

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210516

基于机器视觉的波纹补偿器轴向尺寸检测方法^{*}

倪洪启¹ 李宝立¹ 隋国于²

(1. 沈阳化工大学机械与动力工程学院 沈阳 110142; 2. 秦皇岛北方管业有限公司河北省波纹膨胀节与金属软管技术创新中心 秦皇岛 066004)

摘要: 波纹补偿器是现代管路中进行补偿的关键部件,波纹补偿器通过自身弹性元件的有效伸缩变形来吸收管路中由热胀冷缩、压强过大等原因而产生尺寸变化的一种补偿装置,为实时检测工业管道中波纹补偿器轴向尺寸变化过大导致的故障状况。本文设计了一种基于机器视觉技术改进的边缘检测算子对波纹补偿器轴向尺寸进行检测,采用混合滤波代替高斯滤波过滤噪声,通过形态学处理对图像细化,最后使用 OTSU 算法实现待测物体和背景的分隔。实验证明,机器视觉技术可以检测出波纹补偿器的轴向尺寸,该方法可以解决工业管道中波纹补偿器轴向尺寸难以实时检测的问题,同时检测设备安装方便、使用安全、精度也能达到预期指标。

关键词: 补偿装置;实时检测;边缘检测算子;轴向尺寸检测

中图分类号: TP751 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.6040

Machine vision-based inspection method for axial dimension of corrugated compensator

Ni Hongqi¹ Li Baoli¹ Sui Guoyu²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China; 2. Hebei Corrugated Expansion Joint and Metal Hose Technology Innovation Center, Qinhuangdao North Pipe Industry Co., Ltd., Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The corrugated compensator is a key component for compensation in modern pipelines. The corrugated compensator is a compensation device that absorbs the dimensional changes in pipelines due to thermal expansion and contraction, excessive pressure, etc. through the effective expansion and contraction of its own elastic element, and detects the fault conditions caused by excessive axial dimensional changes of corrugated compensators in industrial pipelines in real time. In this paper, an improved edge detection operator based on machine vision technology is designed to detect the axial dimension of the corrugated compensator, using hybrid filtering instead of Gaussian filtering to filter the noise, refining the image by morphological processing, and finally using the OTSU algorithm to achieve the separation of the object to be measured and the background. The experiment proves that the machine vision technology can detect the axial dimension of the corrugated compensator, and the method can solve the problem that the axial dimension of the corrugated compensator in industrial pipelines is difficult to detect in real time, while the detection equipment is easy to install, safe to use, and the accuracy can reach the expected index.

Keywords: compensation device; real-time detection; edge detection operator; axial dimension detection

0 引言

波纹补偿器作为现代工业设备进行补偿的关键部件之一,工作时受到系统压力影响会吸收系统位移导致局部或整体波纹间距发生变化,轴向位移变化过大时会出现失稳现象造成波纹补偿器损坏,如何高效准确的检测波纹间的

轴向距离,及时发现失稳现象是目前波纹补偿器故障检测所面临的难题。

针对传统人工测量波纹补偿器轴向距离效率低,维护成本高,并且波纹补偿器存在高空工作情况导致的测量无法完成等问题。本文选取机器视觉技术对波纹补偿器进行测距,机器视觉的测量技术可以对物体进行非接触测

收稿日期:2022-06-29

^{*} 基金项目:辽宁省教育厅科学研究项目(LQ2019002)资助

量,能够满足波纹补偿器长时间、高效率、远距离、实时检测的要求。机器视觉技术通过工业相机将拍摄的图像信号转为数字信号,数字信号传给对应的处理系统处理分析。

本文采取机器视觉中的边缘检测技术对波纹补偿器进行特征提取,从而实现轴向尺寸的测量。常见的传统边缘检测算法有 Canny 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、Laplacian 算子等^[1],传统边缘检测算子获取图像的边缘信息往往存在噪声,达不到预期的效果。尤其泽等^[2]提出了一种双边滤波代替高斯滤波的 Canny 边缘检测算子,与传统边缘检测算子相比抗噪能力更强,但 Canny 算子需要人工调试阈值,针对不同图像阈值设置不同,导致图像识别的难度增加。李迪等^[3]提出一种计算 8 方向梯度的 Sobel 边缘检测算子,经过改进的算子对噪声干扰的稳定性较差,当检测工件表面有划痕时,会增强划痕细节,易造成伪轮廓的出现。本文提出了一种基于大津法和形态学改进的边缘检测算子,从而达到对波纹补偿器轴向距离进行实时检测的目的。

