

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210684

改进 Zernike 矩的亚像素圆孔类零件测量方法<sup>\*</sup>刘利平<sup>1,2</sup> 孙建<sup>1</sup> 孙文悦<sup>1</sup>

(1. 华北理工大学人工智能学院 唐山 063210; 2. 上海电子信息职业技术学院 上海 201411)

**摘要:** 为了提高圆孔类零件半径尺寸的测量精度,提出一种改进的 Zernike 矩亚像素圆孔类零件测量方法。首先对传统 Canny 算子进行改进,分别在图像输入、去噪、梯度幅值计算和阈值选取方式上进行了优化,实现圆孔中心像素级边缘坐标的粗定位;其次提取待测零件圆孔所在的目标区域边缘像素点,利用在 Ghosal 算法的基础上提出新的边缘判断条件和采用迭代法计算得到 Zernike 矩的最佳灰度阶跃阈值来判断并获取亚像素边缘点,且从灰度边缘模型的角度对误差进行了分析;最后利用最小二乘原理实现圆孔中心坐标和半径的高精度检测和测量。仿真结果表明,改进算法的圆心坐标相对误差在 0.02 pixels 范围内,半径的相对误差精度为 0.05 pixels 范围内。通过对几个不同零件的实际测量,实验结果表明,改进后的算法和原算法与人工测量值对比,改进后的算法相对误差值更低,得到的实际值更接近人工测量值,测量精度明显高于传统的 Zernike 矩算法,所达到的测量精度能够满足工业零件生产过程中的精度要求。

**关键词:** 视觉测量;Canny 算子;Zernike 矩;亚像素边缘检测;误差精度

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Measurement method of subpixel circular hole parts based on improved Zernike moment

Liu Liping<sup>1,2</sup> Sun Jian<sup>1</sup> Sun Wenyue<sup>1</sup>

(1. School of Artificial Intelligence, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

2. Shanghai Electronic Information Vocational and Technical College, Shanghai 201411, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of radius measurement of round hole parts, an improved Zernike moment sub-pixel measurement method of round hole parts is proposed. First of all, the traditional Canny operator is improved, and the image input, denoising, gradient amplitude calculation and threshold selection are optimized to realize the rough location of the pixel-level edge coordinates of the circular hole center. Secondly, the edge pixel of the target region where the round hole is located is extracted, the new edge judgment condition is put forward on the basis of Ghosal algorithm and the best gray step threshold of Zernike moment is calculated by iterative method to judge and obtain the sub-pixel edge point, and the error is analyzed from the point of view of gray edge model. Finally, the high precision detection and measurement of the center coordinate and radius of the round hole are realized by using the least square principle. The simulation results show that the relative error of the center coordinate of the improved algorithm is in the range of 0.02 pixels and the relative error accuracy of the radius is in the range of 0.05 pixels. Through the actual measurement of several different parts, the experimental results show that, compared with the manual measurement value, the relative error of the improved algorithm and the original algorithm is lower, the actual value obtained is closer to the manual measurement value, and the measurement accuracy is obviously higher than that of the traditional Zernike moment algorithm. The measurement accuracy can meet the accuracy requirements of the production process of industrial parts.

**Keywords:** vision measurement; Canny operator; Zernike moment; sub-pixel edge detection; error accuracy

## 0 引言

圆孔形零件是工业中的常用机械零件,广泛应用于各

种机械结构,圆孔的几何尺寸是否达标是判断该类零件是否合格的重要依据<sup>[1]</sup>,因此圆孔工件的检测是机械零部件检测中的一项重要内容<sup>[2]</sup>。现有的零件圆孔直径测量方法

收稿日期:2022-07-14

<sup>\*</sup> 基金项目:河北省省级科技计划(20327218D)项目资助

主要有通过内径千分尺、卡尺等测量工具的接触式测量法以及通过工具显微镜、孔径干涉测量仪、X 射线等工具的非接触式测量方法<sup>[3-4]</sup>。其中接触式测量法易受主观判断和测量工具的影响,效率低、抗干扰性差,且容易造成零件表面损伤<sup>[5]</sup>,还有一些非接触式测量方法的设备成本比较高,并且有些测量过程仍需要人工操作,测量效率较低,无法满足工业自动化生产在线检测的要求。基于机器视觉的测量方法则具有非接触、精度高、智能化等优势,能很好地满足工业需求,在尺寸测量环节上有着许多人工测量无法比拟的优势,且具有广阔的应用前景<sup>[6-8]</sup>。

在图像测量技术中,边缘检测作为圆孔视觉测量过程的核心技术<sup>[9]</sup>,直接影响着圆孔的在线检测精度。经典的像素级边缘检测算法通常基于微分算子进行计算,如 Canny 算子<sup>[10-11]</sup>、Sobel 算子<sup>[12]</sup>、Laplace 算子<sup>[13]</sup>等,尽管传统的边缘检测算法大多数对于检测像素级精度的边缘都是有效的,所实现的边缘提取已经能够满足某些场景下的测量精度,但是对于一些更精密的场景仍然不能达到要求,所以为了满足测量精度,我们将在像素级基础上进一步对亚像素进行研究。目前亚像素边缘检测算法主要分为插值法<sup>[14]</sup>、拟合法<sup>[15]</sup>和矩方法<sup>[16]</sup>。而基于矩的方法是亚像素级边缘检测研究中的热点,如灰度矩<sup>[17]</sup>、Zernike 正交矩<sup>[18-19]</sup>、Franklin 正交矩<sup>[20]</sup>等,其中 Zernike 正交矩被广泛应用。近年来,亚像素边缘检测技术在实际应用中得到了迅速的发展,刘悦等<sup>[21]</sup>在 Ghosal 提出的 Zernike 矩算法基础上采用最大类间方差法来获取最佳的阶跃阈值,同时结合 Sobel 算子对可能的边缘点进行精确定位,提高了边缘的亚像素精度。刘明佩等<sup>[22]</sup>依据二级初定位边缘点区间的不同提出了一种新的边缘判定依据,改进后的算法能更好的适应不同环境的变化,达到了更高的精度。巢渊等<sup>[23]</sup>通过对阈值的改进提出了一种改进的 Zernike 矩来对轴类零件进行测量,其测量精度能够满足工业零件生产要求。张晓林等<sup>[24]</sup>利用几何信息使用零阶矩阵就实现了被测物的亚像素定位,且改进后的算法比传统算法精度更高。

