

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108545

基于改进 Zernike 矩的轴类零件尺寸测量方法^{*}

巢 渊 唐寒冰 刘文汇 朱俊杰 马成霞

(江苏理工学院机械工程学院 常州 213001)

摘要: 轴类零件尺寸视觉测量当前多采用像素级边缘检测算法,难以适应工业自动化高精度测量需求。为提高轴类零件轴径尺寸测量精度,提出一种基于改进 Zernike 矩的轴类零件尺寸测量方法。首先利用 Canny 边缘检测算法对轴图像进行粗定位,获取像素级边缘。其次,根据图像目标与背景间灰度差异,提出基于多阈值 Otsu 的 Zernike 矩最佳判定阈值获取方法,获取亚像素级边缘。最后,提出基于边缘点搜索的改进最小二乘法拟合轴图像边缘直线,获取轴径尺寸测量值。实验结果表明,以自行车后轴轴径尺寸测量为例,所提出算法相比传统 Zernike 矩方法稳定性更高,与人工测量值相对误差在 0.011% 以内,测量精度满足工业零件尺寸测量中自行车轴直径 6 级公差精度要求。

关键词: 亚像素边缘检测;Zernike 矩;直线拟合;视觉测量

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

Improved Zernike moment-based dimensional measurement method for shaft parts

Chao Yuan Tang Hanbing Liu Wenhui Zhu Junjie Ma Chengxia

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: Currently, pixel-level edge detection algorithms are mostly used in the dimension vision measurement for shaft parts, which can hardly be adapted to the high-precision measurement requirements of industrial automation. In order to improve the measurement accuracy of shaft diameter of shaft parts, a dimensional measurement method for shaft parts based on improved Zernike moment is proposed. Firstly, Canny edge detection algorithm is used for rough positioning in shaft images to obtain pixel-level edges. Then, in accordance with the grayscale difference between the target and the background information of the image, a method for obtaining the optimal decision threshold of Zernike moment based on the multi-threshold Otsu method is proposed to obtain sub-pixel edges. Finally, an improved least square method to fit the edge line of shaft images based on edge point search is proposed to obtain the measurements of the shaft diameter. The experimental results show that, taking the measurement of bicycle rear axle diameter as an example, the proposed algorithm has better stability than the traditional Zernike moment method, and the relative error with the manual measurement is less than 0.011%. The measurement accuracy of the proposed method can meet the accuracy requirement of 6-level of bicycle axle diameter in industrial parts dimension measurement.

Keywords: sub-pixel edge detection; Zernike moment; linear relation; vision measurement

0 引言

轴是一种传递运动和扭矩的关键零件,主要应用于轴承、车轮及齿轮等各部分零件的支撑连接。自行车后轴为固定心轴,只承受弯矩,不传递扭矩。与后轴装配的为棘轮机构,即自行车飞轮,后轴用于飞轮的支撑。后轴轴径尺寸

精度将直接影响到自行车飞轮的使用寿命、性能及状态^[1]。因此,后轴轴径尺寸的高精度测量具有重要意义。目前,轴径测量主要采用传统人工测量方法,存在效率低、可重复性差、测量种类单一等局限性,且无法针对测量结果进行快速分析与数据存储。机器视觉技术已在工业零件尺寸测量应用中得到了广泛的应用^[2]。作为非接触式测量的一种典型

收稿日期:2021-12-08

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51905235)、江苏省自然科学基金(BK20191037)、江苏省研究生实践创新计划(SJCX20_1045)、江苏理工学院研究生实践创新计划(XSJXC20_32)项目资助

