

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306694

基于改进亚像素算法的陶瓷天线 PIN 针在线精密检测*

柴瑞武 陈 乐 何海森

(中国计量大学机电工程学院 杭州 310018)

摘 要:陶瓷天线 PIN 针作为天线中重要的零部件之一,其尺寸偏差将直接关系到天线的产品质量。为了实现 PIN 针的在线精密检测,设计研发了一种 PIN 针在线检测装置,并提出了一种基于改进亚像素算法的 PIN 针尺寸检测方法。首先开始采集图像并进行像素当量标定,对图像进行畸变校正、获取 ROI 区域、图像预处理,然后利用基于改进 Sobel 算子及高斯峰值位置估算的亚像素边缘检测算法提取边缘点,利用最小二乘法将边缘点拟合成一对平行直线,并计算出线间像素宽度,根据像素当量换算得到被测 PIN 针在 ROI 区域处的直径尺寸。实验结果表明,该方法的测量平均相对误差小于 0.25%,在保证 ± 0.005 mm 检测精度的同时,其平均耗时相对于传统基于高斯拟合的亚像素检测算法缩短了 64.32%。

关键词:陶瓷天线 PIN 针;在线检测;亚像素算法;图像处理

中图分类号: TP391; TN98

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 520.6040

Online precision detection of ceramic antenna PIN needle based on improved sub-pixel algorithm

Chai Ruiwu Chen Le He Haisen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: As one of the important components in the antenna, the ceramic antenna PIN needle, its size deviation will directly affect the product quality of the antenna. In order to realize the fast and precise online detection of PIN needles, an online detection device for PIN needles was designed and developed, and a PIN needle size detection method based on an improved sub-pixel algorithm was proposed. First, start to collect images and perform pixel equivalent calibration, perform distortion correction on the image, obtain ROI area, and image preprocessing, then use the sub-pixel edge detection algorithm based on the improved Sobel operator and Gaussian peak position estimation to extract edge points, and use the least squares method, then the edge points are fitted into a pair of parallel straight lines, and the pixel width between the lines is calculated, and the diameter of the measured PIN needle at the ROI area is obtained by converting the pixel equivalent. The experimental results show that the average relative error of this method is less than 0.25%. While ensuring ± 0.005 mm detection accuracy, its average time is reduced by 64.32% compared to traditional sub-pixel detection algorithms based on Gaussian fitting.

Keywords: ceramic antenna PIN needle; online detection; sub-pixel algorithm; image processing

0 引 言

随着陶瓷工艺技术的飞速发展和应用,低温共烧陶瓷技术以其组装密度高、频率特性好、批量加工一致性高等优点,迅速成为新一代微波器件加工的重要手段^[1],所以陶瓷天线成为了新一代天线产品。PIN 针作为天线

中重要的零部件,其产品广泛应用在汽车、电脑、家电、医疗器械、导航、无人飞行器等领域。

陶瓷天线 PIN 针属于高精密的产品,其尺寸公差要求小于 ± 0.01 mm,目前大部分厂家检测工作都是使用千分尺等工具目测抽检完成的。由于 PIN 针生产自动化程度高,其日产值可以达到 60×10^4 枚,人工检测速度慢,容易漏检,并受检测人员的主观因素影响,导致尺寸检测的

误差随机性大^[2]。陶瓷天线 PIN 针的表面通常需要镀银,而一枚 PIN 针的质量出现问题,则整批 PIN 针都面临报废,这将会带来巨大的成本浪费。

综上所述,开发一套检测速度快、精度高、成本低、操作简单的 PIN 针在线检测系统急为迫切。而当前机器视觉广泛应用于识别、检测、测量的工业领域,基于机器视觉的零件在线检测就可以很好地完成大批量、高精度、高效率的要求^[3]。在视觉检测的研究中,提高精度除了直接提高相机的分辨率之外,还可以利用亚像素算法^[4-6]从算法层面突破了硬件参数的限制。亚像素算法是将像素这个基本单位再进行细分^[7],通过不同算法把边缘定位到十分之一,甚至百分之一像素单位的精度上,从而间接提高检测设备的精度^[3]。对于高效率的要求,由于传统基于曲线拟合亚像素边缘检测方法^[8]定位精度高,但是检测速度慢,可以利用非拟合的寻优方法来进行改进,从而减小其时间成本。