在综合分析边缘检测相关文献的基础上,本文采用像素级粗定位和亚像素精定位相结合的方式提出了一种改进的 Zernike 矩亚像素圆孔类零件测量方法。像素级粗定位在原 Canny 算法基础上进行改进,在图像输入、去噪、梯度幅值计算过程和阈值选取方式上进行了优化,使获得像素级边缘信息更加准确,边缘点更加连续,为后续亚像素边缘检测减少了工作量。在亚像素边缘精定位过程中对 Zernike 矩算法也进行了改进,在改进的 Canny 算法获取圆孔的像素级边缘点基础上进行精定位,同时对亚像素的边缘判定条件和最佳灰度阶跃阈值选取方式进行了优化,使获得的亚像素点更接近真实值,而且提高了系统的检测效率。最后利用最小二乘法对获得亚像素边缘点进行拟合来实现零件圆孔中心坐标的精定位和其半径真实值的计算。仿真和实验的数据表明,改进后的算法比传统算法具有更

高的检测精度和检测效率,能够满足工业自动化较高精度的测量需求。

## 1 像素级边缘粗提取

在像素级边缘粗提取过程中对传统 Canny 算子进行了改进,改进的算法优化了图像输入过程,同时针对传统算法图像去噪过程、梯度幅值计算、阈值选取方式上的不足分别进行了改进,最终使获得的像素级边缘点连续性更好,边缘信息也更加准确,为后续对边缘进行的精细定位提供了基础,减少了后续亚像素精定位的工作量。

### 1) 图像预处理的优化

图像在生成过程中难免会存在一定的噪声,噪声在进行边缘检测过程中也会造成精度的损失,使用噪声过滤器减少噪声的影响是一项必不可少的步骤,在使用均值滤波和高斯滤波对图像进行去噪处理过程中,两种算法均对图像边缘造成了不同程度的损伤和影响,但对图像进行中值滤波进行去噪时,可以更好的展现出图像的边缘细节而且运算量较小,加快了运算速度。因此本文将采用中值滤波对原始图像进行预处理,可以有效抑制原图像中的一些噪声,增加了图像的鲁棒性。

### 2) 图像去噪过程的改进

在对预处理过的图像进行像素级边缘点进行检测定位时,采用了自适应中值滤波的方式来完善传统 Canny 算法中高斯滤波去噪时处理图像边缘细节的不足,算法具体实施过程如下:

(1) 若  $f_{ij} < f_{med} < f_{max}$ , 转到步骤(2); 否则增大窗口的尺寸。若  $S_{ij}$  的尺寸小于  $S_{max}$  的尺寸, 则重复步骤(1); 否则输出。

(2) 若  $f_{ij} < f_{ij} < f_{max}$ , 则输出  $f_{ij}$ ; 否则输出  $f_{med}$ 。

(3)  $f_{max}$  和  $f_{min}$  是算法中噪声的检测和认定的基准, 如果  $f_{ij} < f_{med} < f_{max}$ , 则  $f_{med}$  不是噪声, 然后根据  $f_{ij} < f_{ij} < f_{max}$ , 判断  $f_{ij}$  是否为噪声, 当  $f_{med}$  与  $f_{ij}$  都不是脉冲噪声时, 优先输出  $f_{ij}$ 。

其中, 点  $(i, j)$  的灰度值为  $f_{ij}$ ,  $S_{ij}$  和  $S_{max}$  分别为当前工作窗口和当前窗口预设的最大窗口。  $f_{min}$ 、 $f_{max}$  和  $f_{med}$  分别表示为  $S_{ij}$  中灰度的最小值、最大值和中值。

### 3) 梯度幅值计算的改进

在边缘检测的算法中, 梯度的大小可以很好的将图片的像素变化情况反映出来, 改进的 Canny 算子改变了传统的梯度求导模板, 在像素 8 邻域内计算了  $x$ 、 $y$ 、 $45^\circ$  和  $135^\circ$  方向的一阶偏导数, 所以改进的模板比传统的模板在边缘定位中更准确且能更好的抑制噪声。具体算法如下:

$x$  方向的偏导数:

$$P_x = g(x+1, y) - g(x-1, y) \quad (1)$$

$y$  方向的偏导数:

$$P_y = g(x, y+1) - g(x, y-1) \quad (2)$$

45°方向的偏导数:

$$P_{45^\circ} = g(x-1, y+1) - g(x+1, y-1) \quad (3)$$

135°方向的偏导数:

$$P_{135^\circ} = g(x+1, y+1) - g(x-1, y-1) \quad (4)$$

则梯度方向  $\theta(x, y)$  为:

$$\theta(x, y) = \arctan \left[ \frac{P_y(x, y)}{P_x(x, y)} \right] \quad (5)$$

幅值  $M(x, y)$  为:

$$M(x, y) = \sqrt{P_x(x, y)^2 + P_y(x, y)^2 + P_{45^\circ}(x, y)^2 + P_{135^\circ}(x, y)^2} \quad (6)$$

