

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108082

基于机器视觉的圆柱形蜂窝陶瓷侧面裂隙检测*

毛卫平 高伟 顾寄南 雷文桐 胡君杰 方新领

(江苏大学机械工程学院 镇江 212013)

摘要: 针对圆柱形蜂窝陶瓷侧面裂隙检测困难问题,提出一种基于机器视觉的检测方法。通过对侧面裂隙检测需求分析,选用 COMS 相机和 LED 白色平行光源。对采集的图像进行滤波处理,选择中值滤波去除椒盐噪声。根据图像的特点选择 ROI 区域,使用全局阈值分割算子 threshold 进行图像分割,采用膨胀方法连接断裂区域。在提取表面缺陷时,先用 connection 算子对图像区域分割,再选择面积、长度和宽度 3 个特征对表面缺陷进行提取。将本检测方法与人工检测方法比较分析,试验结果表明在检测样品均为 50 个时,本方法检测合格、不合格和混合样品所需时间分别为 12.50、6.64 和 10.58 min,具有更高检测速度,实时性更好;准确率分别为 96%、84% 和 90%,准确率还有待提升,需要进一步的研究。

关键词: 机器视觉;圆柱形蜂窝陶瓷;图像处理;侧面裂隙;缺陷检测

中图分类号: TP391.4;TQ174.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.99

Side crack detection of cylindrical honeycomb ceramics based on machine vision

Mao Weiping Gao Wei Gu Jinan Lei Wentong Hu Junjie Fang Xinling

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of side crack detection of cylindrical honeycomb ceramics, a detection method based on machine vision is proposed. Through the demand analysis of side crack detection, COMS camera and LED white parallel light source are selected. The collected image is filtered, and the median filter is selected to remove salt and pepper noise. According to the characteristics of the image, the ROI region is selected, the global threshold segmentation operator threshold is used for image segmentation, and the expansion method is used to connect the fracture region. When extracting surface defects, the connection operator is used to segment the image region, and then three features of area, length and width are selected to extract surface defects. The test results show that when there are 50 samples, the time required for qualified, unqualified and mixed samples by this method is 12.50, 6.64 and 10.58 min respectively, which has higher detection speed and better real-time performance. The accuracy rates are 96%, 84% and 90% respectively. The accuracy rate needs to be improved and needs further research.

Keywords: machine vision; cylindrical honeycomb ceramics; image processing; side cracks; defect detection

0 引言

圆柱形蜂窝陶瓷是三元催化器的重要载体,在烧制成型过程中因为受热受力不均匀等原因,其表面会产生各种不规则的缺陷,进而影响到车辆尾气的处理质量。经调查发现国外的蜂窝陶瓷公司具有先进的制造技术,尤其是美国 Corning 和日本 NGK 两家公司长期以来垄断着全球市场^[1],他们从生产的源头就直接降低了产品出现缺陷的概率。而国内因为模具设计、生产技术和工人水平相对

落后,所以在每批产品出厂之前都需要对其表面缺陷进行检测。文献[2]中提出一种基于机器视觉的蜂窝陶瓷尺寸测量自动检测系统,通过 OTSU 法阈值分割,并在亚像素精度上进行尺寸测量,检测的精度较高,能够代替人工检测。文献[3]中提出了一种基于机器学习的蜂窝陶瓷的缺陷的检测方法,通过领域加权法、区域生长法和面积特征选择实现对缺陷的判定,但是该方法只实现了侧面划痕和凹陷的检测,并且在划痕检测时存在面积阈值设定问题,检测效果不好。文献[4]中研究出一种三元催化器蜂窝陶瓷

收稿日期:2021-10-13

* 基金项目:国家自然科学基金(51875266)项目资助

质量的视觉检测系统,实现了圆柱形蜂窝陶瓷的外观直径测量和通孔数目的计算,但是因为系统采集图像多,采用多种算法处理会使图像失真,产生检测误差。文献[5]中提出了一种基于激光扫描成像技术的蜂窝陶瓷致密性与纹理特征检测方法,实现对蜂窝陶瓷的质量检测,但是该方法只是通过仿真得出了较好的检测结果,没有进行实际的工业验证;文献[6]中设计出了一种蜂窝陶瓷的通孔和表面缺陷检测设备,通过光源和相机的配合能够满足多种缺陷检测。

