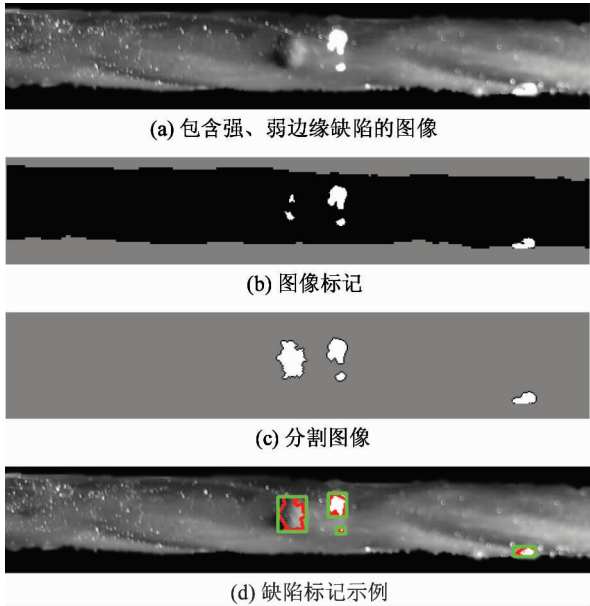


图 11 缺陷图像分割、标记示例

和性能,本文进行了相关仿真测试和实际生产线的在线测试。以表面结构较复杂的气吹微缆作为检测对象,主要原因有:(1)微缆表面具有复杂花纹,如图 8 所示,检测难度大;(2)微缆表皮较薄,容易造成破损,是现阶段重点检测对象。系统开发环境为编程工具 Microsoft Visual Studio2010,编程语言 C++,涉及库 openCV2.4。

首先对系统性能进行测试,在 1280 × 512 分辨率情况下,统计 4 部相机线程每处理 100 帧的时间,如表 2 所示。从中选取最大耗时作为并行处理时间,时间均值为 3 471.5 ms,考虑 4 路并行运算,单帧处理时间为 8.67 ms,即处理速度为 115 帧/s,每帧图像采集光缆长度约为 40 mm,考虑到图像重叠度,实际检测时可满足最高 4 m/s 的检测速度。

表 2 处理 100 帧时间性能测试(ms)

	组 1	组 2	组 3	组 4	均值
线程 1	3360	3506	3284	3343	3373.25
线程 2	3273	3451	3484	3463	3417.75
线程 3	3385	3417	3532	3317	3412.75
线程 4	2617	2584	2671	2575	2611.75
最大时长	3385	3506	3532	3463	3471.5

通过与光缆生产企业的合作研发,缺陷检测设备已在生产线上进行测试运行,如图 12 所示,检测位置位于护套冷却工艺与护套喷码工艺之间。



图 12 研发样机在线测试(图中左侧)

在线测试时选取检测对象为直径 6.5 mm 气吹微型光缆,生产速度为 1 m/s,通过单帧测试测得图像均值 T 为 116,标准差 σ 为 13,应厂方要求,检测时设置缺陷尺寸大小为 2 mm。通过 7 天的线上测试,对每盘缺陷检测出数量进行统计,每盘微缆长度 5 km,统计结果如表 3 所示。由表可知,表皮破损之类亟需工人解决的缺陷少之又少,多数缺陷是由划痕和光缆表面沾有水珠、纤维等产生,与产线工人沟通可知,这样的“伪缺陷”不做相应的处理,在线测试采集缺陷图样示例如图 13 所示。

表 3 每盘缺陷数量统计(个)

盘号	划痕	破损	水珠、纤维	合计
1	11	0	16	27
2	9	1	22	32
3	6	0	12	18
4	12	0	11	23
5	8	1	16	25

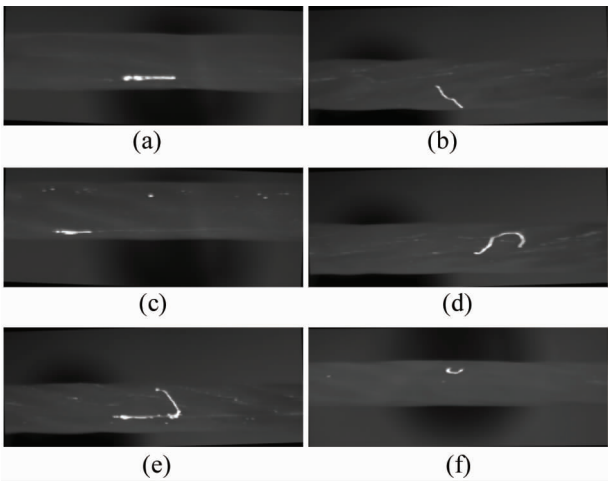


图 13 在线测试采集缺陷图样示例

缺陷尺寸设置 0.2 mm 时,缺陷漏检率为 1%,缺陷检出率为 99%。但检测时设置缺陷尺寸过小导致缺陷误报率增加,不能满足实际的使用需求,在线测试时选取 2 mm 缺陷尺寸满足在线检测的实用性。光缆生产线上与生产企业引进加拿大 TAYMER 公司的线缆表观缺陷检测设备 SI3100 进行同类产品比较时,由表 4 相关检测参数对比可知,本检测系统达到了国外同类产品的检测水平,并且在最高检测速度方面具有优势。