#### 4) 阈值选取方式的改进

由人工经验确定阈值参数的传统 Canny 算子适应性差,在提取边缘过程中容易丢失部分的图像边缘信息,并伴随出现了伪边缘,在双阈值选取困难问题上,我们改进了传统 Canny 算法的阈值选择方式,采用了 Otsu 法(最大类间方差法)求取自适应双阈值来优化传统人工经验选取阈值的不足。具体算法如下:

设存在阈值  $T_h$  将图像所有像素分为  $C_1$ 、 $C_2$  两类,  $C_1$  和  $C_2$  灰度均值分别为  $m_1$  和  $m_2$ , 图像全局平均灰度值为  $m$ , 像素被分为  $C_1$  和  $C_2$  的概率分别为  $p_1$  和  $p_2$ , 则有:

$$\begin{cases} p_1 \times m_1 + p_2 \times m_2 = m \\ p_1 + p_2 = 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\sigma^2 = p_1(m_1 - m)^2 + p_2(m_2 - m)^2 \quad (8)$$

当  $\sigma^2$  最大时,获得最佳阈值的  $T_h$  作为双阈值的低阈值,选择  $0.5 \times T_h$  作为双阈值的低阈值。

## 2 传统的 Zernike 矩亚像素边缘检测算法

### 2.1 Zernike 矩原理

Zernike 多项式定义为:

$$V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm} e^{jm\theta} \quad (9)$$

式中:  $n \geq 0, n - |m|$  为偶数,  $|m| \leq n$ 。多项式  $R_{nm}$  表示如下:

$$R_{nm} = \sum_{s=0}^{\min(|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)! \rho^{n-2s}}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!} \quad (10)$$

图像  $f(x, y)$  的  $n$  阶  $m$  次 Zernike 矩定义如下:

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} \bar{V}_{nm}(\rho, \theta) f(x, y) dx dy \quad (11)$$

离散条件下,单位圆内图像  $f(x, y)$  的  $n$  阶  $m$  次 Zernike 矩又可定义为:

$$Z_{nm} = \sum_x \sum_y f(x, y) V_{nm}^*(\rho, \theta) \quad (12)$$

### 2.2 Zernike 矩亚像素边缘检测原理

建立的理想灰度阶跃边缘模型如图 1 所示。

图 1 中  $h$  为背景灰度值,  $k$  为阶跃高度,  $l$  为圆心到边缘的处置距离,  $\phi$  为垂线与  $x$  轴的夹角,  $h$  和  $h+k$  分别为

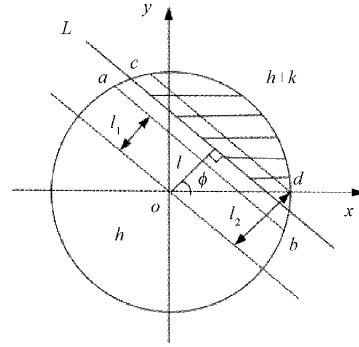


图 1 亚像素边缘检测理想模型图

直线  $L$  两侧的灰度值。旋转后的图像关于  $x$  轴对称, 设  $f'(x, y)$  为旋转后的图像, 则有:

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} f'(x, y) y dx dy = 0 \quad (13)$$

若将边缘旋转  $\phi$  后, 则旋转后的 3 个 Zernike 矩与原始图像的 3 个 Zernike 矩对应关系如下:

$$\begin{cases} Z'_{00} = Z_{00} \\ Z'_{11} = Z_{11} e^{j\phi} \\ Z'_{20} = Z_{20} \end{cases} \quad (14)$$

旋转  $\phi$  角度后  $Z'_{11}$  的虚部为 0, 则有:

$$\text{Im}[Z'_{11}] = \sin\theta \text{Re}[Z_{11}] - \cos\theta \text{Im}[Z_{11}] = 0 \quad (15)$$

式中:  $\text{Re}[Z_{11}]$ — $Z_{11}$  的实部;  $\text{Im}[Z_{11}]$ — $Z_{11}$  的虚部。则有:

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im}[Z_{11}]}{\text{Re}[Z_{11}]} \right] \quad (16)$$

因此, 可以进一步推出, 图像旋转后的各阶 Zernike 矩为:

$$Z'_{00} = h\pi + \frac{k\pi}{2} - k \sin^{-1}(l) - kl(\sqrt{1-l^2}) \quad (17)$$

$$Z'_{11} = \frac{2k(1-l^2)^{\frac{3}{2}}}{3} \quad (18)$$

$$Z'_{20} = \frac{2kl(1-l^2)^{\frac{3}{2}}}{3} \quad (19)$$

最后通过以上计算式, 可以得出理想边缘的 4 个参数分别为:

$$\begin{cases} h = \frac{Z_{00} - \frac{k\pi}{2} + k \arcsin l + kl(\sqrt{1-l^2})}{\pi} \\ k = \frac{3Z'_{11}}{2(1-l^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{3Z_{11}}{2(1-l^2)^{\frac{3}{2}}} e^{j\phi} \\ \phi_{n1} = \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im}[Z_{n1}]}{\text{Re}[Z_{n1}]} \right], n = 1, 3 \\ l = \frac{Z_{20}}{Z'_{11}} = \frac{Z_{20}}{Z_{11}} e^{-j\phi} \end{cases} \quad (20)$$

则单位圆在离散情况下采用  $N \times N$  模板进行采样时, Zernike 矩亚像素坐标计算公式为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{N}{2} l \begin{bmatrix} \cos\phi \\ \sin\phi \end{bmatrix} \quad (21)$$

