

金刚石线表面缺陷视觉检测方法

戴福全, 池生烨

(福建理工大学 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 针对当前金刚石线表面质量检测算法存在因颗粒堆积、遮挡、粘连等问题导致准确率降低的情况, 提出一种基于金刚石线的形貌特征和几何特征的质量检测方法。通过两台工业相机以背光照明的方式获取金刚石线图像, 并应用图像处理技术进行裁剪、校正、增强、二值化等操作以准确提取金刚石线区域和特征信息, 根据相关的特征信息完成对偏厚、偏薄、线头、剥离、杂质、分布、无缺陷等金刚石线图像的检测实验。实验结果表明, 提出的方法能够准确、高效地提取金刚石线的各类缺陷, 准确率达98.8%, 能够满足企业实际检测需求。

关键词: 机器视觉; 金刚石线; 质量检测; 特征提取; 分类识别

中图分类号: TP399

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)03-0267-08

Visual inspection method for surface defects of diamond wire

DAI Fuquan, CHI Shengye

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In view of the fact that the accuracy of the current diamond wire surface quality detection algorithm is reduced due to the problems of particle accumulation, occlusion and adhesion, a quality detection method based on the morphological and geometric features of diamond wire was proposed. The diamond wire image is acquired by two industrial cameras in the form of backlight illumination, and the image processing technology is applied for cropping, correcting, enhancing, binarization and other operations to accurately capture the diamond wire area. Then, the diamond wire area is used for feature extraction, and the detection experiment of the diameter oversize, diameter undersize, wire end, stripping impurity, distribution, and no defects of the diamond wire images is completed according to the relevant feature information. The experimental results show that the proposed method can accurately and efficiently extract various defects of diamond wires, and the detection accuracy is 98.8%, which can meet the actual detection needs of enterprises.

Keywords: machine vision; diamond wire; quality inspection; feature extraction; classification

金刚石线是以电镀金属为结合剂, 通过金属的电沉积, 将金刚石磨料固结在芯线基体上的一种线性切割工具^[1], 具有切割效率高、精度高、损耗小和对环境污染小等优点^[2], 被广泛应用于单晶硅、半导体、宝石等贵重材料的切割。金刚石线质量的好坏不仅会影响切割工作的效率和质量, 还决定着切割能力的发挥。因此, 实现金刚石线表面质量的精确检测具有重要意义。

现有的金刚石线质量检测方法主要分为传统

的人工检测与基于机器视觉的智能检测两大类。传统的人工检测方法主要依赖于人眼的观察与判断, 存在着一系列局限性。首先, 人工检测的效率较低, 检测速度有限, 而且操作人员容易受到视觉疲劳的影响, 进而影响了检测的准确性。其次, 由于人工检测无法实现连续的实时监测, 因此很难对质量问题进行及时的发现和处理, 对产品的质量和可靠性构成了潜在风险。为解决传统方法的弊端, 基于机器视觉的检测方法应运而生。该方

收稿日期: 2023-12-01

基金项目: 福建省 2022 年中央引导地方科技发展资金项目 (2022L3014)

第一作者简介: 戴福全 (1987—), 男, 福建龙岩人, 副教授, 博士, 研究方向: 机器人动力学建模及控制。

法利用先进的图像处理技术和深度学习算法,能够高效、准确地识别和评估产品的质量,不仅提高了检测效率,也显著提升了质量控制水平^[3]。张文晔等^[4]采用支持向量机的分类方法对粘连颗粒进行了检测分类。刘明宇等^[5]提出了检测金刚线质量的“出刃高度”和“出刃率”,并完成了金刚线的三维表面重建。刘晓敏^[6]通过向量机分类结合主成分分析法实现了对金刚石线的缺陷检测。黄叶祺^[7]采用深度学习技术,提出一种基于改进的 YOLOv5 金刚线表面质量检测方法,有效解决了粘连颗粒检测精度低的问题。

然而,上述基于机器视觉的金刚石线表面质量检测方法,主要侧重于颗粒形貌特征的检测,由于金刚石线表面存在颗粒堆积、遮挡、粘连等现象,将引起计算误差,从而导致识别准确率相对较低。因此,本研究结合实际检测需求,借助机器视觉技术,提出一种基于金刚石线的形貌特征和几何特征的质量检测方法,以实现 对金刚石线表面缺陷的自动检测。

