

引用格式: ZHOU Jing, DONG Zihao, REN Jiaying, et al. Quality Inspection of Ceramic Filter Based on Multi-scale Edge Fitting[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11):1112004

周静,董子昊,任佳颖,等. 基于多尺度边缘拟合的陶瓷过滤网质量检测方法[J]. 光子学报, 2021, 50(11):1112004

基于多尺度边缘拟合的陶瓷过滤网质量检测 方法

周静^{1,2,3},董子昊^{1,2,3},任佳颖^{1,2,3},郑飞⁴,李金屏^{1,2,3}

(1 济南大学 信息科学与工程学院, 济南 250022)

(2 济南大学 山东省网络环境智能计算技术重点实验室, 济南 250022)

(3 济南大学 山东省“十三五”高校信息处理与认知计算重点实验室, 济南 250022)

(4 济南圣泉集团股份有限公司, 济南 250204)

摘要:针对人工检测陶瓷过滤网效率低、精度差等问题,提出了一种基于多尺度边缘拟合的方法,通过引入多尺度思想实现边缘的精确定位,并设计边缘筛选方案有效降低不规则边缘对直线拟合的影响。首先采用基于多尺度的边缘检测方法提取外边缘;其次设计分段拟合的筛选方案以剔除不规则的边缘;然后采用加权最小二乘法拟合筛选后的边缘;再在对边缘进行精确直线拟合的基础上,利用缺陷凸出、凹陷特点提取距离等特征,构建缺陷判别规则检测外形缺陷。最后根据几何运算获取外形尺寸,并与标准尺寸进行比较判断产品质量。实验结果表明,该方法可快速、准确地检测陶瓷过滤网外形缺陷和尺寸。

关键词:机器视觉;陶瓷过滤网;尺寸测量;缺陷检测;最小二乘法;分段拟合

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215011.1112004

Quality Inspection of Ceramic Filter Based on Multi-scale Edge Fitting

ZHOU Jing^{1,2,3}, DONG Zihao^{1,2,3}, REN Jiaying^{1,2,3}, ZHENG Fei⁴, LI Jinping^{1,2,3}

(1 School of Information Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

(2 Shandong Provincial Key Laboratory of Network Based Intelligent Computing, University of Jinan, Jinan 250022, China)

(3 Shandong College and University Key Laboratory of Information Processing and Cognitive Computing in 13th Five-year, University of Jinan, Jinan 250022, China)

(4 Shengquan Group Co., Ltd., Jinan 250204, China)

Abstract: The ceramic filter quality detection mainly relies on manual inspection, which has various problems such as low efficiency and poor accuracy. In order to solve these problems, a method based on multi-scale edge fitting was proposed. The idea of multi-scale was introduced to realize the edge detection on multiple scales, and the edge screening strategy was designed to effectively reduce the influence of irregular edge on line fitting. Firstly, an edge detection method based on multi-scale is proposed to accurately extract the edge. Secondly, the edge screening strategy based on piecewise linear fitting is designed to screen out the irregular edge. Thirdly, after screening, the weighted least squares method is used to fit the edge. Fourth, on the basis of the precise linear fitting of the edge, by analyzing the

基金项目:山东省重点研发计划(No. 2017CXGC0810)

第一作者:周静(1995—),女,硕士研究生,主要研究方向为数字图像处理与机器视觉。Email:1749686052@qq.com

导师(通讯作者):李金屏(1968—),男,教授,博士,主要研究方向为模式识别与图像处理。Email:ise_lijp@ujn.edu.cn

收稿日期:2021-04-01;录用日期:2021-05-12

<http://www.photon.ac.cn>

characteristics of defects, the distance difference features are extracted and the defect discrimination rules are constructed to detect the shape defects. Finally, the dimension is calculated by the geometric calculation and compared with the dimension of standard ceramic filter to judge the product quality. The experimental results demonstrate that the proposed method can quickly and accurately detect the dimension and shape defects of the ceramic filter.

Key words: Machine vision; Ceramic filter; Dimension measurement; Defect detection; Least squares; Piecewise fitting

OCIS Codes: 120.4630; 150.2945; 150.3040; 100.2000

0 引言

陶瓷过滤网因其独特的立体多孔结构被广泛用于各类铸件金属熔液的过滤,是高性能铸件生产的重要组成部分^[1]。然而,陶瓷过滤网生产加工过程中经常出现各种缺陷,严重影响铸件的质量和机械性能。其中,外形和尺寸缺陷是一类亟需检测的外观缺陷。外形缺陷包含缺边、掉角、凸起等,尺寸缺陷是指实际尺寸与生产标准尺寸的差值不在偏差范围内。目前,针对外形缺陷,企业采用人工目测和抽检相结合的方式完成质检,这种方式主观性强、易产生视觉疲劳,在大批量检测时经常出现漏检和误检;针对尺寸缺陷,企业通常需要人工借助精密测量工具进行检测,这种方式效率低、测量精度受人为因素影响。基于机器视觉的检测技术具有高效率、高精度、非接触等优势^[2-3],是解决上述问题的有效手段。

近年来,基于机器视觉的工件外观质量检测研究愈来愈多。在缺陷检测方面,传统的检测方法主要有:1)模板匹配法^[4-6],通过对比目标区域与模板区域的面积、灰度等差异检测缺陷,如周江等^[4]通过对比目标区域和模板区域的面积实现磁钢片掉角、粘连缺陷检测,该方法适用于检测结构简单、规整的工件,而陶瓷过滤网的结构复杂、尺寸多变,且外边缘参差不齐,使用该方法检测陶瓷过滤网掉角、凸起缺陷将会出现许多误报。2)缺陷特征分析法^[7-9],通过分析缺陷的纹理、灰度、几何等其他特征检测缺陷,如王红艳等^[7]通过提取活塞的纹理特征和缺陷的灰度特征检测活塞缺陷,郭萌等^[9]通过提取缺陷区域的圆形度等几何特征检测陶瓷碗缺陷。3)深度学习法^[10-11],在工件表面缺陷检测任务中被广泛应用,如韩明等^[10]通过优化Mask R-CNN网络实现齿轮的微小表面缺陷检测,但是该方法对工件外形缺陷检测任务具有局限性。这些方法的适用对象多为结构简单、表面光滑的工件,并不适合检测结构复杂、灰度特征一致的陶瓷过滤网。

