

基于 SocFPGA 工件表面缺陷快速检测研究^{*}

翟浩然 南钢洋 白雪

(齐鲁工业大学(山东省科学院激光研究所) 济南 250100)

摘要: 针对当前工件检测中,工件表面缺陷检测存在处理速度慢的问题,设计出一种具有高速互联总线的 SocFPGA 架构解决方案。首先将图像数据灰度化、中值滤波、自适应阈值分割以及形态学操作,消除图像中的污损部分,凸显缺陷像素。其次,利用像素阈值算法与投票算法,标注了图像表面缺陷位置。最后,采用铜板试样并结合 OV5640 摄像头,搭建了一套工件表面缺陷检测系统。测试表明,当缺陷直径不小于 0.5 mm,缺陷检出率约为 90.24%,处理 1 帧图像的时间约为 0.62 μ s,实现了工件表面缺陷图像的实时在线检测,为该领域研究提供一定的参考。

关键词: FPGA;缺陷检测;图像处理;像素阈值算法

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Research on rapid surface defect detection for workpiece
based on SocFPGA

Zhai Haoran Nan Gangyang Bai Xue

(Qilu University of Technology (Laser Institute, Shandong Academy of Sciences), Jinan 250100, China)

Abstract: In response to the current industrial field, a SocFPGA architecture solution with high-speed interconnect bus is proposed to address the problem of slow processing speed in surface defect detection in current workpiece inspection. Firstly, to remove defects in the image and highlight the defective pixels, the image data is processed by grayscale, median filtering, adaptive threshold segmentation and morphological filtering. Secondly, the pixel threshold algorithm and voting algorithm were used to label the locations of surface defects in the image. Finally, a surface defect detection system for workpieces was built using copper plate samples and OV5640 cameras. Experiments show that when the defect diameter is not less than 0.5 mm, defect detection rate is about 90.24%, and the processing time per frame is about 0.62 μ s. It realizes the real-time online detection of workpiece surface defect image, which provides a certain reference for the research in this field.

Keywords: FPGA;defect detection;image processing;pixel threshold algorithm

0 引言

随着信息化和工业化水平的高速发展,视频图像采集与处理技术在工业领域应用越来越广泛^[1],这一趋势在工件表面质量检测领域得到体现。目前,基于图像处理的机器视觉技术对工件表面缺陷进行的检测,通常通过光学成像系统采集加工工件表面图像,并对图像进一步分析,从而实现工件表面缺陷进行检测。

在国外,部分较发达的国家使用自动化产品缺陷检测技术对表面缺陷进行检测。Chang 等^[2]克服了 Otsu 算法计算量大、实时性差的特点,提高了图像特征点匹配的性

能。Gullu^[3]对使用图像分类模型比较基于声信号的感应电机,判断当前缺陷所在。Guo 等^[4]通过改进检测算法对制动盘的缺陷进行检测,大大提高检测准确率。近些年来,不少国内学者也对数字图像处理算法进行深入研究,并且在此基础上改进、推演许多缺陷检测算法,均取得较大的发展^[5-7]。黄烁等^[8]以某光纤通讯企业的光纤端帽检测设备为研究对象,根据光纤端帽的不同缺陷设计了对应的缺陷检测算法。于子涵等^[9]以高分辨率红外图像目标检测算法获取图像,并基于 FPGA 平台进行硬件移植验证与测试,但由于对图像处理采用卷积滤波处理,导致硬件资源占用率较高,如 BRAM 占用率高达 80%,导致 FPGA 内部资源

适配及时序收敛较为困难,需要对算法加以改进。李笑笑^[10]讨论了基于 FPGA 的双目视觉障碍物检测系统,并实现了双目图像采集、缓存和显示等功能,为后续匹配算法的实际应用提供基础,但在处理部分区域以及算法的硬件加速方面仍需改进。