1 系统框架

金刚石线视觉检测平台的主要组成部分包括两个光源、两台工业相机以及远心镜头等,如图 1 所示。相机被安装在金刚石线的上方和左侧,通过微动平台的微调,可实现相机镜头与金刚石线之间的距离调整,以确保获得清晰的图像。该系统采用背光照明的方式,光源分别位于金刚石线的下方和右侧。尽管背光照明方式可能会导致产品表面特征的部分丧失,但它能够有效地捕捉清晰的产品边缘特征信息,从而增强了图像的对比度。同时,系统中的轮系以一定的速度运动,这一运动过程带动了金刚石线的移动。上位机负责实时采集工业相机所捕获的图像,并对这些图像进行处理与分析,判断金刚石线是否符合质量标准,从而保证产品的合格性。

2 常见的缺陷类型

在实际生产过程中,由于工艺流程和加工设备都可能会造成金刚石线的缺陷。本研究考虑 6 种主要缺陷:偏厚、偏薄、线头、剥离、杂质、分布。通过工业相机得到这 6 种缺陷图像及无缺陷的图像,如图 2 所示。

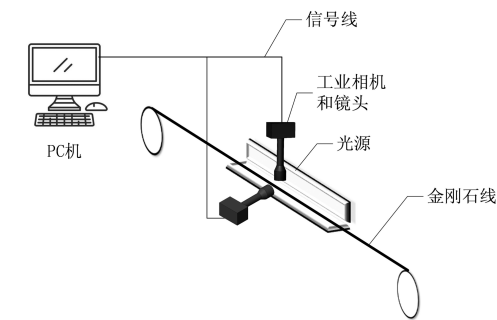


图 1 检测系统结构简图

Fig.1 Schematic diagram of detection system structure

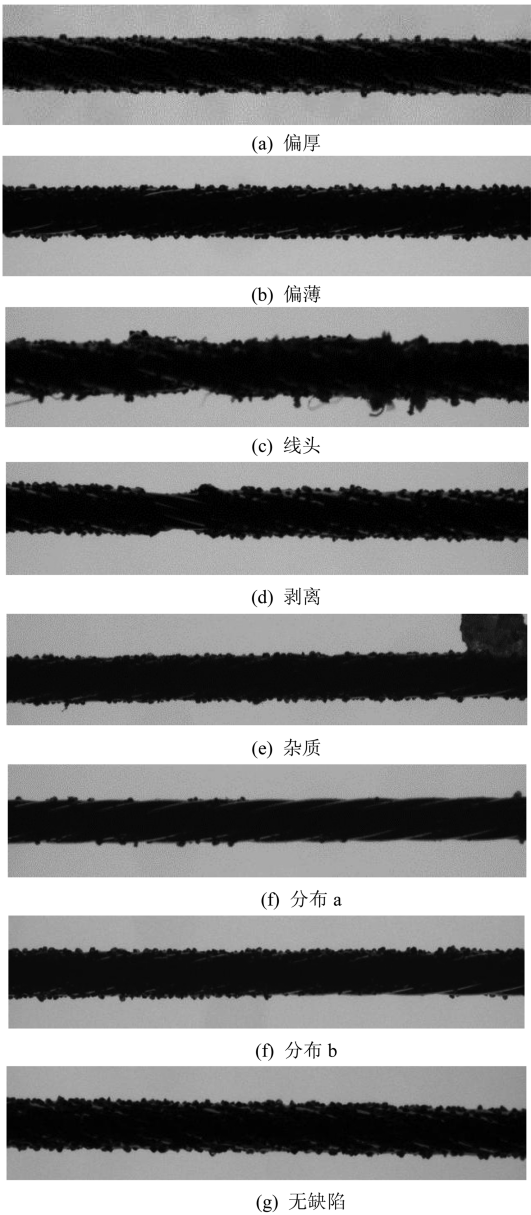


图 2 金刚石线图像

Fig.2 Diamond wire image

3 缺陷检测算法

检测算法总体流程如图 3 所示,由于金刚石线的区域只占原始图中的一部分,为了减少计算量并滤除非金刚石线区域的干扰,首先截取原始图像中的感兴趣区域(ROI),并对之进行校正、增强和二值化处理。然后,对经过预处理的图像进行特征识别,计算“颗粒的总面积”、“金刚石线的外径”、“直径上限长度”、“去除颗粒后的外径”、“颗粒之间的最大距离”、“金刚石线上最大颗粒的面积”等性能指标。最后根据提取到的特征,实现缺陷的识别与分类。