### 3 改进的 Zernike 矩检测算法

在圆孔类零件进行亚像素边缘检测过程中对传统 Zernike 矩算法进行了改进,改进的算法在图像像素级边缘点的基础上进行亚像素级边缘点的提取,选用检测精度更高的 Zernike 矩参数模板,同时改进了传统的边缘判断条件和阈值选取方式,并详细阐述了改进后的算法实现过程步骤,表明了该方法能够准确提取出圆孔类零件的边缘信息点,且最佳阈值的自动选取相比于人工手动调试具有更高的效率,检测精度更高。

#### 3.1 Zernike 模板系数的选取

使用不同阶次的 Zernike 模板而得到 Zernike 矩的值在亚像素检测过程中直接影响着图像边缘检测精度,一般来说,选用的模板尺寸越大,检测精度也会越高,但相对于时间也会延长,综合考虑到论文的需要,将采用  $7 \times 7$  的 Zernike 矩参数模板,进一步提高算法的检测精度。

#### 3.2 Zernike 矩算法边缘判断条件的改进

改进的算法在 Ghosal 算法的基础上将  $Z_{00}$ 、 $Z_{11}$ 、 $Z_{20}$  扩展到  $Z_{31}$ 、 $Z_{40}$  系数模板,同时,采用新的边缘判断条件  $k \geq k_i \cap |l_2 - l_1| \leq l_i$  代替传统的边缘判断条件  $k \geq k_i \cap l \leq l_i$ 。具体算法如下:

$$Z'_{31} = k \left[ \frac{4}{5} l^2 (1 - l^2)^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{15} (1 - l^2)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (22)$$

$$Z'_{40} = k \left[ -\frac{2}{5} l (1 - l^2)^{\frac{3}{2}} + \frac{16}{15} l^3 (1 - l^2)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (23)$$

由式(18)、(19)、(22)、(23)推导得:

$$\begin{cases} l_1 = \sqrt{\frac{5Z'_{40} + 3Z'_{20}}{8Z'_{20}}} \\ l_2 = \sqrt{\frac{5Z'_{31} + 3Z'_{11}}{6Z'_{11}}} \\ k = \frac{3Z'_{11}}{2(1 - l_2^2)^{3/2}} \end{cases} \quad (24)$$

#### 3.3 Zernike 矩算法阈值选取的改进

针对传统 Zernike 矩算法中边缘阈值选取方式的不足和判断遍历到的像素点是否为边缘点过程繁琐的问题,传统算法中  $l_i = 1/\sqrt{2}$ ,在考虑模板效应后选择  $l_i \leq \sqrt{2}/N$  作为边缘判断条件;同时改进了原有算法的阈值判断方式,采用迭代法选取阶跃灰度的最佳阈值  $\tau$ 。具体算法步骤如下:

1) 初始值的选取

$$T_0 = (Z_{\min} + Z_{\max})/2 \quad (25)$$

式中:  $Z_{\min}$ 、 $Z_{\max}$  分别为图像中最小和最大的阶跃灰度值。

2) 图像由阈值  $T_k$  分为两部分,并分别求出两部分的平均阶跃灰度值  $Z_0$  和  $Z_G$ 。

3) 求解新阈值

$$T_{k+1} = (Z_0 + Z_G)/2 \quad (26)$$

4) 若  $T_k = T_{k+1}$ ,则阶跃灰度最佳阈值  $\tau = T_k = T_{k+1}$  迭代结束,否则  $k = k + 1$  转向步骤 2)。

### 3.4 改进后的算法具体实现

改进算法的具体实现步骤如下:

步骤 1) 采用传统的 Zernike 矩检测算法求得 5 个不同阶次的 Zernike 矩  $Z_{00}$ 、 $Z_{11}$ 、 $Z_{20}$ 、 $Z_{31}$ 、 $Z_{40}$  和旋转角参数  $\phi$ ;

步骤 2) 根据 Zernike 正交矩旋转不变的性质,计算得到  $Z'_{00}$ 、 $Z'_{11}$ 、 $Z'_{20}$ 、 $Z'_{31}$  和  $Z'_{40}$ ;

步骤 3) 根据  $Z'_{11}$ 、 $Z'_{20}$ 、 $Z'_{31}$  和  $Z'_{40}$  推导出  $l_1$ 、 $l_2$  和  $k$ ,并计算  $l_i$ ;

步骤 4) 将  $l_2$  代入  $k$  和  $h$  的公式中计算  $k$ ;

步骤 5) 改变原有判断阈值的方式,采用迭代法选取阶跃灰度的最佳阈值  $\tau$ ;

步骤 6) 采用新的亚像素边缘判断依据  $k \geq k_i \cap |l_2 - l_1| \leq l_i$ , 然后对采用改进的 Canny 算子获得像素级粗边缘点进行判别。符合  $k \geq \tau \cap l \leq l_i$  条件的则为边缘像素点,反之则不是。

## 4 误差补偿

针对传统 Zernike 算法边缘模型在检测过程中出现的误差,本文在实验过程中进行了误差补偿分析,使其获得的数据达到了更高的精确度。在对连续边缘进行离散采样时,多是认定在每个像素上的灰度值都是固定的,使得在计算边缘位置过程中出现了偏差,所以当采用理想二级阶跃边缘模型来获取亚像素边缘坐标时往往不符合实际情况,从而采用图 2 所示的理想三级阶跃边缘模型来更好的计算边缘位置,其中  $h$  为背景灰度,  $h + \Delta k$  为过渡阶段灰度,  $h + k$  为目标灰度,  $l_1$  和  $l_2$  分别为圆心到两个边缘的垂直距离,计算过程中若始终满足  $l_1 \leq l_2$ , 各参数之间的关系可近似表达为  $\Delta k/k = l_2 - l/l_2 - l_1$ , 则实际边缘  $l$  为  $l = l_2 - \frac{\Delta k}{k}(l_2 - l_1)$ 。