目前工件表面缺陷检测研究的数据处理和分析大多由软件实现,对于实时性要求高的应用往往得不到满足。针对基于 FPGA 的缺陷检测方案采用的算法导致资源占用过多,或者检测时间过长的问题,本研究以 SocFPGA 为平台,充分利用 FPGA 的高速并行计算优势,提高了图像预处理的速度,为工件表面缺陷检测提供了一种思路。

1 基本原理

1.1 灰度化

图像灰度化是将彩色图像转换为灰度图像的过程,其本质是将三维矩阵转为二维矩阵,将原本 RGB 三色转化为单一灰度值^[11],该操作可以简化图像数据,使图像更易于处理和分析。图像灰度化公式如下:

$$Y = 0.299R + 0.567G + 0.144B \quad (1)$$

式中:Y 为图像的灰度值,R、G 和 B 为图像在红色、绿色和蓝色的亮度。

1.2 中值滤波

中值滤波是将每一个像素及其邻域 8 个像素作为滤波模板。首先计算在当前滤波模板中,所有元素像素值的平均值,并用该平均值取代当前滤波模板中心位置的像素值^[12]。中值滤波的数学表达式如下:

$$\begin{cases} f(x, y) = \text{sort}(I(x+i, y+i), n) \\ -r \leq i \leq r \\ -r \leq j \leq r \\ n = (2r+1)^2/2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I(x, y)$ 为输入像素值, $f(x, y)$ 为输出像素值, r 为滤波模板半径, sort 为对滤波模板内的像素值进行排序运算, n 表示排序结果的第 n 个值。

1.3 局部自适应阈值分割

局部自适应阈值分割会对图像每个小部分设置不同的阈值来分割缺陷和背景,该算法的核心在于求取滤波阈值大小^[13]。首先计算出图片灰度值的两个峰值,分别为缺陷像素和背景像素,并通过方差计算两个峰值之间的阈值,使二者之间离散的程度达到最大值。其方差定义如下:

$$\delta^2 = \frac{1}{(2\gamma+1)^2} \sum_{i=-\gamma}^{\gamma} \sum_{j=-\gamma}^{\gamma} [I(x+i, y+j) - u]^2 \quad (3)$$

式中: δ 为方差, γ 表示处理窗口的半径,本研究为 5, $I(x, y)$ 为输入坐标为 x 和 y 的像素值, u 表示整幅图像像素灰度的平均值。

1.4 形态学操作

形态学基本操作分为腐蚀、膨胀、开运算和闭运算^[14]。腐蚀操作可以分割独立的像素,膨胀操作可以连接独立的

像素。腐蚀操作流程如下:

1) 将图像数据每行的像素值相加,判断结果是否等于 255 的 3 倍,如相等,则每行的行标志位设定为 1。

2) 将图像数据每行的行标志位相加,如为 3,则该像素点的值为 255,反之为 0。

膨胀操作为腐蚀的反操作,不再赘述^[15]。本模块采用闭运算,即先膨胀后腐蚀的方法,此操作为了去除孔洞,对物体边界进行平滑,避免出现大量噪声,影响缺陷检测算法的准确率。

2 系统架构

本研究系统架构如图 1 所示,由 SocFPGA、CMOS 摄像头、LCD 显示屏、DDR 存储器等组成,其中 SocFPGA 由 PL(programmable logic)和 PS(processing system)及内部 AXI 总线构成。