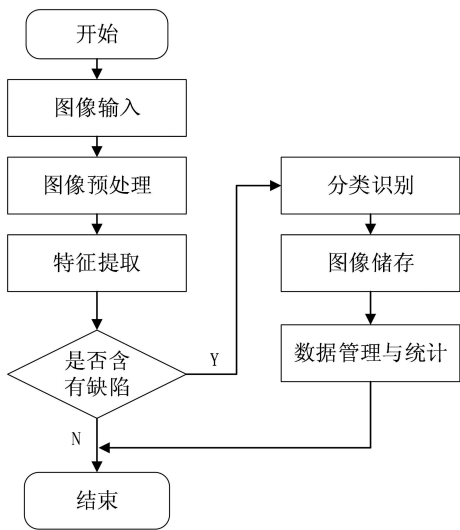


图 3 工作流程图
Fig.3 Flow chart

3.1 图像预处理

图像预处理的主要目的是减少图像中的无关信息,增强有用信息的可检测性,简化数据,提升特征提取可靠性,为后续识别提供基础^[8]。

3.1.1 ROI 提取

由相机采集的原始图像中,金刚线的图像位于中间部分,其上下都有大面积的非金刚石线信息的背景区域。为了降低计算复杂度、消除非金刚石线区域的干扰,提高后续特征提取和识别的准确性,可选取原始图像中的一个固定区域作为研究的感兴趣区域。ROI 裁减如图 4 所示。

3.1.2 图像校正

在实际图像采集过程中,通过工业相机采集的金刚石线图像可能产生一定角度的倾斜,如图 5(a)所示。倾斜的图像会增加图像处理算法的复杂性和计算量。为简化算法设计,校正倾斜图

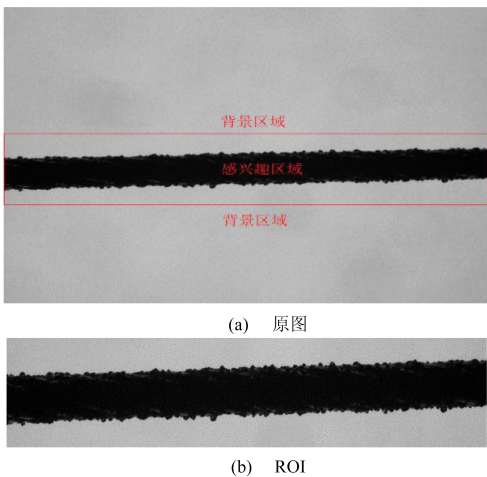


图 4 ROI 裁减示意图

Fig.4 Schematic diagram of ROI reduction

像成为预处理的关键步骤。仿射变换和投影变换是两种常见的图像校正算法。投影变换更适用于需要考虑透视效果的情况,如进行镜头矫正。应对倾斜金刚石线图像的校正,需要使用的是仿射变换。仿射变换中的平移变换、缩放变换和旋转变换是处理图像的 3 种基本变换,对金刚石线图像进行倾斜校正,旋转变换更为合适。旋转变换的思路是利用一个最小外接矩形框围绕对象轮廓,通过该矩形获取图像的倾斜角度,最后根据这个角度进行旋转变换,从而实现图像的校正,如图 5(b)所示。仿射变换的模型可以表示为:

$$\text{HomMat2DRotate} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot T \quad (1)$$

$$T = \text{HomMat2D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, HomMat2DRotate 为仿射变换矩阵, HomMat2D 为单位矩阵, θ 是旋转角度。

3.1.3 图像增强

在复杂的工业环境中,由于检测设备产生的抖动及其他环境因素的影响,导致小部分采集到的图像质量较低,具体表现为图像模糊,清晰度较低,如图 6(a)所示。为了恢复图像真实样貌,更好区分金刚石线区域与背景,同时减少干扰信息,其处理方式是增强图像的高频区域(边缘和拐角),使图像看起来更清晰。增强后的图像如图 6(b)所示。