但是,目前对于圆柱形蜂窝陶瓷侧面裂隙检测尚未有针对性研究,还是依靠传统人工检测方式。这种方法对工人健康危害大,检测准确性和效率不高、实时性较差,不利于自动化生产^[7]。由于圆柱形蜂窝陶瓷侧面裂隙很细微,裂隙的宽度往往小于 0.25 mm,这让人工检测更加的困难,受工人主观因素影响,容易出现误检漏检的情况。而基于机器视觉缺陷检测技术具有检测效率高、精度高、劳动强度低及客观性优点,易于自动化、智能化制造。

通过以上的现状分析,本文提出基于机器视觉的检测方法,将图像采集系统、图像处理软件、PLC 控制模块和机械执行机构联动成一个整体。首先以黑白 COMS 相机采集图像,避免 RGB 图像转灰度图的过程,采用中值滤波方式降低图像在传输过程中所产生椒盐噪声的干扰,然后通过选择合适 ROI 区域,避免背景对前景的影响,使用阈值分割、形态学分析和特征提取方式将缺陷快速检测出来,最后通过与人工检测数据进行对比分析,验证本文方法的可行性。

1 检测流程设计

本文设计的缺陷检测平台主要由图像采集和图像处理两个模块组成。通过硬件系统实现图像采集功能,通过软件系统实现图像处理功能^[8],其主要检测的流程如图 1 所示。

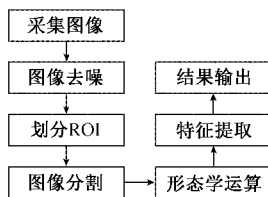


图 1 缺陷检测流程

2 视觉检测平台设计

本缺陷检测平台主要包括工业相机、光源、镜头、图像处理软件、机械执行机构等部分。

2.1 相机

按照感光芯片类型分类,一般实际常用的工业相机可分为 CCD (charge coupled device) 相机和 CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 相机^[9]。这两种相机都是通过光电二极管将接收到的光信号转变为电信号,它们所用到的芯片种类不相同,CCD 相机工艺要求较

为复杂且与 CMOS 相机比较集成度低,相机的成本较高,故本系统采用 CMOS 相机作为图片采集器件。

2.2 镜头

镜头利用聚焦光线在光敏元件上产生图像,为了采集到清晰的图像,镜头的选择尤为重要。根据确定的相机的具体型号之后,选择与之相匹配的镜头^[10]。在本设计的检测系统中,选用镜头像面尺寸为 1/1.8" 系列镜头即可满足视野的要求,为了尽可能的使检测对象在所采集到的画面占比成像大,背景虚幻,图片更加清晰,选择型号为 MVL-HF2528M-6MPE25mm 的镜头。

2.3 光源

光源是突显区域特征,减少其他区域的对检测的影响,针对侧面裂隙比较细小,在打光过程中可能会因为光源的漫射现象使采集的图像边缘模糊,本文采用 LED 白色平行光源进行打光,LED 具有能耗低,使用寿命长,稳定性和安全性高等特点^[11]。

2.4 检测样机

本文系统的检测样机主要由如图 2 所示的图像采集单元和执行机构,如图 3 所示的 CPU 与 PLC 控制模块组成,其中执行机构包括平移导轨与夹持旋转机构。为了更加突出打光效果,只用环形光圈的 1/6 部分进行打光,其余部分将光源遮挡。当控制单元接受到指令信号时,陶瓷将会被夹持旋转机构通过平移导轨输送到指定位置并匀速转动,此时 CMOS 相机在光源的打光的条件下进行拍照,实现检测,当检测到裂隙时则自动退出,若是无缺陷样品,则旋转 360° 后再自动退出。