文献^[12]基于凸包和最小外接矩形算法拟合陶瓷过滤网的外轮廓来实现缺边、掉角缺陷的判定,但是陶瓷过滤网的外轮廓参差不齐,轮廓形状不规则,使得该算法轮廓拟合精度较低,进而出现误检情况。存在缺边、凸起等缺陷的样本外边缘形状或凸出或凹陷,而不存在这些缺陷的正常样本的外边缘形状整体来看近似为直线。

目前,基于边缘拟合的方法多用于解决尺寸测量任务,其关键是边缘的精确提取与拟合。大多数学者先采用边缘检测算法获得目标边缘,再基于直线或圆拟合目标边缘实现工件的尺寸测量^[13-16]。如戴知圣等^[13]先后两次利用Canny算子提取U盘边缘,然后基于霍夫变换对边缘进行直线拟合测量U盘的长度;朱哲^[14]结合最小二乘和灰度矩方法拟合弹簧的内外径轮廓实现弹簧的内外径尺寸测量;周佳艺等^[15]基于Canny算子和Zernike矩亚像素边缘检测算法提取中孔边缘,利用最小二乘法拟合中孔圆实现齿轮中孔直径的测量。上述方法所涉及到的研究对象多为表面平滑、边缘规则的工件,传统的边缘检测算法便能精确提取目标边缘,同时工件的边缘都是规则的直线或圆弧,直接对提取的目标边缘进行简单拟合即可满足检测需求。但是,陶瓷过滤网的结构立体多孔、凹凸不平,导致图像灰度分布不均匀,使得传统的边缘检测算法效果不好;同时外边缘多存在缺边、凸起缺陷,若直接对提取的边缘进行直线拟合,其直线拟合精度较低,从而影响尺寸测量的精度,进而影响外形缺陷特征的提取和外形缺陷检测的精度。

基于以上分析,结合陶瓷过滤网的缺陷特征和结构特点,本文提出一种基于多尺度边缘拟合的质量检测方法,方法的关键是边缘的精确提取与拟合。引入多尺度思想,按照“由粗到精”的原则精确提取外边缘。从边缘特征角度研究,通过设计边缘筛选方案来提高直线拟合精度。最后,通过提取外形缺陷特征、构建缺陷判别规则来检测外形缺陷,根据几何运算获取外形尺寸检测尺寸是否规范。

1 检测要求及检测方案

陶瓷过滤网的形状有长方形、正方形和圆形。以灰色矩形陶瓷过滤网样本作为检测对象,根据外形缺陷和尺寸检测要求设计检测方案。

1.1 检测要求

如图1,外形缺陷检测项包括:缺边,即样本边缘出现缺失;掉角,即样本四周顶角处出现缺失;凸起,即样本边缘向外凸出。尺寸检测包括矩形陶瓷过滤网的长和宽,其范围在40~80 mm之间,测量精度为0.05 mm。不同形状的陶瓷过滤网其边缘拟合方法不同,所以还需识别陶瓷过滤网的形状。

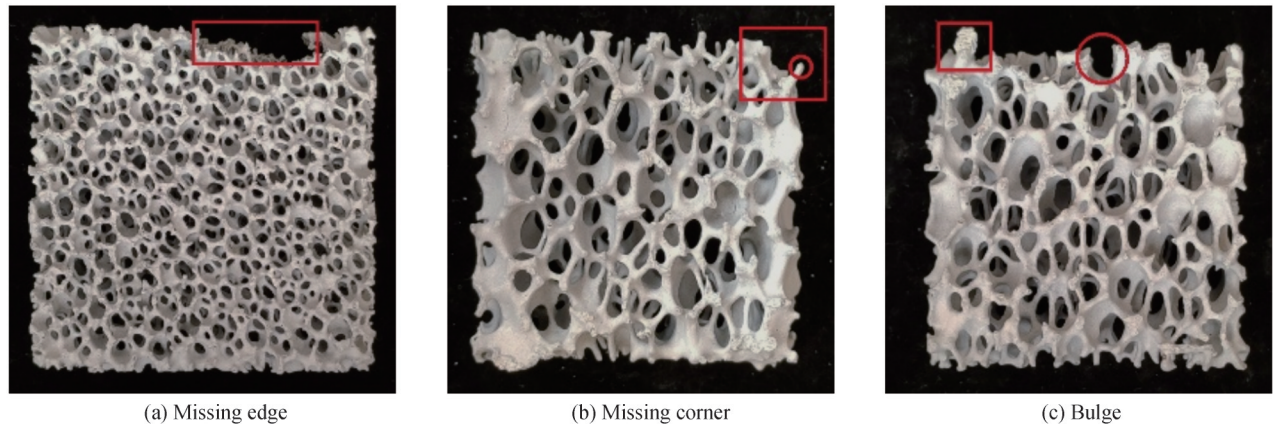


图1 陶瓷过滤网及其缺陷
Fig.1 Ceramic filter with defective

1.2 检测方案

设计的机器视觉检测方案包含硬件设备、软件系统两部分,如图2所示。硬件部分主要通过搭建成像设备采集陶瓷过滤网图像,成像设备包含相机、镜头及光源等,其中光源是视觉检测系统中的关键组成部分。由于陶瓷过滤网具有凹凸不平的结构特点,采用条形光源等其他光源照明陶瓷过滤网不可避免地产生阴影问题,而环形光源可解决阴影问题,故选用环形光源以前向照明方式采集图像。软件部分主要设计陶瓷过滤网外形缺陷和尺寸检测算法,实现外观质量的准确检测。

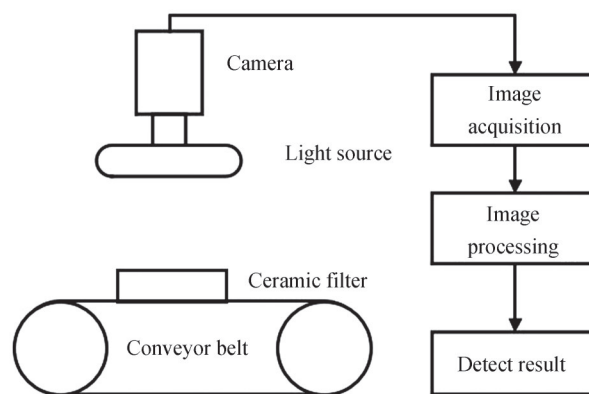


图2 系统结构
Fig.2 Structure of the system

2 检测算法

基于多尺度边缘拟合的陶瓷过滤网外观质量检测算法基本框架如图3所示。主要步骤为:1)图像预处理:提取陶瓷过滤网外边缘并识别形状;2)边缘筛选:通过设计边缘筛选方案剔除不规则边缘;3)边缘拟合:采用加权最小二乘拟合筛选后的边缘;4)外形缺陷检测:基于滑动窗口提取距离差值等特征实现外形缺陷