表 4 本系统与 SI3100 相关检测参数对比

	检测直径 (mm)	最高检测 速度(m/s)	缺陷检出率(%) (设置最小缺陷尺寸下)
SI3100	0.8~40	2.5	99
本系统	1~20	4	99

6 结 论

本文提出了一种光缆表面缺陷在线高速检测的算法方案,将在线检测分为实时与准实时的多线程并行处理。实时处理部分算法简单、效率高,实时处理采集图像并筛选出可疑图像;准实时处理部分采用多种分割算法从可疑图像中分割出强、弱边缘缺陷,这样多线程处理以实现检测效果优化。

通过光缆生产线上实际测试,在检测速度方面,可满足最高 4 m/s 的检测速度;在检测出缺陷方面,不仅可以检测出表皮破损这样亟需解决的重要缺陷,而且能检测出常见的光缆表面划痕缺陷,供产线工人辨别以及相应的处理;在检测光缆种类方面,不仅可检测普通型号光缆,而且适用于表面具有花纹状的微缆检测。该算法满足现阶段光缆缺陷检测的实用性,后续在缺陷识别与分类方面将做进一步研究。

参考文献

[1] Li C, Gao G, Liu Z, et al. Fabric defect detection based on biological vision modeling[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 27659-27670

[2] Zhang Y, Lefebvre D, Li Q. Automatic detection of defects in tire radiographic images[J]. *IEEE Transactionson Automation Science & Engineering*, 2017, 14 (3): 1378-1386

[3] Wang W C, Chen L B, Chang W J, et al. A machine vision based automatic optical inspection system for measuring drilling quality of printed circuit boards[J]. *IEEE Access*, 2016, 5:10817-10833

[4] Sun L, Xing J C, Zhang X. An extraction and classification algorithm for concrete cracks based on machine vision [J]. *IEEE Access*, 2018, 6:45051-45061

[5] Li Q, Ren S. A real-time visual inspection system for discrete surface defects of rail heads[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2012, 61 (8):2189-2199

[6] 王义文,屈冠彤,刘献礼,等. 钢球表面缺陷的图像差分检测算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016,28(10): 1699-1704

[7] Zhang J, Kang D, Won S. Detection of scratch defects for wire rod in steelmaking process [C]. In: International Conference on Control Automation and Systems, Gyeonggi-do, Korea, 2010. 319-323

[8] Aswini E, Divya S, Kardheepan S, et al. Mathematical morphology and bottom-hatfiltering approach for crack detection on relay surfaces [C]. In: IEEE International Conferenceon Smart Structures and Systems, Chennai, India,2013. 108-113

[9] 苏晓帆. 一种线缆表面缺陷在线检测装置及方法 [P]. 中国专利, 201310085593. 1. 2013-3-18

[10] 高峰. 基于机器视觉的线缆在线检测方法[P]. 中国专利, 201310564470. 6. 2013-11-14

[11] 张槐祥,刘怀广,杨茂麟,等. 复杂光照环境下的线材缺陷自适应分割方法[J]. 光电工程,2014,41(2):40-46

[12] 郭永彩,邓细凤,高潮. 基于主成分分析的表面缺陷自动检测算法[J]. 计算机工程,2013,39(2):216-219

[13] 陈君,朱红. 基于互信息最佳阈值迭代的图像分割方法研究[J]. 武汉理工大学学报,2011,35(3):641-644

[14] 龙建武,申铨京,陈海鹏. 自适应最小误差阈值分割算法[J]. 自动化学报,2012,38(7):134-1144

[15] 范九伦,雷博. 灰度图像最小误差阈值分割法的二维推广[J]. 自动化学报,2009,35(4):386-393

Research on visual online high-speed detection algorithm for optical cable surface defects computer engineering and applications

Ji Xianyang^{*}, Xu Ning^{*}, Yang Geng^{**}, Liu Fengqing^{*}, Jin Xianli^{**}

(^{*} College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts
and Telecommunications, Nanjing 210023)

(^{**} School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023)

Abstract

With the increasing demand for optical cable applications, under the premise of ensuring the output, an online high-speed detection algorithm based on machine vision is proposed to solve the problems of low manual detection efficiency and high missed detection rate of optical cable surface defects. For high speed and high accuracy, online detection is divided into real-time and quasi-real-time multi-thread parallel processing. In the real-time processing, the acquired image is preprocessed by image enhancement and denoising. At the same time, the improved edge detection algorithm is used to search the cable boundary, and the defect prediction is performed by the statistical process control method to generate the suspicious image. Quasi-real-time processing is to detect strong and weak edges of suspicious images. The focus is on the improved bidirectional differential algorithm for segmentation of weak edge defects. Finally, the watershed segmentation algorithm is used to realize the segmentation of the whole defect region. Through simulation and experiment testing on the cable production line, the maximum detection speed reaches 4 m/s, which meets the requirements of multi-model cable inspection. The algorithm can detect common defects such as skin damage and scratches, and provide quality monitoring means for high-speed cable production line automation.

Key words: cable surface, visual inspection, high speed, defect segmentation