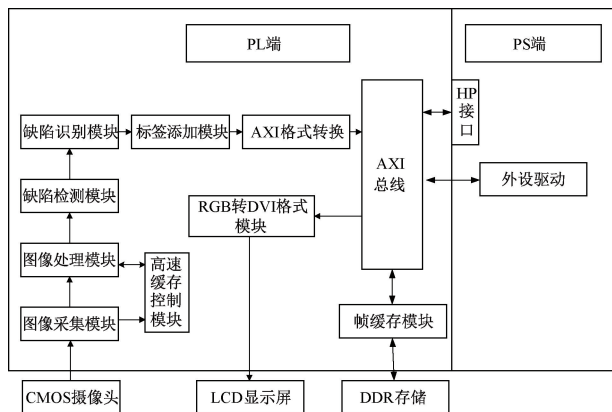


图 1 工件表面缺陷检测架构

Fig. 1 Surface defect detection architecture for workpieces

首先 CMOS 摄像头在将光信号转为电信号后,将数据发给图像采集模块,图像采集模块将图像数据转发给高速缓存控制模块和图像处理模块,其中高速缓存控制模块是将实时图像数据进行高速缓存,方便其他模块对图像数据进行存取;而图像处理模块负责对图像进行灰度化、二值化、中值滤波以及形态学操作。

缺陷检测模块将检测到的缺陷位置信息发送给边框添加模块。图像添加边框后,再由 AXI 格式转换器转换为 AXI Memory 格式,并通过 AXI 总线与帧缓存模块、PS 端交换数据,将 AXI Memory 格式的图像数据存储在 DDR 存储。由于 CMOS 视频帧的数据量较大,FPGA 资源有限,为此采用 4 片 DDR3 外部存储器用于图像数据缓存,再通过 PS 的帧缓存单元被 AXI 总线读取,实现 LCD 显示屏输出。

3 预处理及检测标注算法设计

3.1 图像灰度化

由于采集到的视频数据存在大量噪声,影响检测效果,

因此需要对图像进行预处理。首先需要将图像数据由 RGB 格式转成 YCbCr 格式,实现灰度化处理,公式如下:

$$\begin{cases} Y = 0.299R + 0.584G + 0.144B \\ Cb = -0.172R - 0.339G + 0.511B + 128 \\ Cr = 0.511R - 0.428G - 0.083B + 128 \end{cases} \quad (4)$$

式中:Y 表示图像的灰度值。Cb 和 Cr 表示图像到灰色和红色的偏移量。R、G 和 B 表示红色、绿色和蓝色的亮度值。

因为 FPGA 本身难以对浮点数进行运算,因此需要将参数左移 8 位参与运算,再将运算结果右移 8 位。

3.2 中值滤波

下一步对图像进行中值滤波处理,通过非线性平滑操作,将每一像素点及其邻域构成的 3×3 矩阵作为滤波模板,计算滤波模板内元素灰度值的中位数,对孤立的噪声点进行消除,提升图像质量,中值滤波公式如下:

$$y[n] = \text{median}(x[n-k], \dots, x[n], \dots, x[n+k]) \quad (5)$$

式中: x 是原始信号, y 是滤波后的信号, n 是当前位置, k 是当前窗口大小。

为了提高中值滤波效率,本模块设计采用流水线架构。对图像每行的灰度值进行排序操作,得出每行的最大值、最小值和中间值,然后结合其他两行的数据,得出 3 行之中的最大值、最小值和中间值,并对它们取中值操作,得出当前滤波模板的中值结果。

3.3 改进后的局部自适应阈值分割

本研究采用的阈值算法需要大量的开方操作。首先,设输出项为 $dout$,输入项为 din 。 $dout$ 在 din 大于平均灰度与方差倍数的和时,输出为 255,反之为 0。因此,只需满足在一定区域内,输入项与平均灰度值差的平方不大于方差,即可判断该输入项输出为 0,反之为 255,最终公式如下:

$$dout = \begin{cases} 0, & \left[1 \leq \frac{\sum_{i=0}^{(2\gamma+1)^2} (din(i) - \mu)^2}{(2\gamma+1)^2 (din - \mu)^2} \right] \\ 255, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: din 为输入值, $dout$ 为输出值, μ 为窗口内像素均值, γ 为窗口半径。

将待测图像与自适应阈值算法处理结果进行比对,如图 2 所示,图像的缺陷部分得到凸显。

3.4 形态学处理

形态学处理是为了消除工件表面磨损影响,保留缺陷部分的像素点。考虑到污损点本身面积较小,本模块采用 3×3 闭运算模板,需要先进行膨胀操作,再进行腐蚀操作。

其中,膨胀操作需要遍历模板中除中心像素以外的 8 个像素,如果存在灰度值为 0 的像素,则中心像素灰度值为 0,反之为 255。而腐蚀操作是需要遍历模板中除中心像