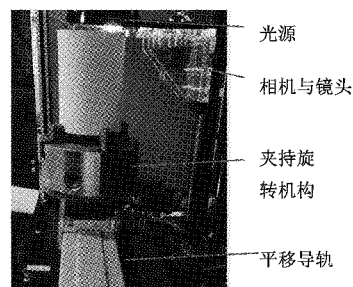


图 2 图像采集系统和执行机构

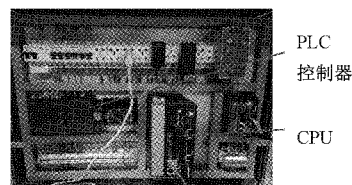


图 3 CPU 与 PLC 控制模块

3 图像处理

本文系统采用黑白相机采集图像,这样可避免后面将 RGB 图像转成灰度的图像,降低计算量,减少图像处理时

间^[12],这里选取规格为 118.4 mm×152 mm 的圆柱形蜂窝陶瓷为例,其侧面裂隙如图 4 所示,通过相机采集到的图像如图 5 所示。

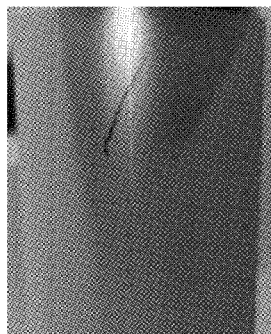


图 4 侧面裂隙

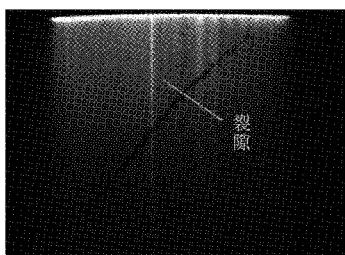


图 5 采集的图像

3.1 图像去噪

在图像采集和实时的传送过程中由于受到传感器、传输信道、解码处理等影响,图片上会出现随机噪声,这些噪声以椒盐噪声为主,为了提高图像处理的精度,降低处理难度,需要对图像中椒盐噪声进行处理。

目前常用到的具有代表性的去噪滤波方法有均值滤波、中值滤波、高斯滤波等滤波方法^[13]。为了突出去噪前后的对比效果,向采集的灰度图像中加入方差为 0.08 的椒盐噪声,结果如图 6 所示。分别使用均值滤波、3×3 滤波窗口的中值滤波、标准差为 0.4 的高斯滤波 3 种方式对采集的图像进行处理^[14],如图 7~9 所示,可以看出中值滤波去除椒盐噪声的效果最好,所以选择中值滤波消除可能出现的椒盐噪声对检测的干扰。中值滤波器是一种非线性的滤波器^[13],其原理如式(1)所示。

$$G(x, y) = \text{Med}_u\{g(x, y)\} \quad (1)$$

式中:用 (x, y) 表示像素点坐标, x, y 为图像中的像素点坐标参数,以该点为中心的邻域内的所有像素的统计排序中值作为 (x, y) 点的响应, $g(x, y)$ 为图像像素矩阵中一个点像素灰度值,其邻域 H 为以该点像素为中心的子矩阵, $G(x, y)$ 为滤波输出。

3.2 划分 ROI 区域

采集的原始图像上不是所有的区域都是有效区域,为了避免背景的对前景的干扰,需进一步确定 ROI(region of interest)作为分析的重点。由于图像采集装置位置相对固

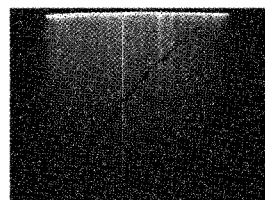


图 6 加入椒盐噪声

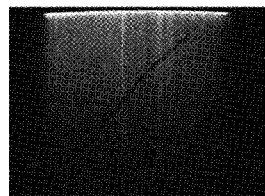


图 7 均值滤波

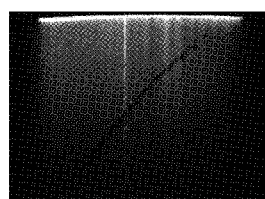


图 8 中值滤波

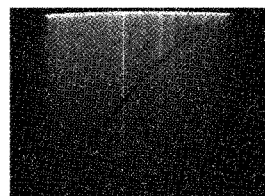


图 9 高斯滤波

定不变,这能够避免 ROI 位置变动所产生的影响,图 10 为生成的 ROI 的对象。

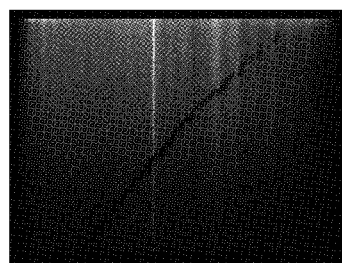


图 10 ROI 区域

3.3 图像分割

图像分割就是从图像中提出感兴趣特征的过程,是图像处理分析的重要环节,目前应用最多的是阈值分割算法,其具有直观且易于实现的特点,在图像分割中占有重要的地位^[16]。其原理就是通过选择特定的阈值把图像中具有特殊含义的不同区域分开,每个区域都满足特点区域的一致性。本文采用的是基于全局阈值分割的方法,采用

threshold 算子,通过设定合适的阈值范围进行图像分割。

设定初始图像为 $f(x,y)$, 根据特定的规则在初始图像 $f(x,y)$ 中找到合适的灰度值作为阈值 t , 则进行分割后的图像 $F(x,y)$ 的结果如式(2)所示。

$$F(x,y) = \begin{cases} b_0, & f(x,y) < t \\ b_1, & f(x,y) \geq t \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f(x,y)$ 为初始图像, $F(x,y)$ 为分割后图像, t 为阈值, (x,y) 为像素点坐标, b_0, b_1 都为图像的灰度值, 当 b_0 取 0, b_1 取 1 时, b_0 表示黑色, b_1 表示白色。