方式,工件尺寸通常可通过工件图像的边缘信息获取^[3]。

边缘检测的实质是提取图像背景和前景目标的分界线,其分割边界即为图像边缘。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 Sobel 算子^[4]、Laplace 算子^[5]、Canny 算子^[6]等。随着工业生产对加工零件尺寸精度要求越来越高,像素级的边缘检测算法已很难满足实际测量的精度需求,越来越多的专家学者致力于亚像素边缘检测算法的研究。目前亚像素边缘检测算法主要分为 3 类:插值法^[7]、拟合法^[8]和矩方法^[9-15]。插值法的核心是对像素点的灰度值或其导数进行插值,增加边缘信息,以实现亚像素边缘检测。插值法计算复杂度低,计算量小,但其对噪声敏感,会使图像轮廓模糊。拟合法通过对假设边缘模型灰度值进行拟合,无需数值微分,按各灰度值到拟合曲线距离最小进行拟合,能够有效减小灰度误差,对噪声不敏感,但其模型复杂,计算量大。当前,矩方法是亚像素级边缘检测研究中的热点,如灰度矩^[9]、Zernike 正交矩^[10-14]、Franklin 正交矩^[15]等,其中 Zernike 正交矩被广泛应用。矩具有旋转不变性,对噪声敏感度低,通过计算 Zernike 矩边缘模型的阶跃灰度值、背景灰度值、圆心到图像边缘的垂直距离以及 x 轴与图像边缘垂线夹角等参数值,可求得亚像素坐标,获取精确图像边缘。为提高微小零件精确定位,文献[10]中提出一种调焦-Zernike 矩算法,建立粗调和精调相结合的调焦函数,应用归一化 Zernike 矩实现图像边缘精确定位。该方法可使非移动微型金属圆柱腔坐标定位精度达到 0.032 pixel,但该方法只适用于形状规则的微小型圆柱形金属零件测量,不适用于不规则零件。针对激光图像边缘位置模糊现象,文献[12]中提出一种高精度检测算法,先应用小波变换对图像边缘进行粗定位,再结合 Zernike 矩对边缘进行亚像素级定位,通过人工设定阈值保护图像弱边缘,其算法抑制噪声效果好,检测图像边缘准确率在 90% 以上。但该算法前期设定阈值需大量反复试验,适应能力较弱。

为提高轴类零件尺寸检测精度,本文研究提出一种改进 Zernike 矩亚像素边缘检测方法。首先,应用 Canny 算法对图像边缘进行粗定位,获取像素级边缘;然后,提出基于多阈值 Otsu 的 Zernike 矩最佳判定阈值获取方法,获取亚像素边缘;最后,提出基于边缘点搜索的改进最小二乘法拟合边缘直线。基于 30 mm 标准量块进行测量系统标定,根据系统像素当量及轴图像亚像素边缘及其拟合直线信息即可获得轴径测量值。工业生产与检测中,自行车后轴轴径需满足 6 级公差等级精度,即轴径在 10~18 mm 范围内,其 g6 公差精度要求为 $-17 \sim -6 \mu\text{m}$ ^[16]。本文以自行车后轴为研究与应用对象,将本文提出方法与传统 Zernike 矩方法进行对比,以验证本文方法的有效性。

1 算法原理

1.1 Zernike 矩边缘检测方法

在单位圆 ($x^2 + y^2 = 1$) 中,对于离散图像 $f(x, y)$ 的

n 阶 m 次的 Zernike 矩可以定义为:

$$Z_{n,m} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x,y) V_{n,m}^*(\rho,\theta) d_x d_y \quad (1)$$

式中: $\frac{n+1}{\pi}$ 为归一化函数,* 表示共轭, θ 为边缘与 x 方向的夹角, $V_{n,m}^*(\rho,\theta)$ 为积分核函数, n 和 m 都为整数且满足如下条件: $n \geq 0, n - |m|$ 为偶数且 $n \geq |m|$ 。如图 1 所示,为 Zernike 矩理想边缘阶跃模型^[17]。

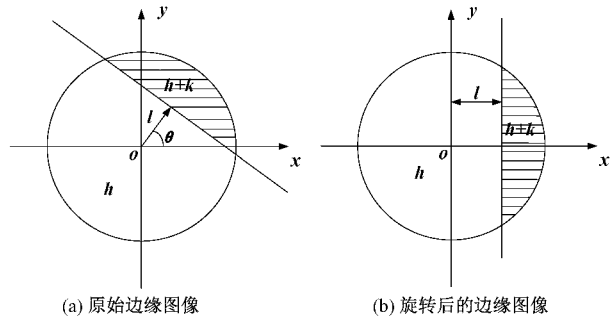


图 1 Zernike 矩理想边缘阶跃模型^[17]

因 Zernike 具有旋转不变性,假设坐标旋转 θ 角,则旋转后 Zernike 矩与旋转前矩的关系为 $Z'_{n,m} = Z_{n,m} e^{-jm\theta}$,由 Zernike 矩幅度旋转不变性可得:

$$\begin{cases} Z'_{1,1} = Z_{1,1} e^{-j\theta} \\ Z'_{0,0} = Z_{0,0} \\ Z'_{2,0} = Z_{2,0} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)中可知 Zernike 矩幅值不变,只有相角发生变化。根据 Zernike 矩的特性与定义可求得:

$$\begin{cases} Z'_{0,0} = \pi h + \frac{k\pi}{2} - k \arcsin l - kl \sqrt{1-l^2} \\ Z'_{1,1} = \frac{2k}{3} (1-l^2)^{\frac{3}{2}} \\ Z'_{2,0} = \frac{2kl}{3} (1-l^2)^{\frac{3}{2}} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可推导出边缘参数如式(4)所示,其中 k 为阶跃灰度, h 为背景灰度,阴影部分的灰度值则为 $h+k$, l 为圆心到图像边缘的垂直距离, θ 为 x 轴与图像边缘垂线的夹角:

$$\begin{cases} l = \frac{Z_{2,0}}{Z'_{1,1}} \\ k = \frac{3Z'_{1,1}}{2(1-l^2)^{\frac{3}{2}}} \\ h = \frac{Z_{0,0} - \frac{k\pi}{2} + k \arcsin l + kl \sqrt{1-l^2}}{\pi} \\ \theta = \arctan\left(\frac{\text{Im}[Z_{1,1}]}{\text{Re}[Z_{1,1}]}\right) \end{cases} \quad (4)$$

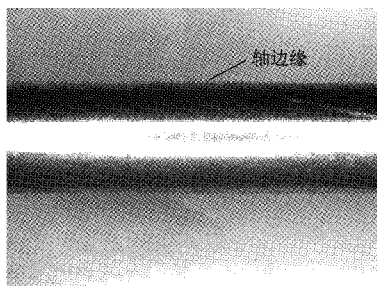
由于模板效应需要对亚像素坐标进行修正,因此可求得修正后图像亚像素边缘的位置为:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{A}{2} l \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: A 为模板大小, (x, y) 为单位圆中心坐标, (x_s, y_s) 为修正后图像的亚像素边缘坐标。模板的大小将直接影响边缘检测的精度,模板越大,检测精度越高,但其运行效率会变低^[18]。本实验对象自行车后轴轴径需满足 6 级公差等级精度,即轴径在 10~18 mm 范围内,其 g6 公差精度要求为 $-17 \sim -6 \mu\text{m}$ ^[16],拍摄图像分辨率为 $1\,944 \times 2\,592$,为能够在拍摄视野范围内满足尺寸精度要求,综合考虑轴图像边缘检测精度和算法运行效率等因素,本文采用的是 7×7 模板大小。

1.2 基于改进 Zernike 矩的亚像素边缘检测方法

传统 Zernike 矩边缘点判断条件为 $k \geq k_i \cap l \leq l_i$, 其中 k_i 为 k 的判断阈值, l_i 为 l 的判断阈值。 l_i 的取值范围比较小,根据模板效应一般取 $\sqrt{2}/A$ 。而 k_i 的取值范围较大,传统人工选取阈值的方法不易获取最佳边缘位置,阈值取小会导致噪声信息冗余,阈值取大则会造成边缘信息的丢失。针对上述问题,文献[19]提出应用 Otsu 法(最大类间方差法)获取图像最佳分割阈值,但该方法仅适用于图像单阈值分割,在实际工业应用中,复杂图像包含多个目标对象,单阈值分割无法得到最佳轴边缘位置。如图 2(a)所示,为采用前向照明方式获取的自行车后轴轴段图像,最佳边缘分割阈值应能够准确区分轴段与背景区域。如图 2(b)所示,单阈值分割导致轴段图像部分背景区域被误判为轴边缘,影响后续边缘检测精度。因此本文提出应用多阈值 Otsu 分割法,自适应获取最佳轴段边缘分割阈值,如图 2(c)所示,提高 Zernike 矩亚像素边缘检测算法的鲁棒性,从而实现轴段边缘位置与背景区域的准确区分,获取更精确的图像边缘数据信息。



(a) 原始图像



(b) Otsu 单阈值分割法



(c) Otsu 多阈值分割法

图 2 两种图像阈值分割结果

设图像像素数据矩阵的大小为 $m \times n$, 图像像素值为 i 的个数为 N_i , 则图像像素矩阵的总数 $S = m \times n$, 不同灰度值的像素在图像中出现的概率为 $P_i = N_i/S$ 。假设 k 个阈值 (t_1, t_2, \dots, t_k) 将图像分割成 $k+1$ 个不同的区域, 分别为区域 0, 区域 1, 区域 2, ..., 区域 k , 则每个区域的概率为:

$$\begin{cases} \omega_0 = \sum_{i=0}^{t_1} P_i \\ \omega_1 = \sum_{i=t_1+1}^{t_2} P_i \\ \omega_2 = \sum_{i=t_2+1}^{t_3} P_i \\ \dots \\ \omega_k = \sum_{i=t_k-1}^{255} P_i \end{cases} \quad (6)$$

$$\omega_0 + \omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_k = 1$$

每个区域的平均灰度值为:

$$\begin{cases} \mu_0 = \frac{1}{S \cdot \omega_0} \sum_{i=0}^{t_1} i \cdot S \cdot P_i = \frac{1}{\omega_0} \sum_{i=0}^{t_1} i \cdot P_i \\ \mu_1 = \frac{1}{S \cdot \omega_1} \sum_{i=t_1+1}^{t_2} i \cdot S \cdot P_i = \frac{1}{\omega_1} \sum_{i=t_1+1}^{t_2} i \cdot P_i \\ \mu_2 = \frac{1}{S \cdot \omega_2} \sum_{i=t_2+1}^{t_3} i \cdot S \cdot P_i = \frac{1}{\omega_2} \sum_{i=t_2+1}^{t_3} i \cdot P_i \\ \dots \\ \mu_k = \frac{1}{S \cdot \omega_k} \sum_{i=t_k-1}^{255} i \cdot S \cdot P_i = \frac{1}{\omega_k} \sum_{i=t_k-1}^{255} i \cdot P_i \end{cases} \quad (7)$$

整个图像的平均灰度值为:

$$\mu = \frac{1}{S} \sum_{i=0}^{255} i \cdot S \cdot P_i = \sum_{i=0}^{255} i \cdot P_i = \omega_0 \mu_0 + \omega_1 \mu_1 + \omega_2 \mu_2 + \dots + \omega_k \mu_k \quad (8)$$

则类间方差为:

$$\sigma^2(t_1, t_2, \dots, t_k) = \omega_0 (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu)^2 + \omega_2 (\mu_2 - \mu)^2 + \dots + \omega_k (\mu_k - \mu)^2 \quad (9)$$

最佳阈值 $(t_1^*, t_2^*, \dots, t_k^*)$ 应使类间方差最大:

$$\sigma^2(t_1^*, t_2^*, \dots, t_k^*) = \max_{0 < t_1 < t_2 < \dots < t_k < 255} \{\sigma^2(t_1, t_2, \dots, t_k)\} \quad (10)$$

为获取较为理想的 Zernike 矩边缘检测效果,经多次实验分析,本文采用三阈值 Otsu 分割法,最佳阈值 (t_1^*, t_2^*, t_3^*) :

$$(t_1^*, t_2^*, t_3^*) = \operatorname{argmax}_{0 < t_1 < t_2 < t_3 < 255} \{\sigma^2(t_1, t_2, t_3)\} \quad (11)$$

$$T_{\text{best}} = t_1^* \quad (12)$$

以 T_{best} 作为 k_i , 即 $k \geq T_{\text{best}}$ 。综上所述,基于改进 Zernike 矩自适应阈值选取的亚像素边缘检测方法,流程如图 3 所示,其实现步骤描述如下。

1) 对获取的轴图像进行高斯滤波平滑预处理,消除高斯噪声。

2) 应用 Canny 边缘检测算法对轴图像进行粗定位,获取像素级边缘。

3) 利用 Zernike 矩求取边缘参数 k, h, l, θ , 根据式(11)、(12)应用三阈值 Otsu 算法获取 Zernike 矩中参数的 k 最佳判定阈值 T_{best} , 最后根据 Zernike 矩边缘点判断条件进行精确定位,获取亚像素级边缘。

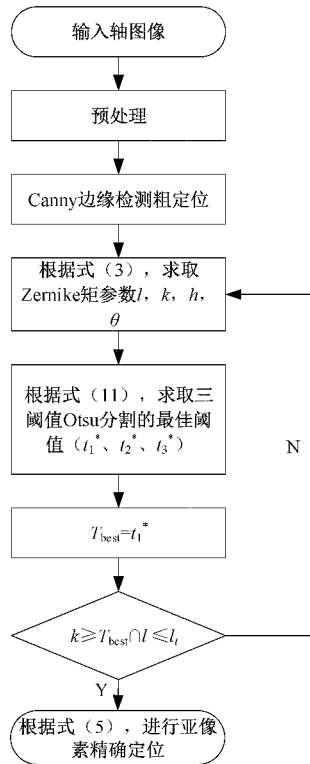


图 3 改进 Zernike 矩算法流程

1.3 改进最小二乘法拟合边缘直线

根据上述亚像素边缘检测流程,可获得如图 4 所示的改进 Zernike 矩亚像素边缘检测算法处理后得到的轴图像。轴径尺寸的测量,即可转换为求取轴径图像上下两条轮廓线的垂直距离,而轮廓线可通过边缘直线拟合的方式获得。