本文针对 PIN 针产品质量检测问题,提出了一种基于改进亚像素算法的陶瓷天线 PIN 针在线精密检测方法并研发了相应的检测装置。并通过实验验证分析本文方法在 PIN 针在线检测方面的优越性。

1 系统总体设计

由于待检测 PIN 针上直径为 1.30 mm,下直径为 0.81 mm,长度为 15 mm,所以相机视野范围可以定为 20 mm×15 mm。系统精度要求 ± 0.01 mm,假设系统的像素当量为 0.005 mm/pixel,则相机分辨率至少为 4 000×3 000 pixels。检测速度要求达到 200 个/min,每两个 PIN 针至少间隔 25 mm,则传送装置运行速度至少为 84 mm/s,相机帧率不得低于 5 帧^[9]。

本文所设计的陶瓷天线 PIN 针尺寸检测系统分 3 部分:1)上下线运动控制;2)图像采集系统;3)运算判定处理等。总体结构如图 1 所示。

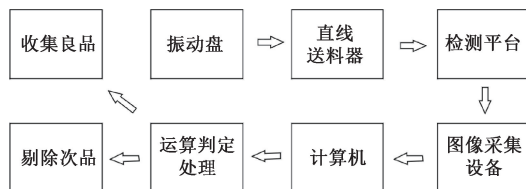


图 1 总体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram

上下线运动控制部分包括:通过振动盘加定制导轨将 PIN 针有序且呈垂直状态地输送至由可调速遥控电动转盘、圆环载物台组成的检测平台,其中由一个自动阀门控制上料的节拍速度。PIN 针直立与圆环载物台上,由电动转盘带动通过图像采集系统。最后根据测量结果将

PIN 针分为合格品和不合格品。其中不合格品由喷气枪喷出圆环载物台,合格品由一块弧形挡板按一定轨迹排出检测平台。

本文采用海康威视的 MV-CH120-10UM 工业相机并搭配海康 MVL-KF5028-12MP 工业镜头以垂直于 PIN 针侧面进行图像采集。相机分辨率为 4 096×3 000 pixels,帧率为 23.1 fps,相机标定后的像素当量为 0.00517 mm/pixel。使用海康威视的 MV-LBPS-100-50-W 型面光源,加上型号为 DAK-24V-2T 的模拟光源控制器为测量系统提供稳定背光源。为了防止环境光对光照条件造成的影响,在检测平台及图像采集系统部分外面套上防光黑箱,黑箱内壁上设有一层防反光的幕布。实物及工件在线测试时采集的图像如图 2 所示。

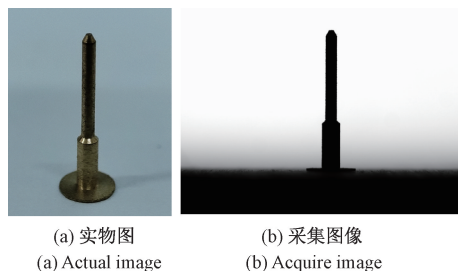


图 2 PIN 针图像

Fig. 2 PIN image

上下线运动控制及图像采集系统可以保证系统总体可以正常运行,并且连续采集到 PIN 针图像,而 PIN 针在线检测系统性能的关键在于测量算法的判定处理效果,测量算法的优劣主要受边缘检测精度的影响,因此,边缘定位的准确性在整个系统中尤为重要。

2 改进的亚像素边缘检测算法

传统的基于高斯拟合的亚像素算法,可以实现高精度的边缘检测,其目标定位精度高于像素级定位。但是由于拟合法计算量大、拟合迭代次数多带来的计算时间成本大的劣势^[3],并不适合应用于在线检测生产线。实际上,亚像素边缘定位最主要工作就是找到梯度值最大位置^[10],因此,本节提出了一种改进的基于高斯峰值位置估算的亚像素边缘定位方法。

2.1 基于高斯拟合的亚像素算法

通常情况下,亚像素边缘点存在于图像中灰度值逐渐过度变化的区域^[11-12],且实际边缘的一阶导数也就是梯度值服从高斯分布,可以利用拟合的方法获得边缘点的亚像素位置,整体流程如图 3 所示。进行边缘的亚像素定位前,通常先要将边缘精确定位到一个像素精度,常用像素级边缘检测算法有 Canny 算子^[2]或其改进算法^[13]。