由式(2)可以看出, 阈值分割的核心在于确定阈值 t , 当输入图像小于阈值时判定输出的图像为背景元素, 当输入的图像大于或者等于阈值时则判为检测对象的图像。阈值 t 的大小将直接影响图像分割的效果, 常用的阈值的选择方法主要有最小误差法、OTSU 法和人为赋值法等。前两种阈值选择方法的效果如图 11 和 12 所示, 由图可以看出这两种方法分割出的效果较差, 所以不采用这两类分割方法。

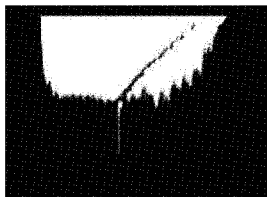


图 11 最小误差法

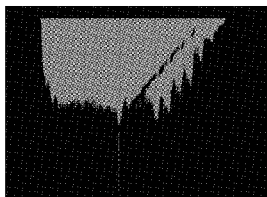


图 12 OTSU 法

考虑到当圆柱形蜂窝陶瓷侧面存在裂隙时该缺陷部分的透光性要比其他部分更强, 在采集的图片上面表现为一条较为明亮的线条, 其相应的灰度值也就更大, 该细长裂隙缺陷特征具有很强的稳定性和特殊性。通过 150 张裂隙缺陷图的试验分析, 直接选取阈值为 220~255 的范围能够将图像进行有效的分割, 结果如图 13 所示。可以看出基于全局阈值分割的方法能够准确的分割出目标与背景, 有利于后续的检测。

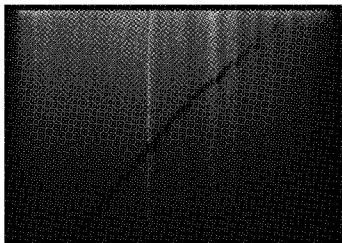


图 13 图像分割图

3.4 形态学运算

考虑到经过阈值分割后的图像可能存在断裂的区域, 对于这部分区域采用形态学方法进行有效区域的覆盖。形态学处理方法包括膨胀、腐蚀和开运算和闭运算^[17]。本文采用的是膨胀方法, 其原理如式(3)所示。

$$A \oplus B = \{X \mid (\hat{B})_k \cap A \subseteq A\} \quad (3)$$

式中: A 为目标图像, B 和 \hat{B} 均为结构元素, \oplus 为膨胀运算的运算符, $A \oplus B$ 表示 B 对 A 的膨胀, X 表示膨胀运算结果的集合, k 表示集合平移的位移量^[18]。使用 B 做关于其原点的反射得到反射集合, 将 \hat{B} 在 A 中平移 k , 当 $\hat{B} \cap A \neq \emptyset$ 时, 标记 \hat{B} 的原点所在位置, 那么 A 中所有标记为灰色的像素的集合即为膨胀运算结果^[19]。图 14 为膨胀算法的效果模拟图, 其中图像目标元素模拟图如图 14(a)所示, 结构元素模拟图如图 14(b)所示, 结果模拟图如图 14(c)所示。从图可以看出膨胀运算能够填充空洞、连接区域, 起到将放大图像的作用。