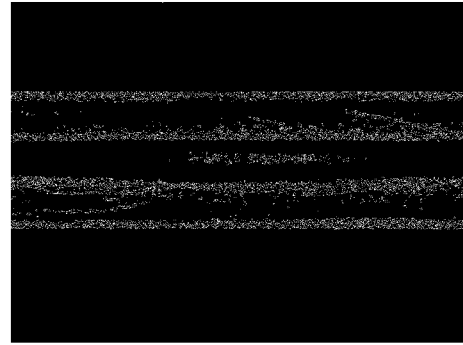


图 4 本文亚像素边缘检测算法检测后轴图像

从图 4 中可以看出,轴边缘数据被较好地保存,但受前向照明方式光照的影响,图中仍存在较多噪声点,直接采用最小二乘法易造成较大误差,难以准确拟合边缘点数据。针对此问题,本文提出一种遍历搜索与边缘点保存的方法,具体操作步骤如下。

1) 该图像是 1944×2592 大小的一个矩阵 A , 首先寻找轴图像所有上边缘点,从第 1 个像素点开始,从左至右,从上至下,遍历搜索像素值为 1 (即图 4 中的白色像素点) 且满足下列条件的点,如式(13)所示。

$$\text{length}(\text{find}(A(i+1, :) == 1)) > 30 \quad (13)$$

即像素点所在行的下一行像素值为 1 的个数应大于 30, 该条件可避免存储孤立噪声点。考虑轴零件定位用 V 型块装配精度,轴零件图像易出现一定程度的倾斜情况。因此,为防止边缘像素点判别丢失,以 10 行像素点为一个数组单位进行遍历搜索,将所有满足条件的像素点存放数组矩阵 B 中,并停止搜索。

2) 在数组 B 中包含了边缘像素点与其余噪声点,首先搜索每列第 1 个像素值为 1 的点,找到后将该像素点保存,并将该像素点所在列所有其他像素值为 1 的点置 0,将符合条件的像素点保存至数组 C 中,这些像素点即为搜索的轴图像上边缘点。

3) 同理可完成轴图像下边缘点的搜索。

如图 5 所示,为该方法过程示意图。

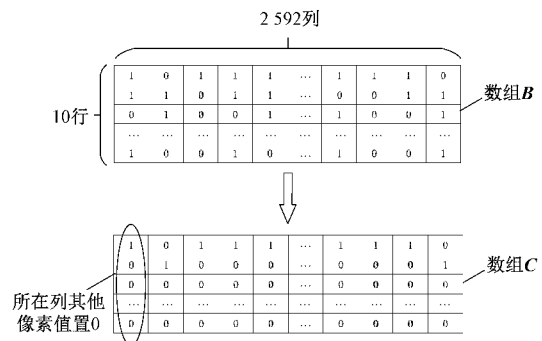


图 5 遍历搜索与边缘点保存方法过程示意图

找到轴图像上下边缘点后,利用最小二乘法拟合直线。在平面内,直线方程为 $y = kx + b$, k 为直线斜率, b 为截

距。设数组 C 中有 N 组数据 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N$, 用最小二乘法拟合直线时, 要求 $\sum_{i=1}^N [y_i - (b + kx_i)]^2$ 的值最小。该式分别对 k, b 求偏导得:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial k} \sum_{i=1}^N [y_i - (b + kx_i)]^2 \\ = -2 \sum_{i=1}^N [y_i - (b + kx_i)] x_i = 0 \\ \Rightarrow b \sum x_i + k \sum x_i^2 = \sum x_i y_i \\ \frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^N [y_i - (b + kx_i)]^2 \\ = -2 \sum_{i=1}^N [y_i - (b + kx_i)] = 0 \\ \Rightarrow bN + k \sum x_i = \sum y_i \end{cases} \quad (14)$$

解上述方程组便可求得直线参数 k 和 b 的最佳估计值。

$$\begin{cases} k = \frac{N(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \\ b = \frac{(\sum x_i^2)(\sum y_i) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \end{cases} \quad (15)$$

根据式(15)可拟合出边缘直线, 如图 6 所示, 为应用该方法拟合出轴段图像上下边缘直线, 从图 6 中可以看出, 拟合边缘线的效果较好。本文改进最小二乘法拟合直线流程如图 7 所示。