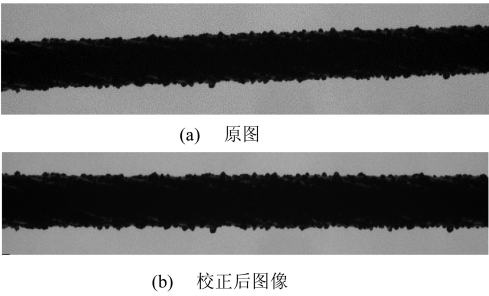


图 5 图像校正效果图

Fig.5 Image correction effect diagram

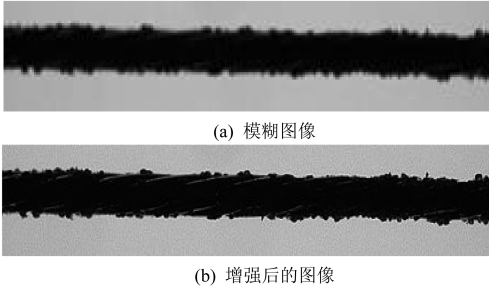


图 6 图像增强效果图

Fig.6 Image enhancement rendering

3.1.4 阈值处理

在场景中选择物体或特征是图像测量或识别的重要基础。观察采集到的金刚石线图像,可以发现图像中的背景呈灰色,而金刚石线区域则呈纯黑色。通过使用阈值分割法,能轻易将金刚石线区域从图像中提取出来,阈值分割法是最简单也最常用的区域选择方法^[9]。阈值分割算法有很多种,主要分为局部阈值分割和全局阈值分割。局部阈值法是将图像按一定规则划分成若干子图像,再对每个子图像使用全局阈值法选取一个阈值。全局阈值法是指在阈值分割中只使用一个全局阈值的方法^[10]。

经过上一步的图像增强,金刚石线区域和背景之间的差异更加显著。图 7 是金刚石线图像的灰度直方图。通过观察可以发现,图像中的目标和背景呈现明显的灰度差异,其直方图呈双峰形状。相对而言,选择全局阈值法比局部阈值法效果更佳,因为尽管局部阈值法在应用上更为广泛,但其处理速度较慢,可能导致连通性较差等问题,直接影响后续的特征识别工作^[11]。全局阈值法的核心是设置合适的阈值 T 将目标与背景分开。具体阈值设置方法如下:

$$g(x,y)=\begin{cases} 255 & f(x,y)\geq T \\ 0 & f(x,y)<T \end{cases} \quad (3)$$

式中, $f(x,y)$ 为的原始图像, $g(x,y)$ 为阈值运算后的图像。

金刚石线的质量检测是自动检测,最好采取自动确定全局阈值的算法,从而避免每次质量检测前的阈值设定工作。大律法^[12] (OSTU) 是常用的一种自适应阈值计算方法,其核心思想是按照灰度值将图像分为目标和背景,并通过目标和背景的最大类间方差来选择最佳阈值。利用 OSTU 算法获取最佳阈值计算公式为:

$$u=w_0\times u_0+w_1\times u_1 \quad (4)$$

$$g=w_0\times(u_0-u)^2+w_1\times(u_1-u)^2 \quad (5)$$

联立上式得:

$$g=w_0\times w_1\times(u_0-u_1)^2 \quad (6)$$

其中,目标点数占图像比例为 w_0 ,平均灰度为 u_0 ;背景点数占图像比例为 w_1 ,平均灰度为 u_1 ,图像的总平均灰度为 u ,目标和背景图像的方差为 g 。当 g 最大时,目标和背景差异最大,此时的 T 就是最佳阈值^[13]。