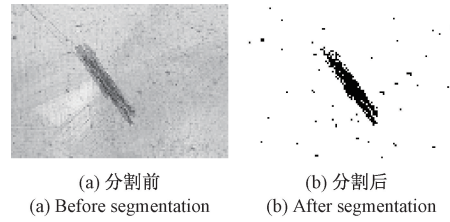


图 2 自适应阈值分割效果对比图

Fig. 2 Comparison chart of adaptive threshold segmentation effect

素以外的 8 个像素,如果存在灰度值为 255 的像素,则中心像素灰度值为 255,反之为 0。

操作效果如图 3 所示,可知闭运算操作能够有效消除图像中的污损部分。

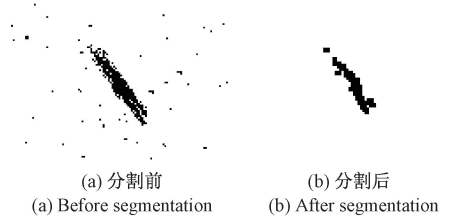


图 3 闭运算效果对比图

Fig. 3 Comparison chart of closed operation effect

3.5 缺陷检测标注算法

经过预处理操作,每个缺陷点的具体位置信息和灰度值均存储在 FPGA 寄存器中。在缺陷检测和标注时,可能会出现误判,使两个缺陷被标注为一个目标、或一个细长缺陷被标注为两个目标的情况。针对此问题,本研究采用像素阈值算法与投票算法相结合,对多个目标进行检测和标注。

像素阈值算法需要对灰度值为 255 的像素进行遍历,如果该像素的邻域内不存在其他灰度值为 255 的像素,则将其判定为新的缺陷。如果该像素的邻域内存在其他灰度值为 255 的像素,则将其判定为同一缺陷。

本研究的投票算法支持对 16 个目标进行检测,步骤如下:

1) 第一个缺陷像素信息存储在 1 号目标缺陷寄存器中,进入步骤 2)。

2) 当新像素到来时,需要所有缺陷寄存器对其进行判定投票,如图 4 所示。如果不在当前缺陷寄存器则投 1,反之则投 0;如果全票皆为 1,则 FPGA 判定该像素为新目标,存入新的缺陷寄存器,并获取新像素。如果有缺陷投 0 票,则 FPGA 检验该像素是否在已有目标缺陷的邻域内,进入步骤 3)。

3) 如果新像素在已有缺陷目标的领域内,FPGA 对像素点的领域与当前邻域比对,如果像素点邻域的值超过当前缺陷,则判定新像素有部分邻域在已有缺陷的邻域外,更新缺陷的邻域,并获取新像素。如无新像素,则此帧处理完

成,投票算法结束。

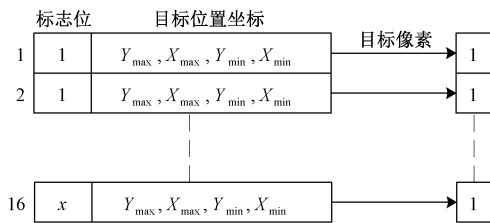


图 4 缺陷投票示意图

Fig. 4 Schematic diagram of defect voting

4 系统测试及结果分析

4.1 系统测试

为验证本研究采用的工件表面缺陷检测算法,搭建了一套基于 Xilinx 公司 XC7Z020CLG400-2 平台的测试系统,如图 5 所示。采用图像分辨率为 800×480 的 OV5640 摄像头进行图像采集,并利用 7 英寸 RGB TFT-LCD 对检测结果进行输出,每秒钟支持 60 帧图像数据刷新。