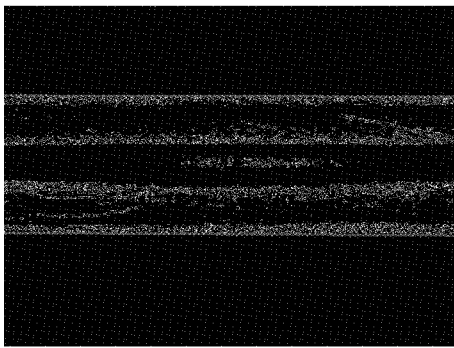


图 6 拟合直线后轴图像

1.4 轴类零件尺寸测量流程描述

在本测量系统中, 为精确获取轴径尺寸, 需对像素的实际物理尺寸进行标定, 即像素当量。为保证标定精度, 采用标准量块作为标定参照物^[20]。首先应用改进 Zernike 矩亚像素边缘检测算法对量块图像进行精确定位, 再应用改进最小二乘法拟合边缘直线, 然后在其中一条边缘线上随机取 100 个点, 求其到另一条边缘线上的距离, 取平均值作为量块图像像素距离。依据世界坐标系与像素坐标系之间的转换关系, 其量块像素尺寸与实际尺寸的比值即可求得像素当量。同理采用上述算法可获得轴图像边缘线之间像素距离, 依据系统像素当量即可获得轴径实际尺寸。如图 8 所示, 为轴径尺寸测量流程。

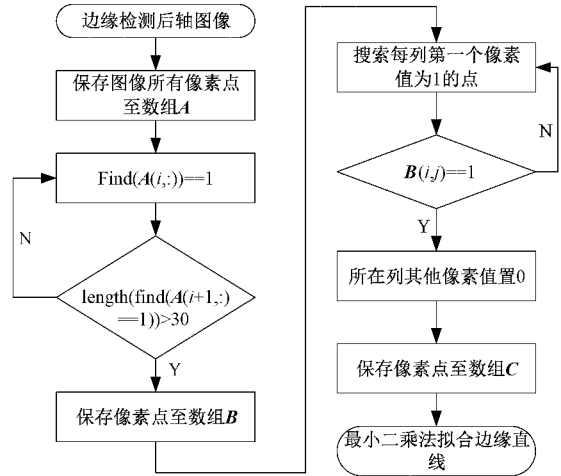


图 7 改进最小二乘法拟合直线流程

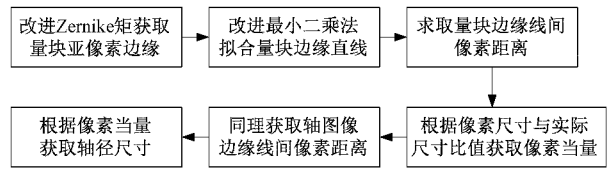


图 8 轴径尺寸测量流程

2 实验结果与分析

2.1 系统标定

本文的图像采集硬件装置主要包括 500 万像素 CCD 面阵黑白工业相机、16 mm 焦距镜头、可调环形白光源、上位机和轴零件定位用 V 型块。其中, 光源照明方式采用前向照明。上位机系统为 Windows10, 图像处理软件为 MATLAB 2016b 版本, 处理器为 Intel (R) Core (TM) i5-9400 CPU@2.90 GHz, 内存 16 GB。本文图像采集实验平台如图 9 所示。

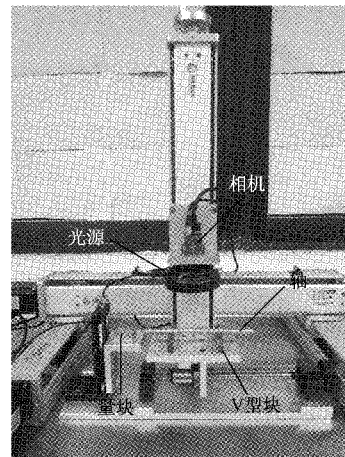


图 9 图像采集实验平台

为进行本文实验对象自行车后轴直径的测量, 首先要对本实验平台系统进行标定, 获得像素坐标系与世界坐

标系之间的转换关系。如图 10 所示,为由图像采集实验平台采集到的标准量块图像,该量块由 SHAHE 三和量仪生产,其横向尺寸为 30 mm,精度为 0.001 mm。

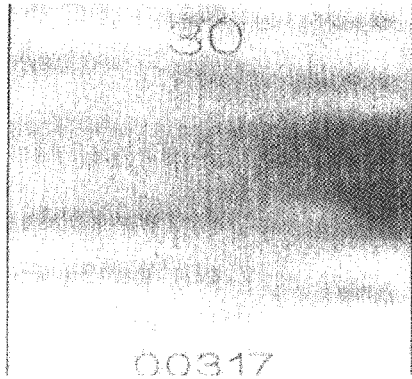
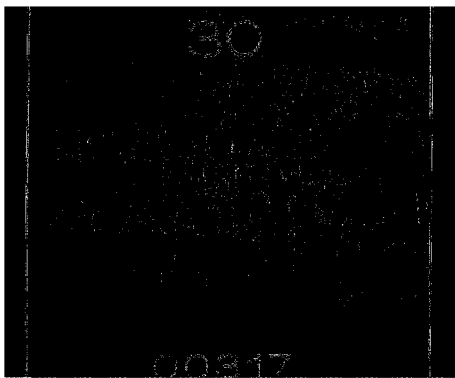
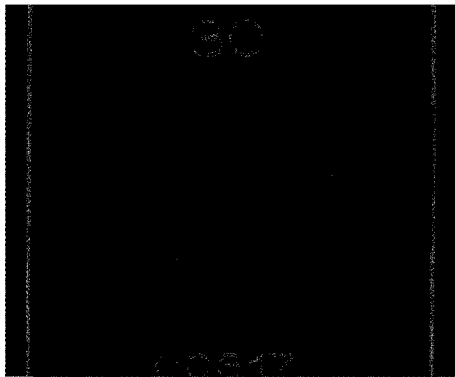