的检测;5)外形尺寸检测:通过计算外形尺寸以检测尺寸是否规范。

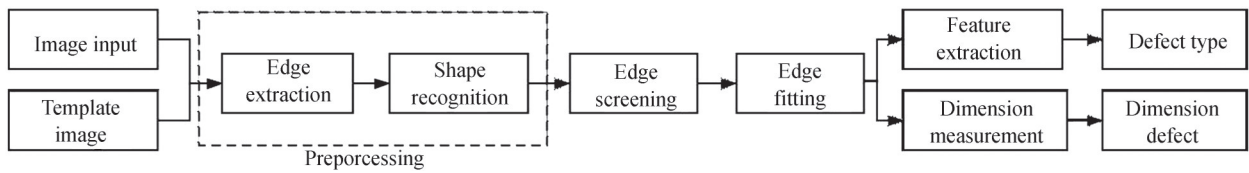


图3 总体研究框架

Fig.3 Overall research framework

2.1 图像预处理

2.1.1 多尺度边缘提取

基于多尺度边缘拟合检测外形缺陷和尺寸的关键步骤之一是精确定位外边缘。陶瓷过滤网表面多孔结构使其具有多个大小不一的孔径边缘和外边缘,采用经典的Canny边缘检测算子^[17]进行边缘检测,导致部分边缘信息丢失、不连续,并且还需要对孔径边缘和外边缘加以区分,难以提取完整、连续的外边缘。为提高边缘检测算法的精度及鲁棒性,采用基于阈值分割法提取边缘,即先对图像进行阈值分割,再采用形态学运算提取边缘。由图4(a)可知,陶瓷过滤网的边缘与背景灰度差异较大,所以选用大津法进行自适应阈值分割,即在最小灰度值0和最大灰度值255之间,通过计算图像目标和背景的最大类间方差自适应确定最佳阈值。

陶瓷过滤网的结构立体多孔、凹凸不平,在成像时受这种结构影响,图像中部分边缘的灰度值偏暗,图像整体灰度分布不均匀,偏暗边缘被误分为背景导致阈值分割效果不好,仅在一个尺度上难以准确提取边缘。为此,提出基于多尺度的边缘提取方法,通过引入多尺度思想实现在多个尺度上提取边缘。首先对图像进行阈值分割粗定位边缘;然后沿边缘滑动窗口进行阈值分割并不断调整窗口大小,降低偏暗边缘的影响;最后通过融合多个尺度上的边缘提取外边缘。方法过程如图4所示。

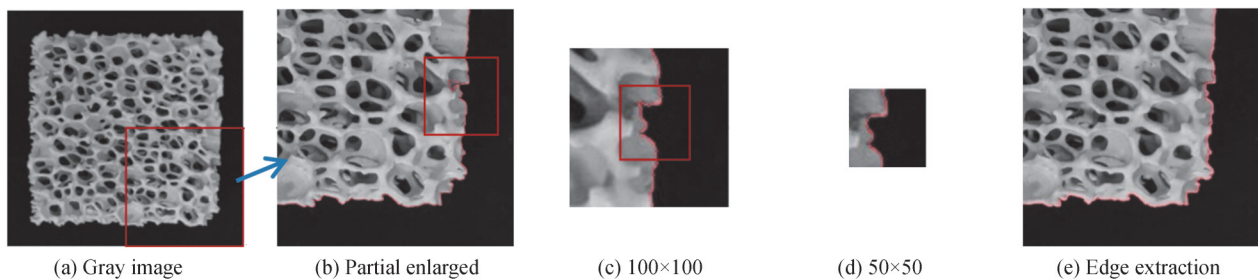


图4 边缘提取过程

Fig.4 The process of edge extraction

多尺度边缘提取方法具体步骤为:

1)利用大津法对灰度图像进行阈值分割,此时陶瓷过滤网表面孔径被分割为背景,采用孔洞填充算法将孔径区域填充为白色像素;

2)采用8邻域边界跟踪算法粗定位外边缘,将初次出现的目标像素点作为搜索起点,从上至下、从左至右扫描该点的8邻域,找到下一个边缘点,以此点作为当前点继续搜索,不断重复上述过程,直至回到搜索起点,将提取后的轮廓边缘点保存到数组;

3)沿边缘点滑动窗口定位外边缘,以提取到的边缘坐标点为中心在灰度图像上创建宽高为100像素×100像素的滑动窗口,窗口沿着边缘点遍历灰度图像,同时采用大津法做阈值分割,直到遍历结束;

4)缩小滑动窗口大小精定位外边缘,利用步骤2)提取二值图像的边缘点,并执行步骤3),此时的滑动窗口大小变为50像素×50像素;

5)为使提取的边缘具有很好的连续性,采用形态学中的腐蚀性边缘提取算法,在融合后的基础上,采用矩形结构元素 g 先对二值图像 f 做腐蚀运算后,再用二值图像与腐蚀后的图像做差运算,最终得到精确的边

缘结果 E , 腐蚀运算用 $f \ominus g$ 表示, 运算公式为

$$E = f - (f \ominus g) \quad (1)$$

2.1.2 形状识别

为识别存在外形缺陷的陶瓷过滤网的形状, 采用边界标记方法识别形状, 即以 1-D 函数的形式来表达 2-D 边界, 该方法可较好地适应物体的平移、旋转和缩放。表达边界的方式有很多, 刘砚菊等^[18]将目标的所有轮廓边界点和目标重心之间的距离作为边界点序列的函数, 此方式计算和时间成本较高。为减少计算量, 以重心为原点在极坐标下计算边界点与目标重心的距离函数曲线, 如图 5 所示。