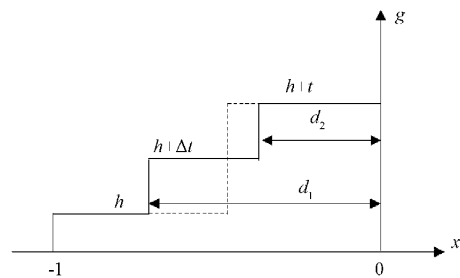


图 2 理想三级边缘模型

由理想二级阶跃边缘模型公式推导过程,同理得到如下公式:

$$A'_{00} = h\pi + k \left( \frac{\pi}{2} - l_2 \sqrt{1 - l_2^2} - \sin^{-1}(l_2) \right) + \Delta k [l_2 \sqrt{1 - l_2^2} + \sin^{-1}(l_2) - l_1 \sqrt{1 - l_1^2} - \sin^{-1}(l_1)] \quad (27)$$

$$A'_{11} = \frac{2k}{3} (1 - l_2^2)^{\frac{3}{2}} + \frac{2\Delta k}{3} [(1 - l_1^2)^{\frac{3}{2}} - (1 - l_2^2)^{\frac{3}{2}}] \quad (28)$$

$$A'_{20} = \frac{2k}{3}kl_2(1 - l_2^2)^{\frac{3}{2}} + \frac{2\Delta k}{3}[l_1(1 - l_1^2)^{\frac{3}{2}} - l_2(1 - l_2^2)^{\frac{3}{2}}] \quad (29)$$

从理论上可以根据上式推出边缘参数,但是在理想三级边缘模型基础上直接推导参数表达式是极其复杂的计算式,所以实际应用中仍然采用理想二级边缘模型的公式来计算更接近于实际的理想三级边缘模型,代入可计算出的理论边缘为:

$$l_m = \frac{A'_{20}}{A'_{11}} = \frac{\frac{\Delta k}{k}[l_1(1 - l_1^2)^{\frac{3}{2}} - l_2(1 - l_2^2)^{\frac{3}{2}}] + l_2(1 - l_2^2)^{\frac{3}{2}}}{\frac{\Delta k}{k}[1 - l_1^2]^{\frac{3}{2}} - (1 - l_2^2)^{\frac{3}{2}}} + (1 - l_2^2) \quad (30)$$

边缘模型造成的偏差  $E$  可由三级灰度模型获得的  $l_m$  与传统理想二级灰度阶跃模型获得的  $l$  作差计算得到,即:

$$E(l_1, l_2, \Delta k, k) = l - l_m = \frac{(l - l_1)(l - l_2)[(1 - l_2^2)^{\frac{3}{2}} - (1 - l_1^2)^{\frac{3}{2}}]}{(l - l_1)(1 - l_2^2)^{\frac{3}{2}} + (l_2 - l)(1 - l_1^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (31)$$

为了将亚像素边缘精度更加精确,将计算得到的偏差  $E$  对传统理想二级灰度阶跃模型计算得到的  $l$  进行补偿,从而实现亚像素边缘的更精确定位。

### 5 最小二乘法拟合圆

将上述一系列算法获得的亚像素边缘点利用最小二乘

法拟合出原图像中图形的图像坐标位置,其算法公式如下:

$$\begin{cases} Q(A, B, C, D, E) = \sum_{i=1}^N (Ax_i^2 + Bx_iy_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + 1)^2 \end{cases} \quad (32)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial A} = \frac{\partial Q}{\partial B} = \frac{\partial Q}{\partial C} = \frac{\partial Q}{\partial D} = \frac{\partial Q}{\partial E} = 0$$

$$x_0 = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \quad (33)$$

$$y_0 = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \quad (34)$$

$$r = \sqrt{\frac{2(Ax_0^2 + Cy_0^2 + Bx_0y_0 - 1)}{A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}} \quad (35)$$

式中:  $q(x_i, y_i)$  为离散的亚像素边缘点;  $N$  为离散的数;  $(x_0, y_0)$  为目标坐标位置;  $r$  为圆半径。

## 6 实验与数据分析

### 6.1 算法流程图

在改进的 Zernike 矩亚像素边缘模型的基础上,提出了对零件圆孔的亚像素检测算法,本文首先对图像进行预处理,采用改进的 Canny 算子对圆孔边缘进行像素级粗定位得到像素级边缘点,然后基于改进的 Zernike 矩亚像素边缘模型对圆孔边缘进行精定位,获得准确的边缘点亚像素坐标,最后根据最小二乘法原理将获得的目标体亚像素边缘坐标进行拟合,从而获得圆孔零件圆心坐标和半径长度。具体步骤如图 3 所示。