1 测量系统构成及测量流程

1.1 测量系统构成

波纹补偿器轴向尺寸检测系统的硬件组成主要包括:工业 CCD 相机、光源、标定板、相机支架和计算机等。所需软件:PyCharm,OpenCV 库。

1.2 测量系统总流程

测量系统通过工业相机定时拍照获取波纹补偿器图像信息,将工业相机采集到的图片传人到 PyCharm 平台,调用 OpenCV 库获取图像信息并进行图像畸变校正、将图像灰度化并使用混合滤波过滤掉图像的噪声、本文采用改进的边缘检测算子获取图像轮廓、通过轮廓拟合函数制轮廓逼近多边形、角点检测来获取逼近多边形的波峰点、由两点间距离公式求得特征点间的像素距离,根据像素当量将像素距离转换为实际距离^[4-5]。图 1 波纹补偿器轴向尺寸测量流程图。

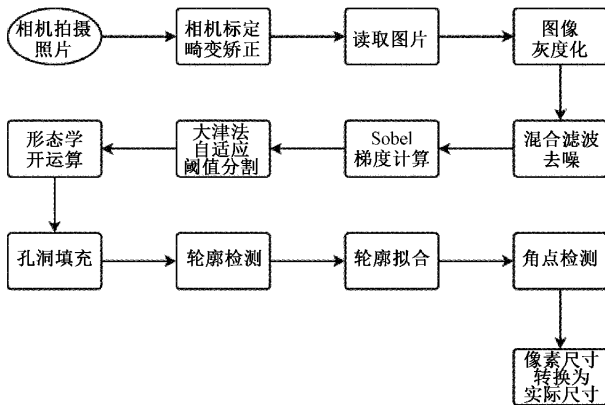


图 1 总体方案流程图

2 相机标定及图像畸变矫正

图像测量过程中需要通过相机标定获取像素距离与实际距离之间的转换比例关系。

标定时固定相机位置,拍摄 15 张位置姿态不同的棋盘格标定板图像,标定板规格为 10 mm×10 mm,根据标定所获得的畸变参数对图像进行畸变矫正,畸变矫正能够矫正图像出现的失真、扭曲现象,从而使测量结果更加准确^[6]。对矫正后的图像进行角点检测来获取棋盘格方格实际距离 L 与矫正图像后棋盘方格像素距离之间 D 的比例关系,即像素当量 K :

$$K = \frac{L}{D} \quad (1)$$

经棋盘格标定后,得到的像素当量 K 为 0.095 4 mm/pixel,为后续像素距离转换为实际距离做准备。

3 图像预处理

波纹补偿器经常在高温、高压等环境下工作,通过工业相机拍摄的照片往往会受噪声影响图片质量,导致识别结果不准确。所以在波纹补偿器轴向尺寸检测前必须对相机拍摄图像进行图像预处理操作,目的消除图像中的无用信息,以便特征提取使测结果更准确。图 2 为工业 CCD 相机拍摄到的波纹补偿器实物图。

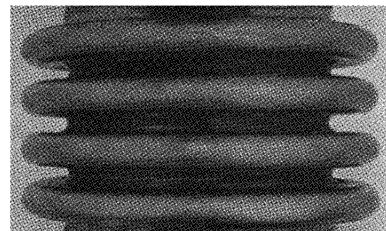


图 2 相机拍摄波纹补偿器实物图

3.1 图像灰度化处理

相机拍摄的图片是彩色图像,彩色图像是由 R (红)、 G (绿)、 B (蓝)三个单色混合调配而成,彩色图像所包含的信息过多,波纹补偿器轴向尺寸检测不需要对彩色图像的 RGB 三个通道都进行分析。将图像进行灰度化处理能把彩色图像降维成单通道图像,减少计算量,有利于提高检测的速度。