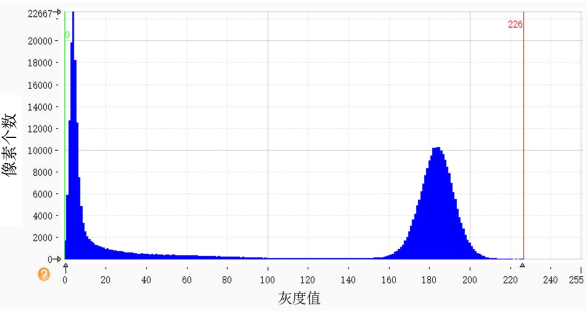


图 7 灰度直方图

Fig.7 Grayscale histogram

3.1.5 测量系统的标定

相机拍摄到的金刚石线图像以像素为单位。为了获得图像中金刚石线的实际尺寸,需要确定像素尺寸和长度尺寸之间的转化关系,这一过程称为相机标定。相机标定是确保精确性和稳定性的基础^[14-15]。选取一张已知直径 d 的金刚石线图像,以图像上下面中点作为目标点,获取两个目标点的具体坐标后,可以计算出两个点之间所占像素点的个数 n ,从而得到转化系数 k 的计算公式:

$$k=\frac{d}{n} \quad (7)$$

3.2 金刚石线特征提取

目标图像经过预处理后,按照金刚石线区域的二值图像进行特征提取,并根据这些特征完成

对缺陷的分类识别。针对金刚石线的6种主要缺陷,本研究选择颗粒的总面积、金刚石线外径、直径上限长度、去除颗粒后的平均直径、颗粒之间的最大距离以及金刚石线上最大颗粒的面积作为描述缺陷特征的依据。现以实际长度为5 mm的金刚石线图像为例进行特征提取,如图8所示。

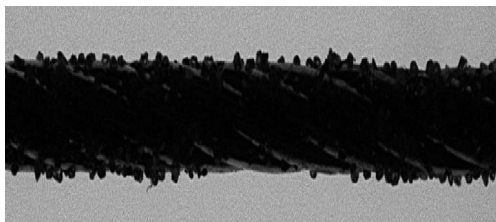


图8 原始图像

Fig.8 Original image

3.2.1 去除颗粒后的平均直径

在预处理阶段,通过对金刚石图像进行裁剪、校正、增强和二值化处理,实现了金刚石线区域的精准提取,如图9所示。



图9 预处理后的图像

Fig.9 Pre-processed image

要计算去除颗粒后的平均直径,需要引入数学形态学中的开运算来清除颗粒区域,从而得到去除颗粒后的区域,效果如图10所示,其中开运算公式为:

$$A \circ S = (A \ominus S) \oplus S \quad (8)$$

式中, $\ominus$ 和 $\oplus$ 分别表示腐蚀和膨胀。

将去除颗粒后的区域中按横向0.2 mm的范围生成一个小矩形,记录每个小矩形内的区域高度并相加。通过将结果除以小矩形的数量,即可得到去除颗粒后的平均直径。计算公式如(9)所示。图11展示了求取平均直径的示意图。

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (9)$$

式中, F 为去除颗粒后的平均直径; h 为小矩形内区域的高度; n 为小矩形的个数。

3.2.2 颗粒的总面积

通过开运算,将经过阈值分割后金刚石线区域减去去除颗粒后的区域以获取仅含颗粒区域。



图10 去除颗粒后的区域

Fig.10 Area after particle removal



图11 求取平均直径

Fig.11 Average diameter calculation

图12为仅包含颗粒区域的图像。

上下面颗粒总面积的检测主要是对颗粒所占像素点的个数进行相加,可以用式(10)表示。

$$S = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x, y) \quad (10)$$

其中, M 为与纵轴平行方向像素数量, N 为与纵轴垂直方向的像素数量,统计颗粒区域中 $f(x, y) = 1$ 的像素个数。

假设需要统计一张图像中 I 个区域的面积 A ,那么 A 的表达如式(11)。

$$A = \sum_{j=1}^I S_j \quad (11)$$

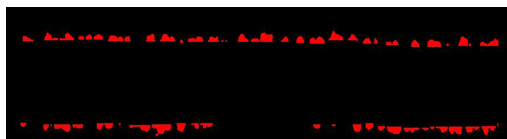


图12 颗粒区域的图像

Fig.12 Image of the particle area

3.2.3 金刚石线外径

在外径测量中,通过计算图像中目标区域最上面像素点到最下面像素点的距离来确定直径。金刚石线的最大外径测量则通过计算金刚石线区域最上面像素点到最下面像素点的距离来获取。相应地,最小外径的计算是按横向0.2 mm范围内生成小矩形,统计每个小矩形内区域的高度,并将获得的高度的最小值作为最小直径,可以用式(12)表示。图13展示了求取金刚石线最小外径的示意图。