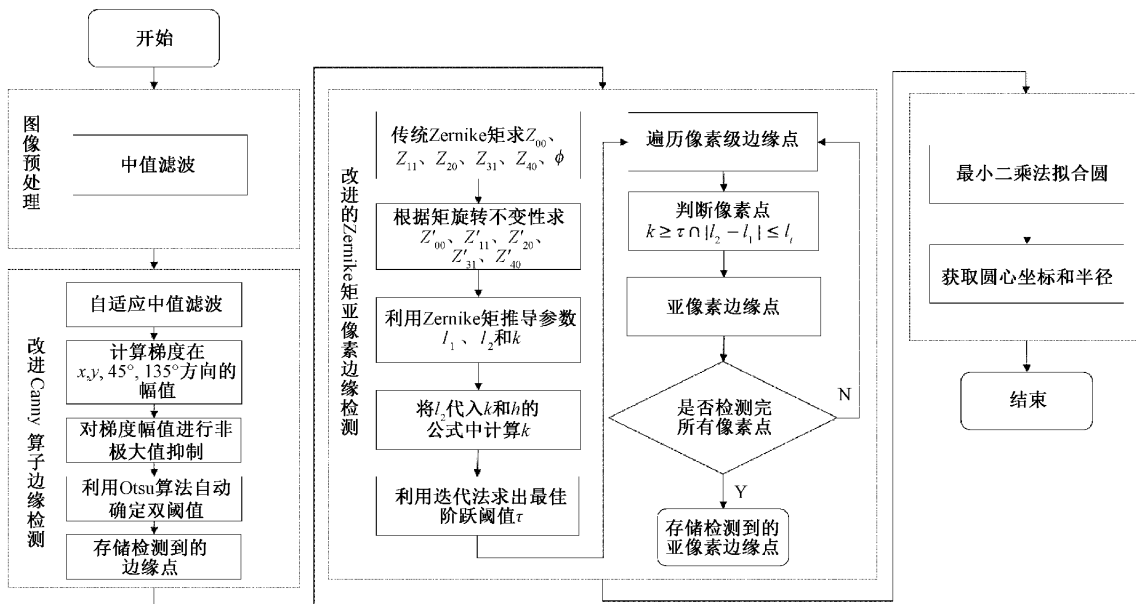


图 3 算法流程

### 6.2 仿真实验

实验平台系统为 Windows10, 软件为 JetBrains CLion 2018.3.4 版本, 编译环境为 MinGW, 处理器为 Intel(R)

Core(TM) i5-10210U, 内存为 12 GB。

在第 1 组仿真实验中, 制作了两个分辨率为  $256 \times 256$  的图像, 图像背景像素值 0, 第 1 个图中的圆心坐标

为(120.5,120),圆半径为 25 pixels,如图 4 所示;另一个图圆心坐标为(120.5,120),圆半径为 50 pixels,如图 5 所示。在实验过程中不断的改变仿真图像中圆的位置,然后分别采用传统的 Zernike 矩与改进的算法提取圆的亚像素边缘点并绘出圆的轮廓,然后将提取的亚像素坐标存储到 txt 文件中,最后利用最小二乘法拟合得到圆心坐标的位置及半径的大小,实验中获得数据如表 1、2 所示。

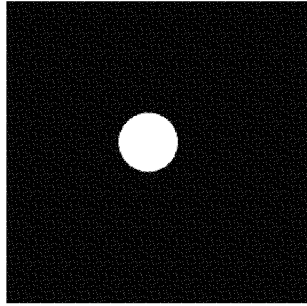


图 4  $r=25$  pixels 圆孔图

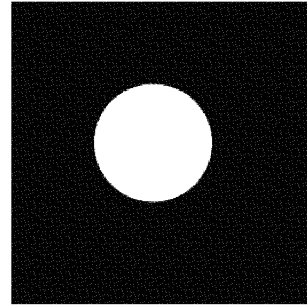


图 5  $r=50$  pixels 圆孔图

采用传统和改进算法对不同坐标和不同半径的圆进行仿真实验,表 1 记录了理想半径为 25 pixels 时不同圆心位置下通过改进前后两种算法获得的不同圆心坐标数据和半径像素值,表 2 记录了理想半径为 50 pixels 时不同圆心位置下通过改进前后两种算法获得的不同圆心坐标数据和半径像素值。由表 1 和 2 中获得的检测数据和对应的理想数据之间的误差进行分析可以得到:采用原算法获得

表 1  $r=25$  pixels 数据仿真数据记录表

pixel

图像理想数据		传统 Zernike 矩		改进算法	
圆心坐标	半径	圆心坐标	半径	圆心坐标	半径
(120.5,120)	25	(120.493,120.001)	25.101 2	(120.489,119.987)	25.038 8
(120.5,125)	25	(120.488,124.999)	25.101 0	(120.485,124.981)	25.039 0
(120.5,130)	25	(120.490,130.001)	25.101 0	(120.485,129.983)	25.039 1
(120.5,135)	25	(120.492,135.002)	25.101 1	(120.484,134.980)	25.038 9
(120.5,140)	25	(120.485,139.994)	25.101 2	(120.483,139.981)	25.038 7

表 2  $r=50$  pixels 数据仿真数据记录表

pixel

图像理想数据		传统 Zernike 矩		改进算法	
圆心坐标	半径	圆心坐标	半径	圆心坐标	半径
(120.5,120)	50	(120.463,120.021)	50.031 7	(120.490,119.995)	49.984 6
(120.5,125)	50	(120.462,125.020)	50.031 7	(120.490,124.993)	49.984 6
(120.5,130)	50	(120.462,130.020)	50.031 8	(120.490,129.995)	49.984 6
(120.5,135)	50	(120.463,135.020)	50.031 7	(120.491,134.995)	49.984 6
(120.5,140)	50	(120.463,140.021)	50.031 8	(120.491,139.997)	49.984 5

的数据与对应理想数据之间的圆心坐标误差在 0.038 pixels 范围内,而采用改进后的算法得到的圆心坐标误差在 0.020 pixels 范围内;采用原算法获得的数据与对应理想数据之间的半径像素值误差在 0.120 pixels 范围内,而采用改进后的算法得到的半径像素值误差在 0.040 pixels 范围内。通过对比分析得出改进后的算法相比改进前算法获得的误差更小,所以改进后的算法具有更高的精度,也更适用于对一些精密要求较高的零件生产过程。

### 6.3 应用测试与分析

为了验证算法的优越性和有效性,选用 500 万像素的 CCD 面阵黑白工业相机、25 mm 焦距镜头、上位机和传送

带装置在实验室搭建了图像的采集系统,其中上位机系统为 Windows10,图像处理软件为 JetBrains CLion 2018.3.4 版本,编译环境为 MinGW,处理器为 Intel(R) Core(TM) i5-10210U,内存为 12 GB。本文对在工厂获取的某一零件在实验室环境下进行实验测试,零件如图 6 所示,实验过程中,将零件内径和外径分割出来分别进行测量。