图 10 30 mm 量块图像

图 11 分别为传统 Zernike 矩与本文算法处理得到的量块亚像素边缘检测图像,通过对比可看出本文算法边缘检测后边缘更细腻,且噪点更少。由于量块存在倒角,边缘会体现一定的像素宽度,因此边缘直线的拟合采用最外侧的边缘像素。图 12 为由本文提出的改进最小二乘法拟合获得的直线图像。由边缘直线即可求取两直线之间的垂直距离。



(a) 传统 Zernike 矩算法边缘检测后量块图像



(b) 本文边缘检测算法检测后量块图像

图 11 传统 Zernike 矩与本文算法边缘检测结果

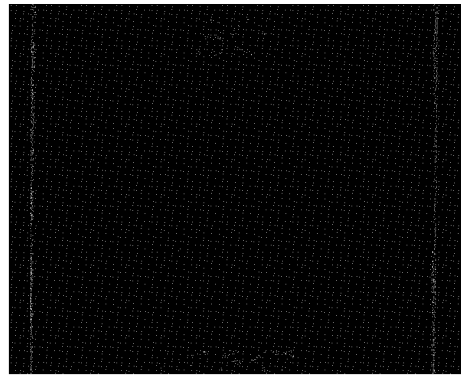


图 12 改进最小二乘法拟合边缘直线图像

理论上量块两边边缘直线应平行,但实际拟合得到的直线斜率可能存在略微差异。因此,在左边边缘线上随机选取 100 个点,求其到右边边缘线的距离,取其平均值作为量块在该像素坐标系下的宽度。通过 10 次重复测量实验,应用传统 Zernike 矩算法检测得到 30 mm 量块在像素坐标系下的宽度为 2 125.9 pixel,求得像素当量为 0.014 11 mm/pixel;应用本文算法检测得到 30 mm 量块在像素坐标系下的宽度为 2 130.1 pixel,求得像素当量为 0.014 08 mm/pixel。

2.2 轴径测量与误差分析

求得像素当量后,应用两种对比算法分别求取自行车后轴轴径尺寸。如图 13 所示,为自行车后轴实物图及本文实验测量轴段。该轴段部分与自行车后轴轴管配合,其轴段轴径需满足 6 级公差等级精度。

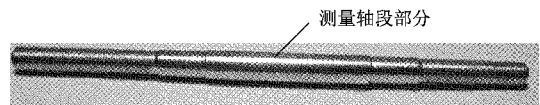


图 13 自行车后轴实物图

为验证本文算法的可靠性,采用精度为 0.002 mm 杠杆千分尺进行人工测量作为数据对比,测得轴段直径为 10.997 mm。传统 Zernike 矩算法与本文算法求得轴径尺寸结果,以及其与人工测量值的对比如表 1 所示。

由表 1 可知,应用传统 Zernike 矩算法求得轴径尺寸为 10.980 7 mm,误差均值为 16 μm,跟测量值的相对误差为 0.148%。应用本文算法求得轴径尺寸为 10.998 2 mm,误差均值为 1 μm,相对误差为 0.011%。从测量像素值数据中可以看出,传统 Zernike 矩方法与本文算法存在 3 个像素的差异,其原因是传统方法边缘判定阈值获取由于自适应,导致边缘信息丢失,无法更精确获取图像边缘。本文算法自适应获取最佳判定阈值,可有效提高 Zernike 矩边缘检测精度,通过改进最小二乘法拟合边缘直线,可有效提高边缘拟合的抗干扰能力与稳定性。3 种轴径检测方法的对比结果如图 14 所示,从图 14 中可以看出,本文算法与人工测量值结果更接近,精度高于传统 Zernike 矩边缘检测算法,且从表 1 方差数据也能够体现出本文算法具有更好的稳定性。