$$d_{\min} = \min(f(h)) \quad (12)$$

式中, h 表示区域的高度, $d_{\min}$ 表示金刚石线最小外径。

3.2.4 直径上限长度

对于直径上限长度的计算,首先需要提取图

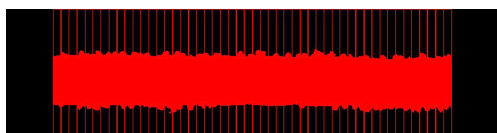


图 13 求取金刚石线最小外径

Fig.13 Calculation of minimum outer diameter of diamond wire

像中外径高于设定值或小于设定值的区域。然后,将提取出的区域压缩成一条线,最终通过计算直线的长度得到直径上限长度。具体做法是将提取出来的区域以各自的原点为缩放的基点,保持区域的宽度不变,将高度缩小为原来的 0.000 01 倍。这样,上边缘和下边缘就可以合并,区域就会被压缩成一条直线,可以用式 (13) (14) 表示。

$$H = 0.000\ 01h \quad (13)$$

$$L = \sum_{i=1}^n l_i \quad (14)$$

式中, L 为所求的直线长度, l 为压缩完成后每一块小区域的长度, n 为压缩完成后小区域的个数。 H 为被压缩区域的高度, h 为未被压缩的区域高度。

图 14 展示了小于设定值的区域和所求的直线。



图 14 小于设定值的区域和直线

Fig.14 Areas and lines smaller than the set value

3.2.5 颗粒之间的最大距离

在颗粒总面积的计算中,颗粒区域已被有效地分离。下一步的任务是获取每个颗粒的最左边像素点和最右边像素点的纵坐标,然后在两个颗粒之间生成一个矩形。通过统计矩形的长度,可以确定颗粒之间的最大距离,可以用式 (15) 表示。图 15 展示了计算颗粒之间最大距离的图像。

$$D_{\max} = \max(f(x_2 - x_1)) \quad (15)$$

式中, $D_{\max}$ 表示颗粒之间的最大距离, x_1 为前一块颗粒最右边像素点的纵坐标, x_2 为后一块颗粒最左边像素点的纵坐标。

3.2.6 金刚石线上最大颗粒的面积

最大颗粒的面积计算基于分离出的颗粒区域,要求颗粒是独立且不连通。该计算方法通过提取占据像素点数量最多的区域来实现,具体表达如式 (16)。

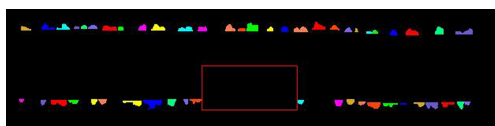


图 15 计算颗粒之间最大距离

Fig.15 Calculation of maximum distance between particles

$$S_{\max} = \max \left(\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x, y) \right) \quad (16)$$

式中, $S_{\max}$ 表示最大颗粒的面积。

3.3 缺陷识别

完成金刚石线的特征提取后,根据获取的特征进行缺陷识别。

3.3.1 偏厚的识别

“偏厚”是该金刚石线的主要缺陷之一,选择去除颗粒后的平均直径和颗粒的总面积作为偏厚的分类依据,具体特征表现为偏厚的平均直径过高和颗粒总面积不足。识别结果如图 16 所示。

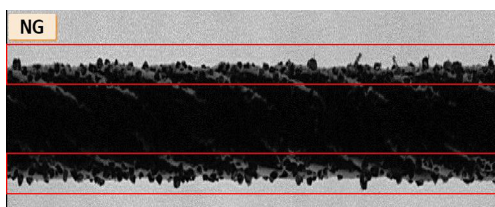


图 16 偏厚的识别结果

Fig.16 Recognition results of oversized film

3.3.2 偏薄的识别

对于“偏薄”的识别,同样是选用去除颗粒后的平均直径和颗粒的总面积作为偏薄分类依据。具体特征表现为包裹的平均直径过低和颗粒总面积过大。识别结果如图 17 所示。

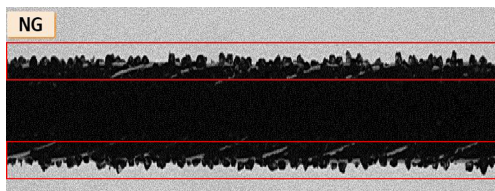


图 17 偏薄的识别结果

Fig.17 Recognition results of undersized film

3.3.3 线头的识别

在对“线头”的识别中,采用金刚石线外径和直径上限长度作为线头的分类依据。具体特征表现为线头的外径过大且达到直径上限长度。识别到的特征如图 18 所示,识别结果如图 19 所示。