为了直观的对传统算法和改进算法的定性分析,采用传统和改进 Zernike 算法分别对图 6 零件的内外径轮廓进行亚像素边缘点提取,如图 7 所示,图 7(a)传统算法对零件内径的边缘提取图,图 7(b)为改进算法对零件内径的边缘提取图,图 7(c)传统算法零件外径边缘提取图,图 7(d)

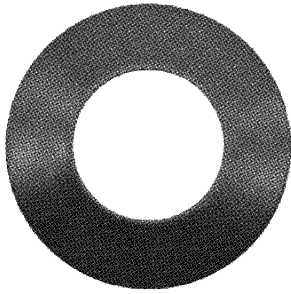
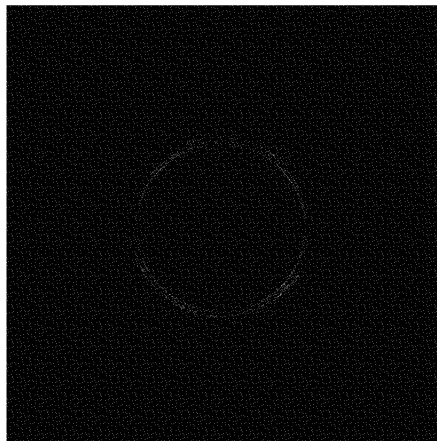


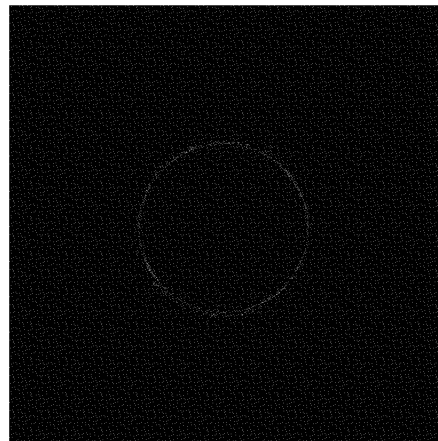
图 6 试验零件示意图

改进算法零件外径边缘提取图。由图 7 可以得出:改进前算法可以清晰的检测出零件内外径边缘轮廓,但是相对于改进后的算法丢失了一部分关键点信息,边缘噪声也比较多,而且在部分边缘上出现了轮廓点断裂,因此,改进后的算法更能够较好的进行尺寸测量,提取的精度也更高。

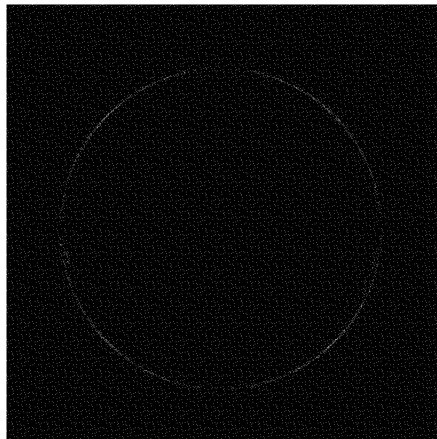
同时,在获得像素当量的情况下,采用改进前后的两种算法分别对不同零件的内外径尺寸进行测量,同时采用 0.02 精度的游标卡尺进行人工测量作为数据对比,传统 Zernike 矩算法与本文算法求得的圆孔类零件内外径尺寸



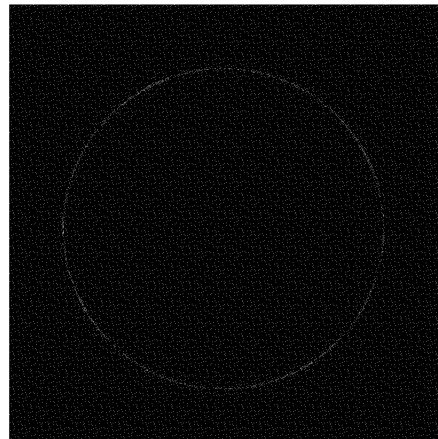
(a) 传统算法对零件内径边缘提取图



(b) 本文算法对零件内径边缘提取图



(c) 传统算法对零件外径边缘提取图



(d) 本文算法对零件外径边缘提取图

图 7 圆孔边缘提取图

测量结果,以及其与人工测量值的对比如表 3 所示。由表 3 不同零件的测量数据可得,采用 Zernike 矩亚像素检测算法得到的零件测量值精度相比人工测量的数据精度更高,改进后的算法和原算法与人工测量值对比,改进后的算法相对误差值更低,因此,采用改进后算法测量得到的实际值更

接近人工测量值,且测量精度也要高于传统的 Zernike 矩算法。因此,改进算法提出的新的边缘判断依据和最佳阈值选取方式相比于传统的判断依据和传统人工选取阈值的调试方式具有更高的精度和更高的检测效率,为后续测量算法应用到现场环境中提供了有效的理论基础。

表 3 不同圆孔类零件内外径测量结果

	人工测量	传统 Zernike 矩算法		相对误差/ %	改进 Zernike 算法		相对误差/ %
		像素值/pixel	实际值/mm		像素值/pixel	实际值/mm	
零件 1							
内径	5.20	157.550	5.258 4	1.123 0	155.746	5.198 20	0.034 6
外径	9.80	293.434	9.793 68	0.064 5	293.573	9.798 32	0.017 1
零件 2							
内径	6.72	203.390	6.788 38	1.017 6	201.243	6.716 7	0.049 1
外径	12.64	378.512	12.633 3	0.053 0	378.830	12.643 9	0.030 9
零件 3							
内径	7.16	213.850	7.137 48	0.314 5	214.554	7.160 98	0.013 7
外径	12.90	386.884	12.912 7	0.098 5	386.689	12.906 2	0.048 1
零件 4							
内径	6.96	210.120	7.013	0.761 5	208.607	6.962 49	0.035 8
外径	13.12	392.064	13.085 6	0.262 2	392.991	13.116 5	0.026 7