3.2 混合滤波平滑处理

图像拍摄和传输过程中会受到噪声干扰导致图像质量下降导致系统运行速度和精确度下降的现象,因此物体特征提取前需要对图像进行平滑去噪处理。

本文采用混合滤波算法,对图像进行中值滤波结合双边滤波操作对图像过滤噪声。

中值滤波的原理是对滤波器核心中的像素值展开排序,取排序过后的中间像素值作为滤波核中心点的像素值,以此方式作用于整幅图像替换所有像素以实现中值滤波操

作^[7]。中值滤波的公式如下:

$$g(x, y) = \text{med}\{f(x-i, y-j)\}, (i, j) \in S \quad (2)$$

其中, $g(x, y), f(x, y)$ 为像素灰度值, S 为滤波核窗口, 中值滤波对椒盐噪声抑制效果较好, 在抑制噪声的同时还能保护图像的边缘信息, 这种特性是其他线性滤波不具有的。

双边滤波是高斯滤波的加强版, 在高斯滤波的基础上加入了像素相似度之间的关系。通过空间邻近度的权值与像素相似度的权值相乘作用于整幅图像上, 从而达到去噪的效果^[8-9]。双边滤波公式如下:

$$I_D(i, j) = \frac{\sum_{(k, l) \in S(i, j)} f(k, l) \omega(i, j, k, l)}{\sum_{(k, l) \in S(i, j)} \omega(i, j, k, l)} \quad (3)$$

其中, $I_D(i, j)$ 为处理后在 (i, j) 点的像素值; $S(i, j)$ 的是指以 (i, j) 为中心的 $(2N+1)(2N+1)$ 的大小的范围; $f(k, l)$ 代表在 (i, j) 点的邻域像素值; $\omega(i, j, k, l)$ 是以 (i, j) 为中心点的邻域像素的加权系数。双边滤波既能过滤图像中的高斯噪声, 又能起到保护图像边缘的效果。

通过对比图3和4, 可以看到经过混合滤波处理过的波纹补偿器图片相比单一滤波处理的图片减少了划痕, 图像无细节等, 且较好的保留了波纹补偿器的边缘信息。混合滤波相较于单一的中值滤波和双边滤波, 既保留了中值滤波的椒盐噪声过滤能力又保留了双边滤波的保护图像边缘能力, 能够同时过滤掉椒盐噪声和高斯噪声, 适应性较好, 通过对比得出改进后的滤波保留了更多所需的关键信息, 方便后续的特征点提取。

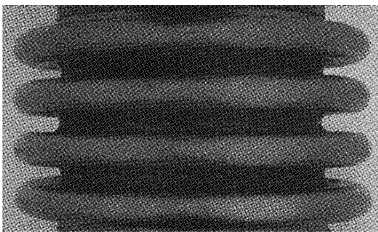


图3 中值滤波去噪效果图

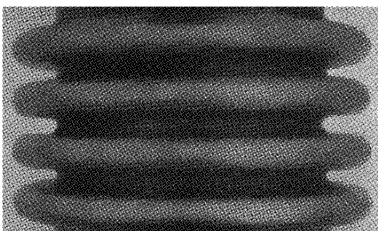


图4 混合滤波去噪效果图

3.3 传统边缘检测算子

边缘检测是图像识别过程中常用的图像处理方法, 能很好的识别出图像特征, 求出图像的关键信息。一般情况下, 通过梯度运算找到的图像中亮度急剧变化的像素点的集合就是边缘。用于图像边缘检测的算子有很多, 如 Sobel 算子、Canny 算子、Laplacian 算子等^[10]。

1) Canny 算子

Canny 算子是应用最广的边缘检测算子之一, Canny 算子通过差分运算计算图像的梯度信息来获取图像的轮廓, 但在实际工作中需要人为设置高低阈值, 经过反复调试才能筛选出最佳分割阈值^[11], 往往难以获取理想的图像。

对图5分析, 当阈值设置不当时经过 Canny 边缘检测得到的图像会出现轮廓线断裂现象, 图像灰度值(图像中亮度变化)较大的部分也识别为边缘信息, 这就会导致伪轮廓的产生, 上述情况会使得特征点获取增加难度。因此传统的 Canny 算子对于波纹补偿器轴向距离检测问题难以达到理想的效果。

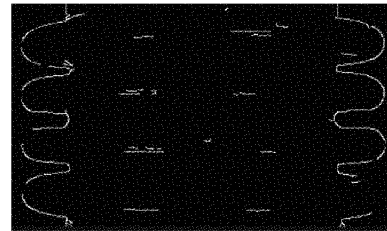


图5 Canny 算法阈值设置不当的二值化图像

2) Sobel 算子

Sobel 算子利用局部差分法求出图像边缘, 通过计算图像方向和梯度, 可以获取图像边缘。Sobel 算子具有快速定位边缘信息的能力, 同时该算子具有较强的抗噪声能力并在图像识别领域得到了广泛的应用^[12]。