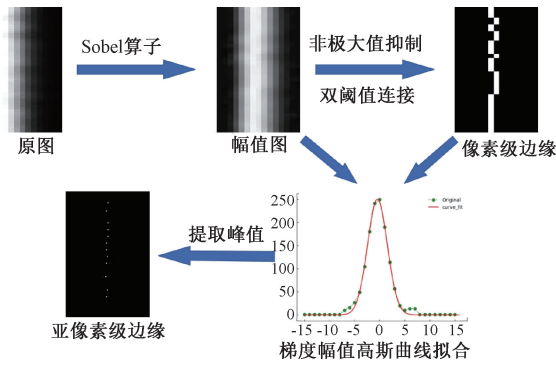


图 3 基于高斯拟合的亚像素算法流程

Fig. 3 Subpixel algorithm flow based on Gaussian fitting

Canny 边缘检测包含如下 4 个步骤:1)对原始灰度图像 $f(m,n)$ 进行高斯模糊降噪。2)求取图像梯度图,一般采用 Sobel 算子对图像进行梯度幅值 $R(m,n)$ 与梯度方向 $\theta(m,n)$ 计算。3)通过获取的梯度幅值和方向对图像边缘进行非极大值抑制操作。4)最后,进行双阈值边界跟踪。

得到像素级边缘点之后,就可以进行亚像素边缘定位。在像素级边缘上沿目标边缘点的梯度方向上选取 16 个点进行高斯曲线拟合计算,其高斯函数描述为:

$$z_j = z_{\max} \cdot \exp \left[-\frac{(x_j - x_{\max})^2}{L} \right] \quad (1)$$

其中, $j = 1, 2, 3, \dots, 16$, x_j 为第 j 个点的横坐标位置, z_j 为第 j 个点的梯度幅值, $z_{\max}$, $x_{\max}$ 和 L 分别为梯度幅值峰值,峰值位置和半宽度信息。

根据拟合式(5)得到 $z_{\max}$, $x_{\max}$ 以及 L ,再根据梯度方向求出峰值纵坐标位置 $y_{\max}$,即可确定亚像素边缘坐标 $(x_{\max}, y_{\max})$ 。

2.2 改进的亚像素算法

考虑到经典的 Sobel 算子只计算水平和垂直两个方向的梯度,其梯度方向是根据计算得到的两个梯度比值求反正切确定的,这样确定的梯度方向并不能准确代表真实的梯度方向^[7]。因此本文在 Sobel 算子的基础上设定了 8 方向梯度卷积模板,如图 4 所示。

$$S_1 = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 3 \\ -5 & 0 & 5 \\ -3 & 0 & 3 \end{bmatrix}, S_2 = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 5 \\ -3 & 0 & 3 \\ -5 & -3 & 0 \end{bmatrix}, S_3 = \begin{bmatrix} 3 & 5 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -5 & -3 \end{bmatrix}, S_4 = \begin{bmatrix} 5 & 3 & 0 \\ 3 & 0 & -3 \\ 0 & -3 & -5 \end{bmatrix}$$

$$S_5 = \begin{bmatrix} 3 & 0 & -3 \\ 5 & 0 & -5 \\ 3 & 0 & -3 \end{bmatrix}, S_6 = \begin{bmatrix} 0 & -3 & -5 \\ 3 & 0 & -3 \\ 5 & 3 & 0 \end{bmatrix}, S_7 = \begin{bmatrix} -3 & -5 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 5 & 3 \end{bmatrix}, S_8 = \begin{bmatrix} -5 & -3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 \\ 0 & 3 & 5 \end{bmatrix}$$

图 4 8 方向梯度卷积模板

Fig. 4 8-direction gradient convolution template

其中, $S_1 \sim S_8$ 分别是梯度方向为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 对应的方向模板。8 方向梯度卷积

模板改进后的 Sobel 算子计算图像梯度 $R(m,n)$ 的公式为:

$$R(m,n) = \max(S_q \cdot f'_{3 \times 3}(m,n)) \quad (2)$$

其中, $q = 1 \sim 8$, $f'_{3 \times 3}(m,n)$ 为图像 $f(m,n)$ 在 (m,n) 处的一个 3×3 领域。此时,梯度方向 $\theta(m,n)$ 为 8 个方向梯度卷积模板与对应 3×3 领域卷积得到最大值时的 k 值所对应的模板方向。