表 1 两种算法测量轴径尺寸结果

序号	传统 Zernike 矩测量的		本文算法测量的	
	像素值(pixel)与 实际值(mm)	像素值(pixel)与 实际值(mm)	像素值(pixel)与 实际值(mm)	像素值(pixel)与 实际值(mm)
1	778.260 7	10.981 3	781.104 6	10.998 0
2	778.266 4	10.981 3	781.099 1	10.997 9
3	778.163 8	10.979 9	781.137 0	10.998 4
4	778.269 4	10.981 4	781.109 9	10.998 0
5	778.226 1	10.980 8	781.124 7	10.998 2
6	778.181 0	10.980 1	781.118 0	10.998 1
7	778.230 0	10.980 8	781.093 2	10.997 8
8	778.249 3	10.981 1	781.139 5	10.998 4
9	778.165 9	10.979 9	781.132 4	10.998 3
10	778.181 8	10.980 1	781.138 2	10.998 4
平均值	778.219 4	10.980 7	781.119 7	10.998 2
方差		3.2×10^{-7}		5.3×10^{-8}
误差均值		0.016 3		0.001 2
相对误差/%		0.148		0.011

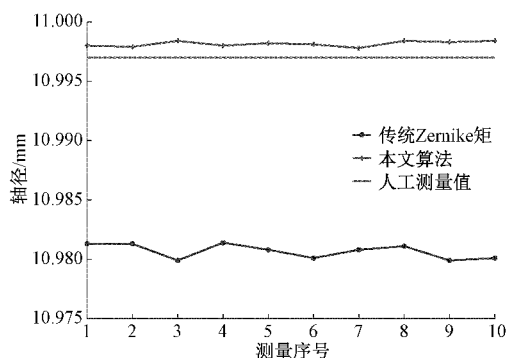


图 14 轴径测量结果对比图

3 结 论

本文针对像素级边缘检测算法无法满足轴类零件高精度测量的问题,提出一种基于改进 Zernike 矩的轴类零件尺寸测量方法。在获取亚像素级边缘阶段,提出了一种基于多阈值 Otsu 分割法的 Zernike 矩最佳判定阈值获取方法,改进了原始图像存在多目标对象无法获取精确边缘的问题,其自适应性更强。在拟合图像边缘直线阶段,提出了一种基于边缘点搜索的改进最小二乘法,改善了因光照产生噪声而导致边缘误判的问题,提高了直线拟合的精度。实验结果表明,本文算法与人工测量值相对误差控制在 0.011% 以内,相比于传统 Zernike 矩方法精度更高,稳定性更强,能够满足工业零件尺寸测量中自行车后轴直径 6 级公差精度要求。现代工业零件尺寸视觉测量的实时应用,对测量精度与效率都有着较高的要求。因此,如何作好算法测量精度与实时性的平衡,以适应高速高精度视觉测

量应用,将是本文下一步深入研究的方向。

参考文献

- [1] 何云林. 普通后轴型式规格尺寸的计算方法[J]. 中国自行车, 1993(4): 18-19.
- [2] 唐寒冰, 巢渊, 刘文汇, 等. 基于机器视觉的大尺寸零件测量方法研究综述[J]. 电子测量技术, 2021, 44(17): 33-40.
- [3] 余以兵. 应用机器视觉精确检测电子连接器引脚尺寸的研究[J]. 电子世界, 2017(7): 22-23, 26.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 段锁林, 殷聪聪, 李大伟. 改进的自适应 Canny 边缘检测算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(6): 1645-1652.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 张亚军. 基于调焦-Zernike 矩算法的微小零件精确定位研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 87-92, 109.
- [11] YANG H, PEI L. Subpixel edge detection algorithm of the glass bottle based on Zernike moments[C]. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2011, 80: 1345-1349.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] XIE X, GE S, XIE M, et al. An improved industrial sub-pixel edge detection algorithm based on coarse and precise location[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020, 11(5): 2061-2070.
- [15] 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.
- [16] 中华人民共和国轻工业部质量标准司. 自行车 普通前轴和后轴:QB/T 1883-1993[S]. 北京:中国轻工业出版社, 1994.

- [17] 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, 39(8): 259-267.
- [18] DENG A W, GWO C Y. Efficient computations for generalized Zernike moments and image recovery[J]. Applied Mathematics and Computation, 2018, 339: 308-322.
- [19] 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.
- [20] 苗建伟, 谭庆昌, 李莲芝. 基于机器视觉的汽车阶梯轴轴段长度测量系统[J]. 工程与试验, 2020, 60(1): 60-61, 71.

作者简介

巢渊, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为机器视觉测量与检测、机电一体化装备智能控制技术。

E-mail: chaoyuan@jsut.edu.cn