Sobel 算子采用两个 3×3 的梯度模板与原始图像 src 进行卷积处理, 在图像上的每点都可以获得像素点沿 X 和 Y 两个方向的梯度 G_x 和 G_y , 其公式为:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot src \quad (4)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \cdot src \quad (5)$$

可以通过梯度求得该点的幅度值 G 和梯度方向 θ :

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (6)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_x}{G_y}\right) \quad (7)$$

从图6分析, 经过 Sobel 算子梯度计算后的图像边缘相对模糊, 图像细节得到增强。

3.4 基于大津法和形态学的改进边缘检测算子

传统的边缘检测算子往往难以消除工件表面划痕并且需要人为调试相关参数, 导致测量容易出现误差, 本文针对波纹补偿器设计了一种基于大津法和形态学改进的边缘检测算子, 使用混合滤波对图像进行去噪处理, 基于 Sobel 算子求出图像梯度, 通过大津法自动寻找最佳阈值进行二值化分割, 结合形态学操作对细小划痕进行细化处理。

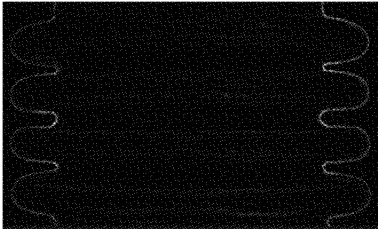


图 6 Sobel 边缘检测效果图

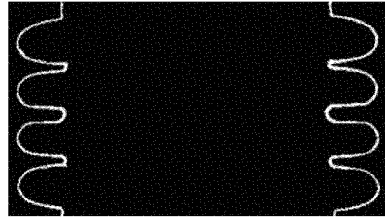


图 8 改进的边缘检测算子效果图

1) 大津法

大津法又名 Otsu 算法或最大类间方差法,通过计算方差的方法找到最佳的灰度值对图像目标物体和背景进行分离^[13]。计算公式如下:

$$\sigma^2 = \frac{(m_G \times P_A(k) - m)^2}{p_A(k)(1 - p_A(k))} \quad (8)$$

k 为经过处理后的最佳阈值, $P_A(k)$ 为像素被分到 A 的概率, m 为 k 的累加均值, m_G 为整幅图像的灰度值。大津法可以自动选取阈值进行二值化。相较常规二值化方法不需要人工设置阈值,可以提高准确率和运行速度,因此在图像分割中,大津法是阈值选择的最优算法^[14]。

由图 7 可以看出,经过大津法处理的二值化图形边缘更加明显且不会出现边缘线断裂情况。

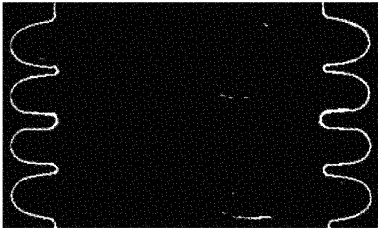


图 7 大津法处理后的二值化图像

2) 形态学处理

形态学处理可以针对图像中细小划痕点进行平滑处理,常见的形态学操作有膨胀,腐蚀,在此基础上发展而来的开运算(先腐蚀后膨胀),闭运算(先膨胀后腐蚀)等^[15-16]。本文在大津法的基础上加入形态学上的开运算,开运算的优点在运算前后不改变待测物体的大小,通过腐蚀操作对细小的轮廓进滤除,通过膨胀操作将轮廓缺失的部分补充起来。

3) 空洞填充

空洞填充目的是填充二值化图像的内部空洞,当图像中空洞过多会导致图像出现多个轮廓或者图像空洞被错误识别为伪轮廓的现象,经过改进的边缘检测算子处理后的图像内部还存在伪轮廓,因此需要对图像进行空洞填充处理。