3.3.4 剥离的识别

对于“剥离”的识别,选用金刚石线外径和直

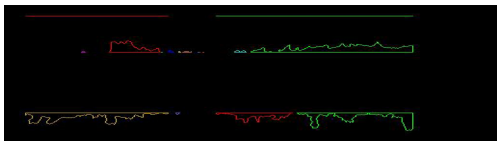


图 18 大于设定值的区域和直线

Fig.18 Areas and lines larger than the set value

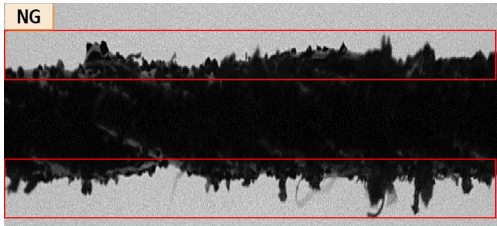


图 19 线头的识别结果

Fig.19 Recognition results of oversized diameter

径上限长度作为剥离的分类依据。具体特征表现为剥离的外径过小且达到直径上限长度。识别到的特征如图 20 所示,识别结果如图 21 所示。



图 20 小于设定值的区域和直线

Fig.20 Areas and lines smaller than the set value

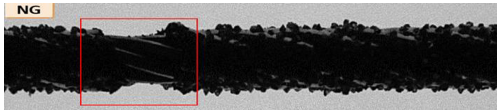


图 21 剥离的识别结果

Fig.21 Recognition results of stripping

3.3.5 杂质的识别

在对“杂质”的识别中,采用金刚石线上最大颗粒的面积作为杂质的分类依据。具体特征表现为最大颗粒的面积过大。识别结果如图 22 所示。

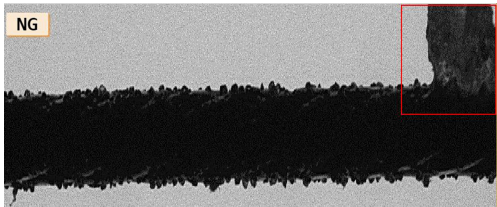


图 22 杂质的识别结果

Fig.22 Recognition results of impurity

3.3.6 分布的识别

在对“分布”的识别中,选用颗粒的总面积和

颗粒之间的最大距离作为分类依据。识别结果如图 23 所示,分布 a 具体特征表现为颗粒的总面积过小,分布 b 具体特征表现为颗粒之间的最大距离过大。

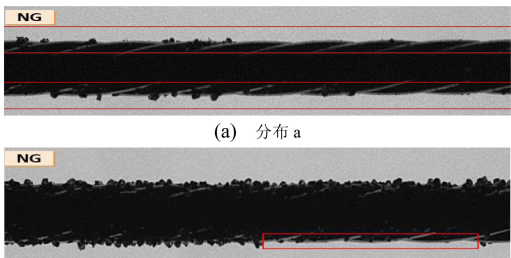


图 23 分布的识别结果

Fig.23 Recognition results of distribution

4 实验

实验所用平台为 win10,软件使用 Halcon 联合 Qt 进行设计。

4.1 金刚石线缺陷检测实验

为验证提出的算法在实际应用中的可行性,从工业生产线上随机采集了 50 000 张图片进行测试,并从 50 000 张图片中提取了不同缺陷类型,包括偏厚、偏薄、线头、剥离、杂质、分布以及正常金刚石线,分别为 129、83、106、110、132、122、130 张,总计 812 张图片。这些图片将用于评估算法的性能。统计结果如表 1 所示。从表 1 可以明显看出,所提算法对于金刚石线图像的识别率已经高达 98.8%。这表明所提算法在实际检测场景中取得了显著的成功,能够满足实际检测的要求。