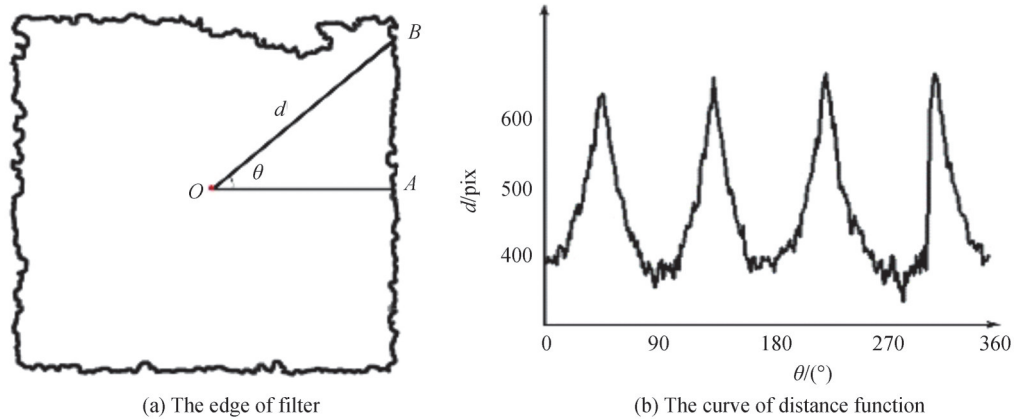


图 5 方形陶瓷过滤网函数曲线

Fig.5 Distance function curve of square ceramic filter

图 5 中, 横轴表示角度 θ , 纵轴表示角度为 θ 时边界点与重心的距离 d 。方形陶瓷过滤网的函数曲线出现的 4 个高峰, 分别对应于方形的 4 个顶角, 由此可推断圆形陶瓷过滤网的函数曲线近似为一条水平曲线。于是可以通过计算并比较待测图像与标准图像的距离函数曲线误差, 识别出陶瓷过滤网的形状。

具体步骤为:

1) 计算模板和目标的重心 O , 确定标记起点 A , 即穿过重心点的直线与过滤网轮廓的交点;

2) 在极坐标下计算目标轮廓边界点与重心的距离为角度的函数曲线, 已知轮廓边界点坐标为 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, 3, \dots, n=360$), 目标重心坐标为 (x, y) , 则可计算角度为 θ ($\theta=1^\circ, 2^\circ, \dots, 360^\circ$) 的轮廓边界点与重心的距离 d_1, d_2, \dots, d_n , 计算公式为

$$d_n = \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} \quad (2)$$

3) 由图 5(a) 可知, 陶瓷过滤网的外轮廓参差不齐, 导致函数曲线出现不同程度的毛刺小峰, 为降低后续形状检测的误差, 对 n 个距离 d 进行均值滤波处理, 过滤掉多余的小峰, 即

$$d_i = (d_i + d_{i+1} + d_{i-1}) / 3 \quad (3)$$

4) 归一化处理, 寻找模板和待分类图像的重心距离曲线的最大值, 计算缩放系数, 根据缩放系数调整待分类样本的重心距离曲线, 直至两个最大值相同;

5) 比较模板与待分类图像的曲线误差判定过滤网形状, 分别计算待分类与模板间的重心距离曲线相对误差 E_r , 即

$$E_r = \frac{\sum_i [f(\theta_i) - g(\theta_i)]^2}{\sum_i f(\theta_i)^2} \quad (4)$$

式中, θ_i 表示边界点和重心连线与水平坐标之间的夹角, $f(\theta_i)$ 、 $g(\theta_i)$ 分别表示待分类与模板的重心距离曲线, E_r 的值越小, 说明待测图像与模板图像的形状越匹配。

2.2 基于分段拟合的边缘筛选

在准确提取外边缘后, 发现外边缘具有以下特征: 1) 外边缘既有骨架也有半闭合孔径, 导致边缘呈现分

段式的不规则状态,当边缘为骨架时其边缘形状较为规则,近似为直线;当边缘为半闭合孔径时其边缘形状不规则,多呈U形分布,如图6(a)所示。2)外边缘多存在缺边、掉角、凸起缺陷,凸出、缺失区域形成的边缘形状不规则、凹凸不平,如图6(b)、(c)所示。

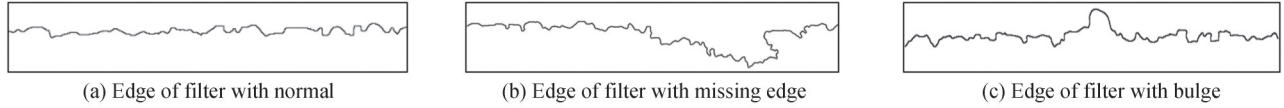


图6 正常及缺陷陶瓷过滤网的边缘
Fig.6 Edge of ceramic filter with normal and defective

基于以上特征可知,存在外形缺陷的样本边缘出现了明显的缺失和凸出,导致边缘形状不规则。这种不规则的边缘可以通过对样本边缘进行直线拟合,利用拟合直线的斜率值来判断不规则的边缘。不规则的边缘其拟合直线斜率较大,较为规则的边缘其拟合直线斜率近乎为0。因此,设计了基于分段拟合的边缘筛选策略,剔除不规则的边缘。具体步骤为:

- 1) 对外边缘进行分段处理,将外边缘等间隔划分为若干段,即采用固定大小的窗口遍历图像;
- 2) 采用普通最小二乘法对窗口内的边缘做直线拟合,根据直线方程计算直线斜率 k ;
- 3) 如果斜率 k 小于等于设定阈值 T_m ,那么当前窗口的边缘不规则,依据式(5)将其剔除。

$$W = \begin{cases} 1 & \text{if } (|k| \leq T_m) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

式中,1表示当前窗口 W 被保留,0表示当前窗口 W 被剔除。经多次实验, T_m 取0.1、窗口大小为100像素 \times 150像素时,可较好地保留规则边缘。

2.3 边缘拟合

对陶瓷过滤网外边缘进行精确拟合是外形缺陷和尺寸检测的一个重要步骤。陶瓷过滤网外边缘或为骨架或为半闭合孔径,这种结构使得边缘参差不齐、没有规则,且不同大小的孔径其边缘不规则程度不同,对外边缘进行筛选处理也难以完全将不规则的边缘点剔除。为降低少量的边缘离群点对直线拟合的影响,采用加权最小二乘法对筛选后的边缘进行直线拟合。具体步骤为:

1) 构建拟合直线方程 $y=kx+b$,对筛选后的 n 个边缘点 (x_i, y_i) ($i=1, 2, 3, \dots, n$)求拟合直线方程 $f(x)$ 使其与实际值误差的平方和最小,目标函数为

$$J = \sum_{i=1}^n w_i [y_i - f(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^n w_i [y_i - (kx_i + b)]^2 \quad (6)$$

式中, w_i 为边缘点的权重,各边缘点的初始权重均为1;

2) 根据权重函数更新边缘点的权重,根据拟合直线方程计算拟合直线的残差 r_i ,即边缘点到拟合直线的距离,对于偏离直线的边缘点其权重应随着残差 r_i 的增大而减小,同时减少不必要的计算量,设计权重函数为

$$w_i = \begin{cases} 1 & |r_i| = 0 \\ 1/r_i & |r_i| \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中,当残差值不为0时,将残差值的倒数作为边缘点的加权值;