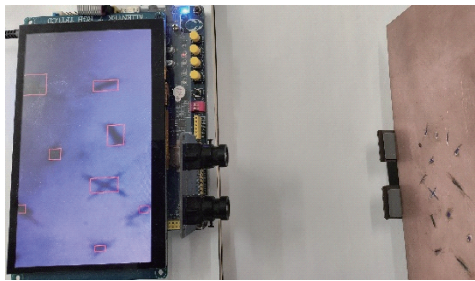


图 5 系统测试

Fig. 5 System testing

如图 6 所示,本系统以铜板试样为例,对其表面的缺陷进行检测,并用矩形框标注缺陷。

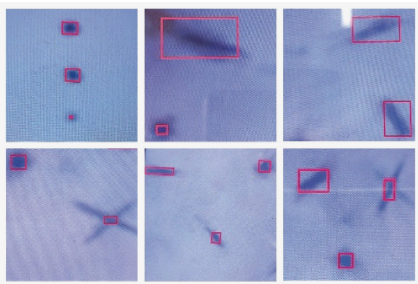


图 6 缺陷检测结果

Fig. 6 Defect detection results

4.2 测试结果分析

经测试,在铜板表面缺陷直径不小于 0.5 mm 时,本系统的检测准确率为 90.24%,缺陷检测平均精度如图 7 所示。基于投票算法的缺陷检测及方案可行。

本系统时钟频率为 72 MHz,即时钟周期为 13.88 ns,因此采集一帧图像数据耗时约为 $800 \text{ ns} \times 480 \text{ ns} \times 13.88 \text{ ns} \approx 5.33 \text{ ms}$ 。

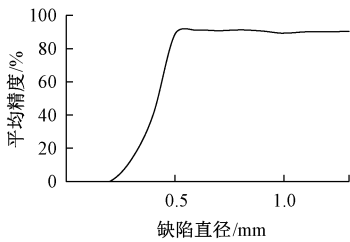


图 7 缺陷检测平均精度

Fig. 7 Average precision of defect detection

由于采用 FPGA 并行计算架构,图像从预处理算法开始,至完成图像缺陷检测,一共花费了 45 个时钟周期,即 $45 \text{ ns} \times 13.88 \text{ ns} \approx 0.62 \mu\text{s}$,则从采集到处理完一帧的平时耗时约 6 ms。

本系统的资源占用率较为合理,其中查找表(LUT)资源利用率为 27.28%,用于实现 FPGA 逻辑门。数字信号处理资源(DSP)占用率为 14.09%,主要用于矩阵运算。分布式 RAM(BRAM)资源利用率为 7.07%,作为内部数据缓存。

本系统总功耗为 6.8 W,其中显示屏功耗约为 3.5 W,板载 FPGA 芯片功耗约 1.78 W,其他芯片约 1.5 W。而 FPGA 芯片功耗包括其内部的 PS 功耗以及 PL 功耗,其中前者占 FPGA 功耗的 85%,这是因为 PS 的架构与 PL 的差别较大,其 ARM 内核运行频率达到 766 MHz,功耗比 PL 高很多,而 PL 的功耗主要由其内部逻辑资源使用规模以及其时钟频率的大小决定,系统时钟越高,PL 的功耗越大。

4.3 相关工作比较

本系统测试结果与其他文献的比较如表 1 所示,主要对比 FPGA 资源消耗与处理速度。

表 1 基于工件表面缺陷检测系统相关工作比较
Table 1 Comparison of related works based on workpiece surface defect detection system

相关工作	LUT	DSP	BRAM	准确率/ %	平均耗时/ ms
文献[16]	13 087	7	35	89.0	31
文献[17]	10 106	9	11.50	96.6	900
文献[18]	28 000	115	67	91.3	433
本文	10 496	31	17	90.24	6