## 7 结 论

针对当前圆孔类零件视觉测量精度难以满足工业自动化中高精度测量的需求的问题,提出了一种改进的 Zernike 矩亚像素圆孔类零件内外径尺寸测量的方法。首先对传统 Canny 算子的图像输入过程、去噪过程、梯度幅值计算、阈值选取方式过程进行改进,实现了圆孔中心像素级边缘坐标的粗定位,然后提取待测零件圆孔所在的目标区域边缘像素点,采用改进的 Zernike 矩亚像素检测算法进行边缘点的精定位,改进的算法选用了检测精度更高的 Zernike 矩参数模板,同时对传统的边缘判断条件和阈值选取方式进行改进,最后通过最小二乘法拟合出圆孔类零件的内外径轮廓来实现尺寸的测量。本文算法在阈值选取方式和边缘判断条件上的改进较现有算法表现出自适应性更高、稳定性更强的优势,提高了检测效率和测量的精度,而且实验证明了本文算法较现有算法获得测量值与真实值之间的相对误差和绝对误差都更小,能够满足现代工业精密零件生产过程中所需的精度要求。

虽然本文算法实现了规则圆孔类零件内外径尺寸的测量,但是整个实验过程是在实验室环境下完成的,只是搭建了实验室环境下的测量系统,并未涉及到工业实际现场,对于工业复杂多变的现场环境中,精密零件视觉检测系统的硬件需要更高的要求,而且还应设计执行机构,将尺寸测量不合格的工件分拣出来。因此,设计更加完善的检测方案对于提高系统的运行和检测效率将是本文下一步的研究方向。

## 参考文献

- [1] 赵晓龙. 基于图像处理的机械零部件检测技术应用[J]. 科技创新与应用, 2018(12): 183-184.
- [2] 李智超. 基于机器视觉的孔组直径测量技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [3] 罗晓贺, 惠梅. 基于菲涅尔衍射的圆孔直径测量[J]. 激光与红外, 2018, 48(3): 379-383.
- [4] 李智超. 基于机器视觉的孔组直径测量技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [5] 王凯, 周律, 章佳佳. 基于机器视觉的圆孔零件内外径尺寸精密检测[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(9): 59-62.
- [6] 谢红, 廖志杰, 邢廷文. 一种非接触式的圆孔形零件尺寸检测[J]. 电子设计工程, 2016, 24(19): 155-158.
- [7] 罗云. 基于机器视觉的圆柱体零件尺寸精密检测[C]. 2010年重庆市机械工程学会学术年会, 2010.
- [8] 庞尔江. 机器视觉在测量领域的应用专利技术综述[J]. 传感器世界, 2018, 24(4): 7-13.
- [9] 李欣, 刘美秀, 刘迪. 复杂背景下高层建筑钢结构板孔心影像坐标量测[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(1): 143-147.
- [10] 陈明曦, 侯涛, 赵晏章, 等. 基于新型改进 Canny 算法的铁路边缘检测研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(11): 48-52.
- [11] 黄梦涛, 连一鑫. 基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 199-209.
- [12] 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): 138-143.
- [13] 陈思吉, 王晓红, 李运川. 改进 Laplace 的无人机图像边缘检测算法研究[J]. 测绘工程, 2021, 30(2): 36-44.
- [14] 任永强, 涂德江, 韩暑. 基于机器视觉的柴油机缸套尺寸测量[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(9): 151-153.
- [15] 艾裕丰, 赵敏, 张琪, 等. 基于亚像素边缘的棋盘格的角



- 点检测[J]. 西安理工大学学报, 2019, 35(3): 333-337.
- [16] 吴一全, 邹宇, 刘忠林. 基于 Franklin 矩的亚像素级图像边缘检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 221-229.
- [17] 阴法明, 王康, 赵力. 电缆护套厚度灰度矩亚像素测量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 128-133.
- [18] 陈黎艳, 熊强强. 光图像亚像素边缘高精度自适应检测研究[J]. 激光杂志, 2020, 41(11): 86-90.
- [19] HUANG C, JIN W, XU Q, et al. Sub-pixel edge detection algorithm based on canny-zernike moment method [J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2020, 29(15): 2050238.
- [20] 吴一全, 邹宇, 刘忠林. 基于 Franklin 矩的亚像素级图像边缘检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 221-229.
- [21] 刘悦, 朱均超. 基于改进 Zernike 矩的光斑图像亚像素边缘检测算法[J]. 激光杂志, 2021, 42(5): 32-35.
- [22] 刘明佩, 朱维斌, 叶树亮. 基于改进 Zernike 矩的小模数齿轮亚像素边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, (8): 259-267.
- [23] 巢渊, 唐寒冰, 刘文汇, 等. 基于改进 Zernike 矩的轴类零件尺寸测量方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(3): 169-176.
- [24] 张晓林, 周哲海, 王晓玲, 等. 基于改进 Zernike 方法实现圆形边缘亚像素检测[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(20): 157161.

### 作者简介

刘利平, 博士, 教授, 主要研究方向为基于模式识别技术的无损检测方法及应用。

E-mail: 11745430@qq.com

孙建(通信作者), 硕士, 主要研究方向为图像处理、机器视觉及模式识别。

E-mail: 1125439094@qq.com

孙文悦, 硕士, 主要研究方向为信号处理及模式识别。

E-mail: 564926869@qq.com