图 8 即为改进的边缘检测算子效果图,通过空洞填充去除了图像中的空洞及伪轮廓。

4 波纹补偿器轴向尺寸检测

在轴向尺寸检测前需要获取图像的边缘轮廓,图像轮

廓就是指具备同样灰度值或颜色的点的集合。轮廓提取便是找寻图像中连续点连接在一起的曲线,即图像轮廓提取。

4.1 图像轮廓拟合

在计算轮廓时,所提取的轮廓信息相对复杂,通过轮廓拟合函数绘制一个近似于轮廓的近似多边形,轮廓拟合可以在一定程度上反应轮廓的特征,并尽可能的优化呈现特征信息^[17]。

如图 9 所示,通过轮廓拟合所得到的图形波峰特征更加明显、特征信息更容易提取,同时处理信息量减少,能提高程序运行速度和准确度。



图 9 轮廓拟合效果图

4.2 角点检测

角点通常定义为极大值点所在的位置,获取图像边缘信息的情形下,角点检测出的点是代表波纹补偿器特征的点^[18]。Shi-Tomasi 角点检测算子不需要人工调试阈值且可设置检测角点个数,波纹补偿器轴向距离检测过程中只需检测波峰点即可,因此选取 Shi-Tomasi 算子来进行角点检测。

将轮廓拟合出的图形单独提取出来,避免图像轮廓与拟合图像的交点被错误识别为角点的情况,通过 Shi-Tomasi 角点检测就得到拟合后图形的角点坐标。

由图 10 可以看出通过角点检测找到图像全部角点并将其标红,通过筛选,我们只取波纹补偿器波峰点坐标进行尺寸检测。

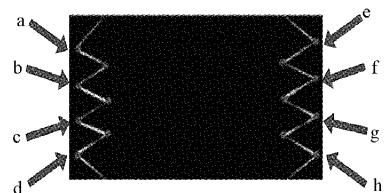


图 10 角点检测效果图

4.3 像素距离转换为实际尺寸

将波纹补偿器中心点置于棋盘格标定位置,通过所提取的特征点根据两点间距离公式获得其像素距离,再将像素距离乘以像素当量就可得到物体的实际尺寸,从而得到波纹补偿器相邻波纹的轴向距离,再将同侧波纹补偿器轴向距离相加得到波纹补偿器整体尺寸。

5 实验结果及分析

5.1 边缘检测效果对比实验

为了验证改进边缘检测算子的效果,将传统边缘检测算子与改进的边缘检测算子对波纹补偿器进行了实验对比,如图11所示。

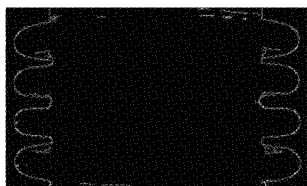


图11 Canny算子

通过对比图像可以看到,图11传统边缘检测算子处理完图像仍含有很多伪轮廓现象。图12改进的算法获取的

图像特征明显优于传统边缘检测算子,图像伪轮廓得到缓解且边缘特征更加明显易见,同时改进的边缘检测算子无需手动调节阈值,泛用性更强。

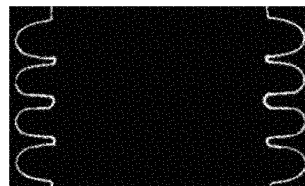


图12 改进的边缘检测算子

5.2 测量精度验证实验

为了验证改进的边缘检测算子用于波纹补偿器的轴向尺寸测量的精度,实验采取对同一物体进行多次测量分析,多次测量能够有效避免了测量结果的偶然性。

分析表1对同一物体进行多次视觉测量,误差率稳定在0.96%左右,由图13分析可知视觉多次测距平均值与卡尺测距误差维持在0.5 mm左右,误差数据波动平稳,在实际使用中波纹补偿器的测量误差要求在1~2 mm左右。综上所述,改进的边缘检测算子对波纹补偿器轴向距离的测量要优于传统边缘检测算子,既去除了伪轮廓又增加了边缘的连续性,同时测量误差精度也符合工业测量精度的要求。

表1 多次测量后的波纹补偿器轴向尺寸

轴向尺寸	ab段	bc段	cd段	ef段	fg段	gh段	ad段	eh段
视觉第一次测量尺寸	12.49	12.53	12.53	12.42	12.49	12.53	37.55	37.55
视觉第二次测量尺寸	12.50	12.54	12.54	12.43	12.50	12.54	37.58	37.58
视觉第三次测量尺寸	12.51	12.55	12.55	12.44	12.51	12.55	37.61	37.61
视觉测量尺寸平均值	12.50	12.54	12.54	12.43	12.50	12.54	37.58	37.58
手工测量尺寸	12.38	12.42	12.42	12.38	12.42	12.42	37.22	37.22