3) 将更新后的权重利用普通最小二乘法代入式(6)进行求解估计出直线方程,对方形陶瓷过滤网的四条边分别做直线拟合最终会得到4个直线方程。

2.4 外形缺陷检测

2.4.1 缺陷特征提取

缺边、掉角是指陶瓷过滤网四周边缘或顶角处某一区域发生了缺失,凸起是指陶瓷过滤网四周边缘某一区域出现了凸出。为一次性解决缺边、掉角、凸起缺陷检测问题,对边缘进行直线拟合后的结果(图7)分析,发现了如下特征:

- 1) 在一定窗口内,缺边、掉角缺陷边缘向内凹,位于拟合直线 L 内侧,边缘点到 L 的距离及其累加值为一

个较小的负数;

- 2) 凸起缺陷边缘向外凸,位于拟合直线 L 外侧,边缘点到 L 的距离及其累加值为一个较大的正数;
- 3) 不含有缺陷边缘近似与拟合直线 L 重叠,边缘点到 L 的距离及其累加值接近于 0。

因此,基于滑动窗口提取窗口的距离差值和窗口位置特征实现外形缺陷的检测,距离差值为窗口内边缘点到拟合直线 L 的距离累加值的平均值。

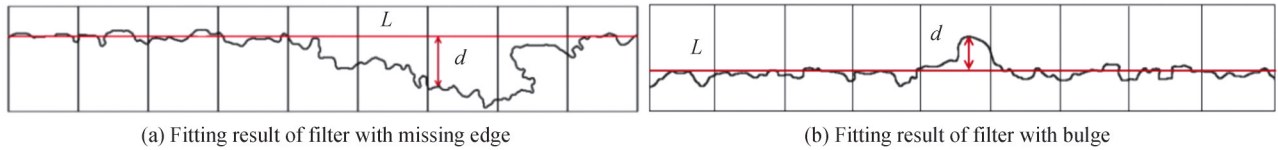


图7 边缘拟合结果
Fig.7 Edge fitting result

窗口内边缘点到拟合直线的距离累加值可以看作边缘与拟合直线围成的面积,即定义窗口内的边界为二维函数 $f(x)$,窗口内的边界拟合直线 L 为 x 轴,窗口的高 h 为 y 轴,则函数图像与 x 轴围成的面积近似等于窗口内 n 个边界点到拟合直线的距离累加值,因此函数表达式为

$$\int_a^b f(x)dx \approx \sum_{i=1}^n d_i \quad (8)$$

式中,窗口的宽 w 相对于 $(b-a)$, d_i 为窗口内边界点 i 到拟合直线的垂直距离,因此 \bar{d} 计算公式为

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{w} \quad (9)$$

2.4.2 缺陷判定规则

若陶瓷过滤网外边缘没有外形缺陷,则窗口内边缘将会靠近拟合直线,几乎与拟合直线重叠。反之,窗口内边缘将会远离拟合直线,边缘位于拟合直线的内侧或外侧。因此,可通过计算距离累加值的平均值 \bar{d} 判定边缘是否有外形缺陷, d 的大小代表窗口内的边缘是否靠近拟合直线。 d 近似为零则表示窗口内的边缘越靠近拟合直线,即窗口内没有缺陷; d 越大或越小则表示窗口内的边缘越远离拟合直线,即窗口内有缺陷。利用式(8)和(9)分别对外形缺陷样本和正常样本的某一条边开窗并计算窗口内的 d , 计算结果如图8所示,横轴表示窗口个数,纵轴表示窗口的距离累加值的平均值 \bar{d} 。

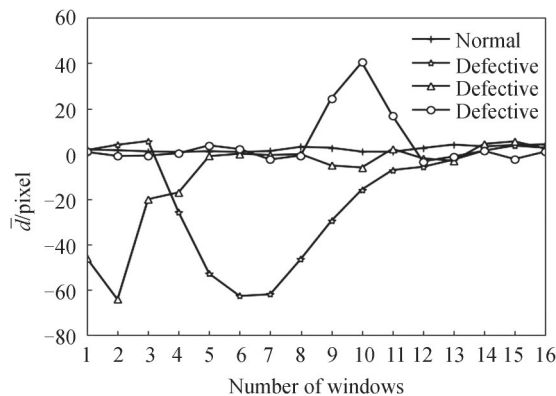


图8 正常及缺陷陶瓷过滤网的计算结果
Fig.8 Calculation result of the ceramic filter with normal and defective

由图8可知,正常样本边缘中各窗口内的 d 靠近拟合直线,缺陷样本边缘中各窗口内的 d 均远离拟合直线。为准确地判断缺陷并识别缺陷类型,制定了如下规则:

- 1) 假设窗口个数为 m ,若窗口内 d 大于阈值 T_1 ,记为凸起缺陷;
- 2) 若窗口内 d 大于阈值 T_2 ,且当前窗口标记为第 1 或 m 时,记为掉角缺陷;

3)若窗口内 d 大于阈值 T_3 ,统计符合阈值条件的窗口个数 s ,若 $s \geq 2$,且当前窗口标记不为第1或 m 时,记为缺边缺陷。

实验表明, T_1 、 T_2 、 T_3 为固定阈值便能准确检测陶瓷过滤网的外形缺陷、缺陷类型及具体位置。

2.5 外形尺寸计算

根据检测要求,尺寸测量项的缺陷判别需要先根据几何运算获取外形尺寸,再与生产标准尺寸进行比较。如图9所示,陶瓷过滤网有四条边,采用加权最小二乘法对筛选后的边缘进行拟合,将会获得4条直线方程,先联立邻边的直线方程组计算出交点,即四个顶点 A 、 B 、 C 、 D ;再根据两点坐标计算两点间的距离,即 AB 、 AC 、 CD 、 BD 的像素长度;接着取 AB 、 CD 的平均值作为陶瓷过滤网的宽 W_d ,取 AC 、 BD 的平均值作为陶瓷过滤网的长 L_d ,并将像素尺寸转化为实际物理尺寸;最后与生产标准尺寸进行比较,若误差在可接受范围内,则该项检测合格,反之不合格。