文献[16]搭建了基于 FPGA 的屏幕表面缺陷检测系统,与本系统消耗的片上资源相近,但因其采用了 HLS 工具对图像进行预处理操作,检测时间相比本系统存在差距,且消耗较多 LUT 和 BRAM 资源。文献[17]提出了基于词袋(bag of words)模型的支持向量机缺陷检测算法,但缺陷检测算法程序依赖上位机的 QT 和 OpenCV 库实现,实现了较高的准确率,相比本系统处理速度延时过大。文

献[18]使用卷积层代替 YOLO 网络的重排序层进行网络退化,并映射到 FPGA 上,实现了较高稳定性的镜片表面缺陷检测,但因为算法复杂度较高,需要消耗较多片上资源,且检测速度较慢。从消耗资源和检测时间看,相比文献[16],本系统所耗费的查找表资源降低了 20%,平均耗时降低了 80%。相比文献[18],本系统的查找表资源降低了 63%,平均耗时降低了 98%。本系统与上述文献采用的方法相比,虽然检测准确率有所下降,但极大地降低了每帧图像数据从采集到检测的平均耗时。

本文的创新点在于采用 SocFPGA 并行高速计算,实现对工件表面的缺陷检测,相比基于软件的检测方案在处理速度上有较大优势,与文献[16]采用 HLS 预处理算法实现图像的处理方案相比,消耗了更少的 LUT 和 BRAM 资源,处理速度有了一定的提升。

5 结 论

为解决当前工件检测中表面缺陷检测速度慢的问题,本文采用 SocFPGA 搭建了一套工件表面缺陷检测系统,通过 OV5640 摄像头采集铜板试样表面缺陷图像,利用 FPGA 并行计算优势对缺陷图像进行预处理操作,通过像素阈值算法和投票算法,解决缺陷像素标注时可能会出现误判的问题,进一步提升了缺陷的检测准确率,并用 LCD 显示屏输出检测结果。对比相关工作,本系统从预处理算法开始,至完成缺陷检测,共花费 0.62 μs ,LUT 资源利用量为 10 496,在功耗和速度方面存在一定优势,实现了工件表面缺陷的实时在线检测,为该领域研究提供一定的参考。因本系统采用的 OV5640 摄像头性能有限,图像质量有待提高,且缺乏对复杂表面缺陷的灵活检测能力,下一步工作将采用高性能工业相机提升图像质量,并在 PS 端部署轻量级神经网络模型来提升对复杂表面缺陷的检测准确率。

参考文献

[1] 赵鹏程,秦浩东,张颖.小管径弯头畸变漏磁缺陷图像智能识别方法[J].电子测量技术,2024,47(8):181-188.
ZHAO P CH, QIN H D, ZHANG Y. Intelligent identification method for distortion magnetic flux leakage defects image of small-diameter pipe elbows [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(8): 181-188.

[2] CHANG Y P, XUE Y, ZHANG Y, et al. PCB defect detection based on PSO-optimized threshold segmentation and SURF features[J]. Signal, Image and Video Processing, 2024, 18(5): 4327-4336.

[3] GULLU B. Comparison of acoustic signal-based fault detection of mechanical faults in induction motors using image classification models[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2023, 45(14):

2794-2801.

[4] GUO J, YANG Y, XIONG X, et al. Brake disc positioning and defect detection method based on improved Canny operator[J]. IET Image Processing, 2024, 18(5): 1283-1295.

[5] 刘传洋,吴一全,刘景景.基于视觉的输电线路金具锈蚀缺陷检测方法研究进展[J].仪器仪表学报,2024, 45(3):286-305.
LIU CH Y, WU Y Q, LIU J J. Research progress of vision-based rust defect detection methods for metal fittings in transmission lines[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(3):286-305.

[6] 吴乾生,高健,张揽宇,等.基于特征提取和 SVM 分类的 LED 芯片缺陷快速检测与实现[J].机械设计与制造,2024,6(6):250-255.
WU Q SH, GAO J, ZHANG L Y, et al. LED chip defect sorting system based on feature extraction and SVM[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024, 6(6):250-255.