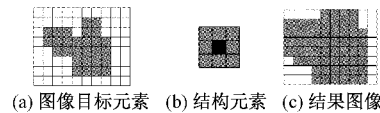


图 14 膨胀算法的效果模拟图

经过膨胀后如图 15 所示, 断裂区域被填充连接起来, 为后续的图像内各区域分割和特征提取做了准备。

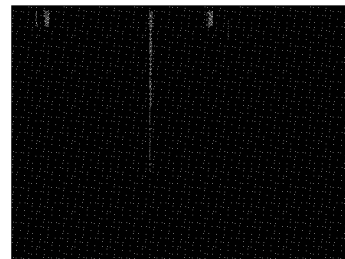


图 15 膨胀处理

3.5 缺陷特征提取

经过图像分割和形态学运算后所选择出的区域是一个整体, 先用 connection 算子将区域分割成不同的区域, 如图 16 所示。

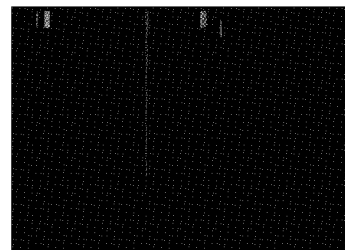


图 16 区域分割

图像特征描述的是图像某种属性, 使用特征作为判断和选择的依据能够有效的提出去目标。本文选择区域的面

积和最小外接矩形的长度和宽度作为特征进行缺陷提取。

计算目标区域面积有两种方法,一种是计算目标区域中的像素点个数,其原理如式(4)所示。

$$S = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} t(x, y) \quad (4)$$

式中:阈值化后二值图像 $t(x, y)$ 为 $M \times N$ 的二维矩阵, M, N 分别为矩阵的行和列,目标区域 $t(x, y) = 1$, 背景区域 $t(x, y) = 0$, S 为目标区域面积^[20]。

另一种是计算目标区域边界曲线的积分,在二维平面中面积计算的方式如式(5)所示。

$$S = \frac{1}{2} \oint (x dy - y dx) \quad (5)$$

其离散化结果如式(6)所示。

$$S = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^L [x_n(y_{n+1} - y_n) - y_n(x_{n+1} - x_n)] =$$

$$\frac{1}{2} \sum_{n=1}^L [x_n y_{n+1} - x_{n+1} y_n] \quad (6)$$

式中: L 为边界点总数目; n 为点的计数; x_n, y_n 为第 n 个点的横纵坐标; x_{n+1}, y_{n+1} 为第 $n+1$ 个点的横纵坐标。为了便于计算,这里选用第1种统计区域的像素数量的方式来计算面积特征。

由于目标区域的边界已知,可直接用最小外接矩形描述尺寸,计算区域的边界的最大值和最小值即可得到区域的长度和宽度,最小外接矩形的长和宽分别为 a 和 b ,如图17所示。最终缺陷特征提取结果,如图18所示。

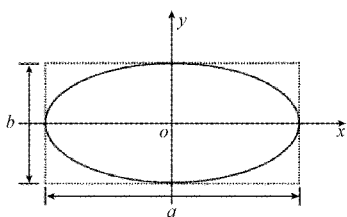


图17 最小外接矩形

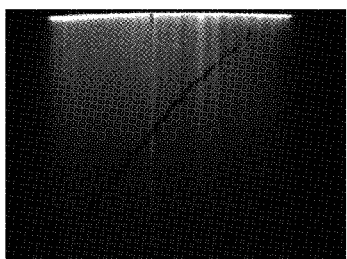


图18 裂隙特征提取结果

4 试验结果分析

由于圆柱形蜂窝陶瓷外观尺寸不同,这里选取规格为 $118.4 \text{ mm} \times 152 \text{ mm}$ 的圆柱形蜂窝陶瓷作为样本进行重复试验以验证检测方法的可行性。设置旋转机构转速为 15 s/圈 , 相机拍摄频率为 1 张/s 。规定打光方式、相机拍

摄条件,阈值选取,样品放入检测样机方式都相同的情况下进行试验。

将合格样品和不合格样品分类检测,再取部分样品混合检测,3类样品的总数均为50个,其中取30个合格样品和20个不合格样品混合。虽然样品有两个端面,为了便于试验,只用固定端面方向进行检测。为了定量分析检测方法性能,采用本文方法和传统人工检测方法,以圆柱形蜂窝陶瓷检测的准确率和检测时间等参量为测试指标。合格样品、不合格样品和混合样品的试验结果如表1~3所示。

表1 合格样品试验统计结果

方法	数量	准确率/%	时间/min
人工	50	98	20.27
本文方法	50	96	12.50

表2 不合格样品试验统计结果

方法	数量	准确率/%	时间/min
人工	50	96	11.91
本文方法	50	84	6.64

表3 混合样品试验统计结果

方法	数量	准确率/%	时间/min
人工	50	96	16.71
本文方法	50	90	10.58

从试验统计结果可以看出采用机器视觉检测所用时间更少,说明实时性更好,更能满足实时检测需求。机器视觉检测的重复性效果较好,尤其是在检测合格样品时,其准确率较高。但是在检测不合格样品和混合样品时本文方法准确率都比人工检测低,其中在检测混合样品时误判率主要是不合格品误判造成的,误判的主要原因与设定的初始阈值有关,如果缺陷表现的灰度不在设定的初始阈值范围之内就很容易产生误判,另外就是由于圆柱形蜂窝陶瓷外观圆度不完全标准,在打光过程中会存在漏光现象,采集图像质量会发生略微变化,也会使误判产生,所以阈值设定和图像采集方面需要进一步研究以提高检测的准确率。