表 1 缺陷图片检测结果

Tab.1 Defect sample detection results

缺陷	图片数/ 张	识别数/ 张	误检数/ 张	正确识别率/ %
偏厚	129	127	2	98.4
偏薄	83	83	0	100.0
线头	106	106	0	100.0
剥离	110	108	2	98.2
杂质	132	132	0	100.0
分布	122	118	4	96.7
正常	130	128	2	98.5
总计	812	802	10	98.8

4.2 检测方法比较

为了验证所提算法的有效性,根据当前基于机器视觉的金刚石线质量检测方式进行对比,结果如表 2 所示。

表 2 不同方法对比
Tab.2 Comparison of different methods

检测算法	图片数/张	正确识别率/%	单张图片检测时间/s
文献[6]	400	90	—
文献[7]	500	93.9	0.042
所提算法	812	98.8	0.038

根据表 2 的数据,所提采用背面照明方式的方法相较于文献[6]和文献[7]的方法,对图片的正确识别率分别提高了 8.8% 和 4.9%。同时,在检测时间方面,该方法也比文献[7]的方法耗时

更短。综上可以得出,所提出的方法更加符合企业实际检测需求。

5 结束语

针对当前金刚石线表面质量检测算法存在的不足,提出了一种新的金刚石线表面缺陷检测的方法。所提方法通过两个相机在垂直角度进行背光采图,获得金刚石线边缘信息。实验证明采用这种间接评估,而非直接正面取图的方法是有效的。此外,由于背光图像边缘清晰、易于提取,所提方法可以准确判别金刚石线的缺陷等级。与现有的检测算法相比,所提算法通过对金刚石线的形貌特征和几何特征进行检测,有效避免因颗粒堆积、遮挡、粘连等现象导致准确率降低的问题,检测准确率达 98.8%,检测时间为 0.038 s,具有较好的实际应用价值。在本课题中,金刚石线表面缺陷的检测与分类是分布执行的,后续将进一步设计算法实现缺陷检测与分类的一体化处理。。

参考文献:

[1] 高伟,张景涛,吴平,等. 电镀金刚石切割线的种类及制造工艺的研究概述[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2012,32(3):35-40,45.

[2] 高伟,窦百香,李艳红,等. 电镀金刚石线锯的制造工艺研究[J]. 工具技术,2009,43(7):56-59.

[3] 郭联金,朱日龙,杨国卿,等. 浅谈机器视觉技术在自动化制造业中的应用[J]. 机电一体化,2015,21(8):63-67.

[4] 张文晔. 基于机器视觉的金刚砂线颗粒检测技术的研究与应用[D]. 常州:江苏理工学院,2018.

[5] 刘明宇,佃松宜. 基于机器视觉的金刚线表面质量检测[J]. 四川大学学报(自然科学版),2020,57(5):920-926.

[6] 刘晓敏. 金刚石切割线质量视觉检测系统与应用研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2021.

[7] 黄叶祺,王明伟,闫瑞,等. 基于改进的 YOLOv5 金刚石线表面质量检测[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2023,41(4):123-134.

[8] 赵玉康,毕文波,葛培琪. 电镀金刚石线锯表面磨粒分布密度的多相机视觉检测[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2021,41(2):64-68.

[9] AMEUR M,HABBA M,JABRANE Y. A comparative study of nature inspired optimization algorithms on multilevel thresholding image segmentation[J]. Multimedia Tools and Applications,2019,78(24):34353-34372.

[10] 阳天舒,李梅,信荟敏,等. 基于形态学的自适应阈值分割算法[J]. 电子设计工程,2015,23(13):102-104.

[11] 王序哲. 局部自适应二值化方法研究[J]. 软件导刊,2011,10(11):13-14.

[12] 刘超,蔡文华,陆玲. 图像阈值法分割综述[J]. 电脑知识与技术,2015,11(1):140-142,145.

[13] 王磊,段会川. Otsu 方法在多阈值图像分割中的应用[J]. 计算机工程与设计,2008,29(11):2844-2845,2972.

[14] 杨博文,张丽艳,叶南,等. 面向大视场视觉测量的摄像机标定技术[J]. 光学学报,2012,32(9):166-174.

[15] 郑冬,冯鹏,龙邹荣,等. 面向多因素工况下的相机标定精度综述[J]. 国外电子测量技术,2020,39(8):109-116.

(责任编辑:方素华)