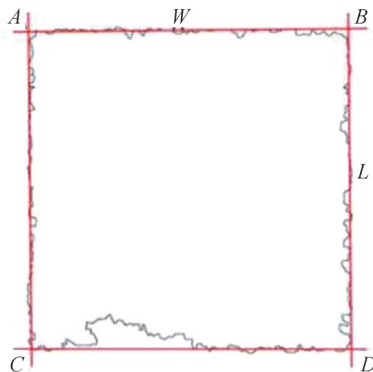


图9 陶瓷过滤网边缘拟合结果
Fig.9 Edge fitting results of ceramic filter

3 实验结果与分析

3.1 实验平台的搭建

为验证所提方法的有效性,搭建实验平台进行陶瓷过滤网质量检测实验。检测系统硬件组成如图10所示,实验选用500万像素的工业相机和镜头,将陶瓷过滤网置于载物台上,采用前向照明方式获取图像,并在Visual Studio 2019环境下基于C++和OpenCV开发缺陷和尺寸检测系统。

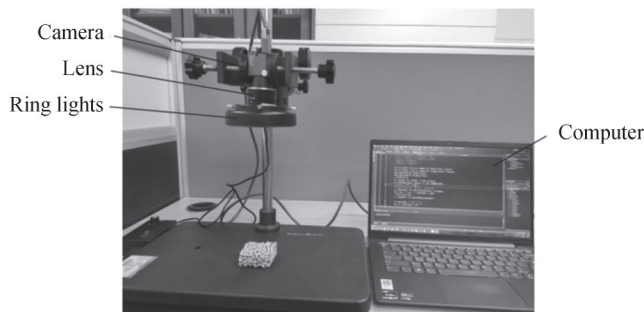


图10 机器视觉检测系统硬件组成
Fig.10 The hardware composition of the machine vision detection system

3.2 视觉检测系统的标定

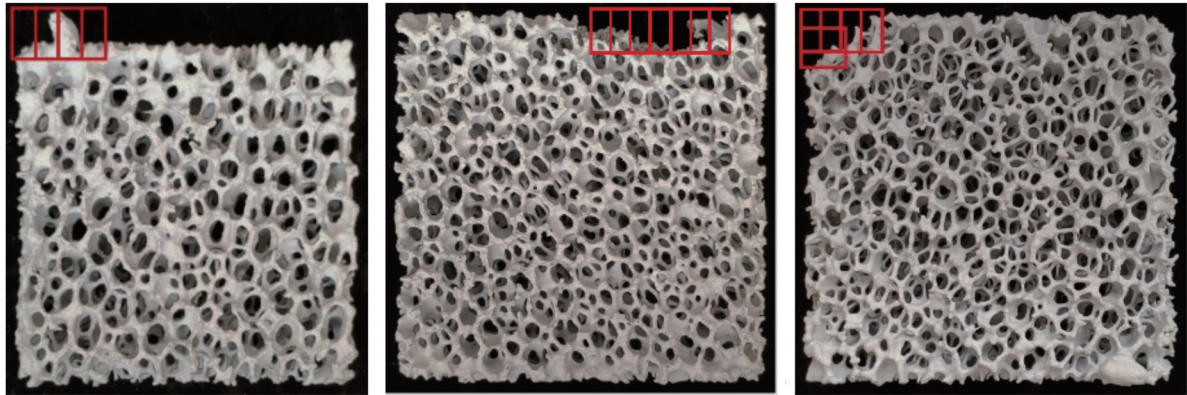
基于视觉检测系统测量工件尺寸时,得到的图像尺寸数据并不是实际的物理尺寸,而是图像像素尺寸。所以在视觉测量前,还需要建立图像像素尺寸与实际物理尺寸的对应关系,即对相机进行标定。由于搭建的实验平台采用面阵相机,镜头的畸变较小可以忽略不计,因此不需要对相机内部参数进行标定。标定的流程即是计算标定系数的过程,针对本文的二维尺寸测量系统,采用标准件成像法进行标定,即选用标准件作为标定参照物,保证采集环境不变的情况下采集图像并执行尺寸测量算法,根据式(10)计算像素尺寸与实际物理尺寸的对应关系,即标定系数 l 。

$$l = D/d \quad (10)$$

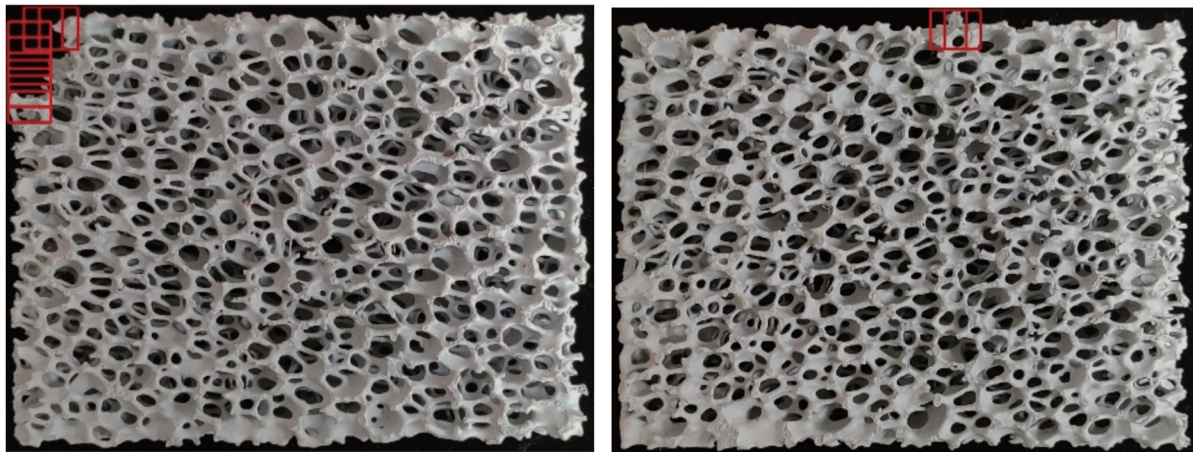
式中, D 为标准件的实际物理尺寸, d 为执行完尺寸测量算法得到的像素尺寸。标定精度将会影响尺寸测量精度,为提高标定精度,对多个标准件进行多次标定实验,选取平均值作为最终标定系数。

3.3 外形缺陷实验分析

首先对外边缘做筛选处理,然后采用加权最小二乘拟合边缘。为了验证本文方法的准确性和有效性,采用文献[12]中的方法、不对外边缘做筛选处理直接采用加权最小二乘拟合边缘的方法(简称未筛选外边缘方法)和本文方法对500张矩形陶瓷过滤网进行图像处理与分析,通过准确率 P_r 和误检率 F_r 对算法性能进行评价。其中准确率是指检测正确数目与待检测数目的比例,误检率是指误检(不是缺陷却被检测为缺陷)数目与待检测数目的比例。陶瓷过滤网缺陷检测结果如图11所示,不同检测方法的实验结果如表1所示。