5 结 论

针对圆柱形蜂窝陶瓷侧面裂隙检测困难问题,提出了一种基于机器视觉的检测方法,将PLC控制模块、机械执行机构、图像采集系统和图像处理系统联动成一个整体。选用黑白COMS相机采集图像,避免了RGB图像转灰度图的过程,减少图像处理的时间。用中值滤波去除椒盐噪声,减少图像因在传输过程中所产生噪声的干扰。通过选择合适ROI区域,有效地避免背景对前景的影响,提高图片处理效率。最后通过阈值分割、形态学分析和特征提取方式将侧面裂隙快速检测出来。试验结果表明本检测方法

比人工检测方法用时少,实时性更好,更能满足实时检测的需求。但是检测准确性比人工检测低,在以后的研究工作中需要从阈值设定和图像采集等方面进一步研究,以获得更高的检测准确率。本文提出的基于机器视觉的检测方法为实现圆柱形蜂窝陶瓷侧面裂隙非接触式在线实时检测奠定了基础,具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 郝立苗,黄妃慧,王勇伟,等. 蜂窝陶瓷的研究现状及应用[J]. 佛山陶瓷,2021,31(6):32-39.
- [2] LI Y, ZHOU B, SUN H L. Research and development of honeycomb ceramics' on-line automatic checkout system based on machine vision [J]. 2nd International Conference on Measurement, Information and Control, Harbin, 2013: 16-18.
- [3] 戴卫军. 基于机器视觉的蜂窝陶瓷侧面缺陷检测算法研究[J]. 陶瓷学报,2014,35(3):291-295.
- [4] 李智. 三元催化剂蜂窝陶瓷载体质量的视觉检测系统研究[D]. 赣州:江西理工大学,2015.
- [5] 李颖,周博文. 激光技术在蜂窝陶瓷在线检测的研究[J]. 激光杂志,2016,37(9):51-55.
- [6] 李红兵,丁豪,秦可勇,等. 一种蜂窝陶瓷载体的通孔和表面缺陷检测设备:CN213715088U[P]. 2021-07-16.
- [7] 谢珩,汪成龙,黄振雄,等. 基于 LabVIEW 的五金件尺寸检测方法[J]. 电子测量技术,2019,42(24):152-156.
- [8] 洪专婷. 基于机器视觉的 FPC 缺陷检测的方法研究及其系统实现[D]. 成都:电子科技大学,2019.
- [9] 石野. 基于机器视觉的螺纹钢管尺寸检测算法研究[D]. 太原:山西大学,2020.
- [10] 逯圣辉. 基于机器视觉的带式输送机动态煤量计量研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2020.
- [11] 谢俊,李玉萍,左飞飞,等. 基于机器视觉的孔类零件尺寸在线检测[J]. 电子测量技术,2021,44(2):93-98.
- [12] 魏利胜,丁坤,段志达. 基于高斯加权均值分割的轴承工件检测和定位研究[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(10):118-127.
- [13] 苑玮琦,薛丹. 基于机器视觉的隧道衬砌裂缝检测算法综述[J]. 仪器仪表学报,2017,38(12):3100-3111.
- [14] 汪沛,王岩飞,张冰尘,等. 基于局部条纹频率估计的二维高斯滤波方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2007(10):868-871.
- [15] 仲志远. 一种基于图像识别的水位测量算法[J]. 国外电子测量技术,2017,36(6):96-99.
- [16] 张铮,倪红霞,苑春苗,等. 精通 Matlab 数字图像处理与识别[M]. 北京:人民邮电出版社,2013.
- [17] 王福忠,尹凯凯. 一种基于中值滤波的局部阈值分割算法[J]. 电子测量技术,2017,40(4):162-166.
- [18] 程建豪. 基于机器视觉的开幅机中织物经线偏移检测方法研究[D]. 太原:中北大学,2015.
- [19] 李畅. 基于机器视觉的车速传感器线束与焊点检测平台的设计与研究[D]. 镇江:江苏大学,2020.
- [20] 孙亚根. 基于机器视觉的电容屏缺陷识别方法研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.

作者简介

毛卫平,工学博士,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为机器视觉、运动控制。

E-mail: 13852986428@139.com

高伟(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为机器视觉。

E-mail: 15195381929@163.com