[7] 付强,朱传军,梁泽启.基于机器识别的带钢表面缺陷检测研究[J].机床与液压,2024,52(10):194-200.
FU Q, ZHU CH J, LIANG Z Q. Study on surface defect detection of strip steel based on machine identification[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(10):194-200.

[8] 黄烁,谈宏华,滕达.基于机器视觉的光纤端帽缺陷检测系统设计[J].自动化与仪表,2024,39(6):96-100.
HUANG SH, TAN H H, TENG D. Design of optical fiber end cap defect detection system based on machine vision [J]. Automation & Instrumentation, 2024, 39(6):96-100.

[9] 于子涵,李凯峰,黄静颖,等.基于 FPGA 的高分辨率红外目标检测技术研究[J].激光与红外,2024,54(3):130-135.
YU Z H, LI K F, HUANG J Y, et al. Research on high-resolution infrared target detection technology based on FPGA[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(3): 130-135.

[10] 李笑笑.基于 FPGA 的双目视觉障碍物检测系统设计与实现[D].太原:太原科技大学,2024.
LI X X. Binocular vision obstacle detection system based on FPGA design and implementation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2024.

[11] 张彦杰,于程豪,张超,等.钢筋数量在线检测中最优模板匹配算法的研究[J].制造业自动化,2024,46(7):13-18.
ZHANG Y J, YU CH H, ZHANG CH, et al. Research on the optimal template matching algorithm

- in the online detection of reinforcement quantity[J]. Manufacturing Automation, 2024,46(7):13-18.
- [12] 张征凯,黄道友,徐晓波. 基于多级中值滤波的电力扰动数据分离建模[J]. 电子设计工程, 2024, 32(14): 73-76.
- ZHANG ZH K, HUANG D Y, XU X B. Modeling of power disturbance data separation based on multistage median filter [J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(14):73-76.
- [13] 杨林蛟. 基于阈值的图像分割算法研究综述:原理、分类及典型算法[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2023,41(6):526-529.
- YANG L J. A review of threshold-based image segmentation algorithms: principles, classification and typical algorithms[J]. Journal of Shenyang Normal University(Natural Science Edition), 2023,41(6):526-529.
- [14] 魏宇婷,雷泽宇,严俊萧. 基于 OpenCV 的核桃叶片褐斑病自动识别与面积量化方法研究[J]. 农业与技术, 2024,44(7):48-52.
- WEI Y T, LEI Z Y, YAN J X. Research on automatic recognition and area quantification method of walnut leaf brown spot disease based on OpenCV [J]. Agriculture and Technology, 2024,44(7): 48-52.
- [15] 邓洁,张文志,赵志强,等. 基于逐行扫描法的焊缝识别研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2024, 43(4):343-350.
- DENG J, ZHANG W ZH, ZHAO ZH Q, et al. Research on weld seam identification based on line-by-line scanning[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology(Natural Science Edition), 2024,43(4): 343-350.
- [16] 陈佳峰. 基于 ZYNQ 的屏幕缺陷检测系统研究与实现[D]. 徐州:中国矿业大学,2024.
- CHEN J F. Research and implementation of ZYNQ-based screen defect detection system [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2024.
- [17] 郑凯. 基于 ZYNQ 的塑料杯表面缺陷检测系统研制[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2022.
- ZHENG K. Development of a ZYNQ-based inspection system for plastic cup surface defects [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology,2022.
- [18] 王习东,王国鹏,王保昌,等. 基于 FPGA 与退化 YOLO 的手机镜片缺陷检测系统[J]. 电子测量技术, 2022,45(18):10-17.
- WANG X D, WANG G P, WANG B CH, et al. Mobile phone lens defect detection system based on FPGA and degraded YOLO [J]. Electronic Measurement Technology, 2022,45(18): 10-17.

作者简介

翟浩然(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为图像处理。

E-mail:zh13153351727@foxmail.com

南钢洋,博士,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为嵌入式及图像处理。

E-mail:slightcloud2004@aliyun.com