(a) Defect detection results of square ceramic filter



(b) Defect detection results of rectangular ceramic filter

图11 本文方法的缺陷检测结果

Fig.11 Defect detection results of proposed method

表1 不同检测方法的实验结果

Table 1 Experimental results of different detection methods

Methods	Defect type	Number of defect images detected	Number of defect images correctly recognized	$F_r/\%$	$P_r/\%$
Method of Ref.[12]	Missing edge	56	52	7.14	92.85
	Missing corner	176	169	3.98	96.02
Method of without edge screening	Missing edge	56	30	46.43	53.57
	Missing corner	176	109	38.07	61.93
	Bulge	72	47	34.72	65.28
Proposed method	Missing edge	56	55	1.79	98.21
	Missing corner	176	174	1.14	98.86
	Bulge	72	71	1.39	98.61

由图11可知,本文算法可以准确检测出矩形陶瓷过滤网外形缺陷,并标记出缺陷位置,即红色矩形框。由表1数据可知,文献[12]中的方法可较好地检测陶瓷过滤网缺边、掉角缺陷,但是其误检率较高,主要因为部分边缘的孔径未闭合使得边缘向内延深,增加了缺边深度,造成了误检;而本文方法通过提取距离特征和窗口特征进行缺陷判断,有效降低了误检率。未筛选外边缘方法的准确率较低、误检率较高,是因为部分缺边、掉角缺失区域较大,离群点在待拟合数据中的比例较大,影响了直线拟合的精度,进而影响缺陷特征值的提取与判断,导致准确率较低,误检率较高;而本文方法通过对边缘进行筛选处理,避免离群点对直线拟合的影响,从而提高了准确率,降低了误检率。实验证明,本文方法检测准确率超过98%,误检率小于2%,可较好地满足企业检测要求。

3.4 尺寸测量精度实验分析

为验证机器视觉检测系统的精度,选取1个50×50规格类型的正方形陶瓷过滤网作为实验样本,用设计的视觉检测系统对实验样本进行10次尺寸测量实验,取10次测量值的平均值作为陶瓷过滤网的最终尺寸,并以生产厂家提供的尺寸为标准值,统计每次实验陶瓷过滤网外形尺寸的绝对误差 E ,计算出平均绝对误差 M ,相关计算公式为

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad (11)$$

$$E = T - S \quad (12)$$

式中, T 为系统测量值, S 为厂家提供的标准值, n 为实验次数。实验统计结果如表2所示,表中 L_d 和 W_d 表示系统测量值,即陶瓷过滤网的长和宽, E_1 和 E_2 表示陶瓷过滤网长度和宽度的绝对误差。同时,绘制出每次实验外形尺寸的绝对误差曲线如图12所示。

表2 尺寸测量实验统计结果
Table 2 Statistical results of dimension measurement experiment

No.	L_d / mm	E_1 / mm	W_d / mm	E_2 / mm
1	50.015 3	0.015 3	50.0226	0.022 6
2	49.970 6	0.029 4	50.030 6	0.030 6
3	50.031 4	0.031 4	50.025 9	0.025 9
4	49.989 4	0.010 6	50.006 3	0.006 3
5	49.978 6	0.021 4	49.995 0	0.005 0
6	49.977 1	0.022 9	50.027 5	0.027 5
7	49.998 2	0.001 8	50.016 2	0.016 2
8	49.998 1	0.001 9	49.992 1	0.007 9
9	49.982 8	0.017 2	49.971 9	0.028 1
10	49.971 2	0.028 8	49.990 0	0.010 0

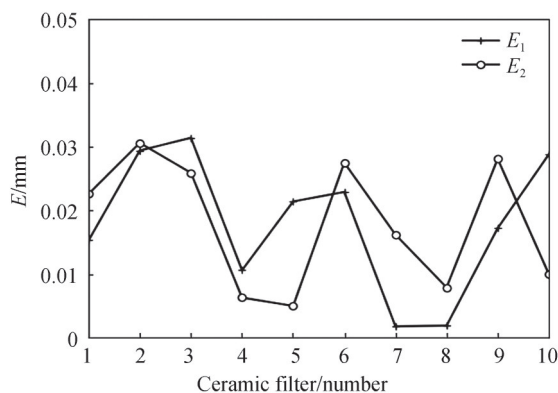


图12 绝对误差分布
Fig.12 The absolute error distribution

根据表2中数据计算可知,方形陶瓷过滤网长度的测量均值为49.991 3 mm,最大误差为0.031 4 mm,最小误差为0.001 8 mm,平均绝对误差为0.018 1 mm;宽度的测量平均值为49.992 3 mm,最大误差为0.030 6 mm,最小误差为0.005 mm,平均绝对误差为0.018 mm。由计算数据和图12可知,设计的检测系统测量精度均在0.05 mm以内,较好地满足检测需求。

人工检测需借助游标卡尺工具测量陶瓷过滤网的尺寸。为进一步验证视觉检测系统的精度与速度,选用游标卡尺对上述实验样本做相同尺寸测量实验,并与系统测量值进行对比计算平均绝对误差,实验结果如表3所示。

表3 本文方法与人工检测方法结果对比
Table 3 Comparison of results between the proposed method and the manual detection method

Methods	L_d /mm	M_1 /mm	W_d /mm	M_2 /mm	Detection speed/(number \cdot min $^{-1}$)
Proposed method	49.991 3	0.018 1	49.992 3	0.018	120
Manual detection	49.95	0.046	49.96	0.044	12

由表3中数据可知,针对陶瓷过滤网尺寸测量,人工检测与视觉检测的测量精度均满足企业检测需求。但是人工需借助精密测量工具测量尺寸,平均绝对误差相对较大,主要原因是人工检测需不断接触待测物体,在测量过程中陶瓷过滤网易受磨损,同时测量结果受人为因素影响较大,导致平均绝对误差较大,检测速度较慢。视觉检测利用相机等设备代替测量工具,不需要接触待测物体,测量平均绝对误差较小,检测速度远快于人工检测。实验结果表明,本文的检测系统较好地满足检测要求。

为评定机器视觉检测系统的可靠性,分别选取外形尺寸为40 \times 40、50 \times 50、60 \times 60、80 \times 80的陶瓷过滤网作为实验样本,采用本文检测系统进行尺寸质量判定实验。实验过程中将系统测量值与陶瓷过滤网生产厂家提供的标准值进行比较,通过计算绝对误差来判定产品是否合格,实验结果如表4所示。可知,随着陶瓷过滤网外形尺寸的增大,绝对误差并没有大幅度增大,误差值在可接受范围内。实验结果表明,选取的陶瓷过滤网外形尺寸均符合出厂要求,系统检测结果与人工检测结果一致。