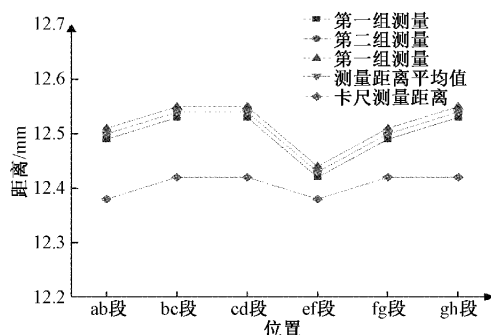


图13 不同位置测量误差图

6 结论

本文设计了一种改进的边缘检测算子对波纹补偿器进行轴向距离检测,相对于传统的边缘算子而言改进后的边缘检测算子可以直接使用无需调节阈值,同时具有良好的抗噪能力,边界拟合能力。经过验证该算法检测的轴向尺寸精度可达到0.5 mm左右,适用于波纹补偿器轴向尺

寸的测量,能满足当前工业测量的要求。相对于传统人工检测,机器视觉技术具有运行速度快、调试方便、无接触式安装、实时监控等优点,能够为工业安全提供保障。

参考文献

- [1] 韩亚辉,王琢,刘佳鑫.基于LoG算法的水果热成像检测[J].红外技术,2021,43(7):709-711.
- [2] 尤其泽,张春富,仇金桃.复杂背景下的激光光斑中心检测算法[J].智能计算机与应用,2020,10(4):124-128.
- [3] 李迪,吴奇,杨浩森.基于改进Sobel算子的边缘检测系统的设计与实现[J].信息技术与网络安全,2022,41(3):13-15.
- [4] 李宝志,倪洪启,林思雨.基于图像识别的波纹补偿器轴向尺寸检测方法[J].工程设计学报,2022,29(1):10-18.
- [5] 刘源,夏春蕾.一种基于Sobel算子的带钢表面缺陷图像边缘检测算法[J].电子测量技术,2021,44(3):

- 138-142.
- [6] 林嘉鑫,袁薇,刘少君.基于面结构光的机械工件三维扫描系统设计[J].计算机测量与控制,2018,26(3):187-188.
- [7] 谢勇明.光纤连接器端面视觉检测技术研究[D].深圳:深圳大学,2016.
- [8] 董静毅,吕文涛,包晓敏.基于机器视觉的PCB板表面缺陷检测方法研究进展[J].浙江理工大学学报:自然科学版,2021,45(3):380-382.
- [9] 李平,梁丹,梁冬泰,等.自适应图像增强的管道机器人缺陷检测方法[J].光电工程,2020(1):72-82.
- [10] 陈世伟,张胜修,杨小冈,等.前视红外地面待机目标轮廓提取方法[J].系统工程与电子技术,2017,39(7):1647-1649.
- [11] 冯靓瑜.基于SAR与光学遥感影像的边缘检测[J].信息与电脑(理论版),2018(11):67-69.
- [12] 王垚垚,李竹.基于巴特沃斯滤波的改进型Sobel算子边缘检测[J].电脑与电信,2020(8):19-22.
- [13] 李彦,朱凌云.基于图像处理的纽扣轮廓瑕疵检测[J].东华大学学报(自然科学版),2021,47(4):69-71.
- [14] 娄联堂,何慧玲.基于图像灰度变换的OTSU阈值优化算法[J].中南民族大学学报(自然科学版),2021,40(3):325-330.
- [15] 童胜杰,江明,焦传佳.一种改进工件边缘检测方法的研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(1):129-131.
- [16] 郭术义,杨赛,张鹏博.机器视觉在机械密封圈在线分拣中的应用[J].国外电子测量技术,2021,40(11):103-110.
- [17] 周胜民.基于轮廓拟合的生物样本形态测量学方法研究[D].南京:东南大学,2021.
- [18] 苗荣慧,杨华,武锦龙,等.图像块改进Harris角点检测的农田图像拼接[J].现代电子技术,2021,44(2):75-79.

作者简介

倪洪启,博士,副教授,主要研究方向为机械设计制造及其自动化研究。

E-mail:nihongqi@163.com

李宝立,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉技术。

E-mail:571189590@qq.com