表4 不同类型的陶瓷过滤网尺寸质量判定结果
Table 4 The dimension quality judgement results of ceramic filter with different types

Types of ceramic filter	S/mm	L_d /mm	W_d /mm	Product quality
40 \times 40	40	40.009 8	40.011 5	Normal
50 \times 50	50	50.008 5	49.987 9	Normal
60 \times 60	60	60.013 7	60.013 5	Normal
80 \times 80	80	80.011 9	79.986 9	Normal

4 结论

本文基于陶瓷过滤网的结构特征和机器视觉技术提出一种基于多尺度边缘拟合的检测方法。首先基于多尺度的边缘检测方法精确提取外边缘,然后设计边缘筛选优化策略降低不规则边缘对直线拟合的影响,最后基于滑动窗口提取缺陷特征检测外形缺陷,并根据几何运算计算外形尺寸判断尺寸有无偏差。该方法有效解决了矩形陶瓷过滤网形态结构复杂、检测项多等难题,同时对于检测边缘不规则的其他工件提供一个新思路。如何进一步提高算法的鲁棒性和准确性,实现实际复杂环境下的陶瓷过滤网尺寸和缺陷检测,将是下一步主要研究的工作。

参考文献

- [1] ZHANG Xiaoyu, SU Bingyang, JIANG Yue. Application of ceramic foam filter to automotive castings[J]. Modern Cast Iron, 2011, 31(S2): 48-51.
张效玉, 苏冰洋, 蒋玥. 泡沫陶瓷过滤技术在汽车铸件上的应用[J]. 现代铸铁, 2011, 31(S2): 48-51.
- [2] XIE Demao, WU Ziran, CHEN Chong, et al. Design and application of automatic welding machine in machine vision system[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(S1): 206-210.
谢德茂, 吴自然, 陈冲, 等. 自动点焊机中机器视觉系统的设计与应用[J]. 计算机应用, 2017, 37(S1): 206-210.
- [3] TAN Wen, FANG Miao, DUAN Feng, et al. Research and application of 3D laser flatness measurement system based on

- machine vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 241-249.
- 谭文, 方淼, 段峰, 等. 基于机器视觉的3D激光平面度测量系统的研究与应用[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 241-249.
- [4] ZHOU Jiang, REM Kun, SHUAI Yingqi, et al. Machine vision based defect detection on magnetic steel sheet[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(12): 1541-1546.
周江, 任锬, 帅英琦, 等. 基于机器视觉的磁钢片缺陷检测研究[J]. 机电工程, 2014, 31(12): 1541-1546.
- [5] WANG Yiwen, QU Guantong, LIU Xianli, et al. Image subtraction detection algorithm for surface defect of steel ball[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(10): 1699-1704.
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.
- [6] TAN Ping, LI Xufeng, XU Jinmei, et al. Catenary insulator defect detection based on contour features and gray similarity matching[J]. Journal of Zhejiang University, 2020, 21(1): 64-73.
谭萍, 李旭峰, 徐金梅, 等. 基于轮廓特征及灰度相似度匹配的接触网绝缘子缺陷检测[J]. 浙江大学学报, 2020, 21(1): 64-73.
- [7] WANG Hongyan, ZHU Limin, ZHANG Panjie, et al. Method for the detection of the piston side defect based on external contour registration[J]. Journal of Xidian University, 2019, 46(5): 75-83.
王红艳, 朱利民, 张潘杰, 等. 一种利用外轮廓配准的活塞侧面缺陷检测方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2019, 46(5): 75-83.
- [8] LIU Ruiling, ZHONG Dexing, HAN Jiuqiang. Bevel gear detection system with Multi-camera vision[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 1-7.
刘瑞玲, 钟德星, 韩九强. 汽车伞齿轮多目视觉检测系统与算法[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 1-7.
- [9] GUO Meng, HU Liaolin, ZHAO Jiangtao. Surface defect detection method of ceramic bowl based on kirsch and canny operator[J]. 2016, 36(9): 27-33.
郭萌, 胡辽林, 赵江涛. 基于Kirsch和Canny算子的陶瓷碗表面缺陷检测方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 27-33.
- [10] HAN Ming, WU Qingxiang, ZENG Xiongjun. Visual detection of minor gear defect based on deep learning[J]. Computer Systems & Applications, 2020, 29(3): 100-107.
韩明, 吴庆祥, 曾雄军. 基于深度学习的齿轮视觉微小缺陷检测[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(3): 100-107.
- [11] HUANG Fengrong, LI Yang, GUO Lanshen. Method for detecting surface defects of engine parts based on Faster R-CNN[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2020, 32(6): 883-893.
黄凤荣, 李杨, 郭兰申, 等. 基于Faster R-CNN的零件表面缺陷检测算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2020, 32(6): 883-893.
- [12] LIU Bin. Research on appearance defect detection system of foam ceramic filters for foundry [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
刘彬. 铸造用泡沫陶瓷过滤网外观缺陷检测系统研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [13] DAI Zhisheng, PAN Qing, ZHONG Xiaoyun. Work piece size and angle measurement based on machine vision[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(2): 27-29.
戴知圣, 潘晴, 钟小芸. 基于机器视觉的工件尺寸和角度的测量[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(2): 27-29.
- [14] ZHU Zhe. Rresearch on key technology of precise inspection of spring parts based on digital image [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019.
朱哲. 基于数字影像的弹簧零件精密检测关键技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.
- [15] ZHOU Jiayi, SHI Zhaoyao, NAN Haoxuan. Rapid sorting and inspecting system for plastic gears in production site [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(9): 2017-2026.
周佳艺, 石照耀, 南浩轩, 等. 面向生产现场的注塑齿轮快速分选检测系统[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 2017-2026.
- [16] WANG Tian. Size measurement system for fuel pump housing based on machine vision [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
汪田. 基于机器视觉的油泵壳体尺寸测量系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [17] ZHANG Shaowei. Research and application of edge detection algorithms based on machine vision [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
张少伟. 基于机器视觉的边缘检测算法研究与应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [18] LIU Yanju, LI Yungong, SONG Jianhui, et al. A shape context object recognition algorithm based on boundary markers [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2018, 37(6): 49-55.
刘砚菊, 李云功, 宋建辉, 等. 基于边界标记的形状上下文目标识别算法[J]. 沈阳理工大学学报, 2018, 37(6): 49-55.