同时,由于高斯曲线是一个轴对称图形,且以峰值位置确定的中心线为对称轴^[8],提出了一种基于高斯峰值位置估算的亚像素边缘定位方法。高斯峰值位置估算的原理就是通过找到每个点的近似对称点^[14],进而求出每对对称点连线的中心点,最后取所有求出来的中心点坐标平均值得到高斯曲线峰值的估算值。

选取在像素级边缘上坐标为 (m,n) 的点为目标边缘点 P_0 ,并沿梯度方向两端各取 8 个点,加上 P_0 共 17 个点,命名为 $P = (P_{-8}, \dots, P_{-1}, P_0, P_1, \dots, P_8)$,其梯度分布分为两种情况, $R_{-1} < R_1$ 以及 $R_{-1} > R_1$,假设 $R_{-1} < R_1$,如图 5 所示。

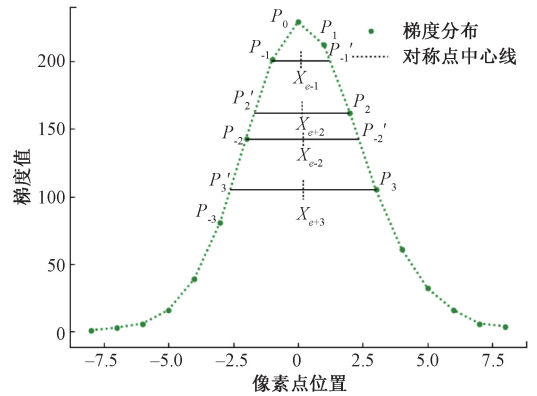


图 5 高斯峰值位置估算原理

Fig. 5 Schematic diagram of Gaussian peak position estimation

高斯峰值位置估算的关键是找到 P 集合中除了顶点和次顶点外的每个点的近似对称点。在图 5 中,假设每两个点之间的距离为 1 个单位,其横坐标表示每个点到 P_0 的相对位置坐标,纵坐标为该点梯度值,例如 P_n 的坐标为 (n, R_n) 。其中 P_{-1} 的近似对称点 P'_{-1} 位于 P_1 和 P_2 的连接线上,其横坐标 $x(P'_{-1})$ 以及 P_{-1} 与其近似对称点 P'_{-1} 的中心点坐标 x_{e-1} 求解如下:

$$x(P'_{-1}) = 1 + \frac{R_1 - R_{-1}}{R_1 - R_2} \quad (3)$$

$$x_{e-1} = \frac{x(P_{-1}) + x(P'_{-1})}{2} = \frac{R_1 - R_{-1}}{2(R_1 - R_2)} \quad (4)$$

同理,可以求得 P 集合中除了顶点和次顶点外的所有点的近似对称点以及各近似对称点与其对应点的中心点坐标,将所有中心点坐标求和取平均值得到 P_0 点的亚

像素偏移值 x_e , 总体求解公式如下:

$$x_e = \frac{1}{4(k-1)} \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{R_i - R_{-i}}{R_i - R_{i+1}} - \frac{R_{-i} - R_{i+1}}{R_{-i} - R_{-i-1}} + 4 \right) \quad (5)$$

其中, k 表示沿目标边缘点 P_0 梯度方向两端各取的点的个数, 本文在 P_0 梯度方向两端各选取了 8 个点, 则 k 值为 8。

上述推导得到了当 $R_{-1} < R_1$ 时, P_0 点的亚像素偏移值 x_e 的求解公式, 同理可得, 当 $R_{-1} > R_1$ 时, P_0 点的亚像素偏移值 x_e 的求解公式如下:

$$x_e = \frac{1}{4(k-1)} \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{R_{-i} - R_i}{R_{-i} - R_{-i-1}} - \frac{R_i - R_{-i-1}}{R_i - R_{i+1}} + 4 \right) \quad (6)$$

将偏移值反映到图像坐标系中就可以得到 P_0 点的亚像素坐标 $(x_{subpixel}, y_{subpixel})$, 公式如下:

$$\begin{cases} x_{subpixel} = m + x_e \cdot \frac{\cos^2 \theta}{|\sin \theta| + |\cos \theta|} \\ y_{subpixel} = n + x_e \cdot \frac{\sin^2 \theta}{|\sin \theta| + |\cos \theta|} \cdot (-1)^{\sin 2\theta} \end{cases} \quad (7)$$

式中: θ 为 P_0 点的梯度方向。

为了直观体现本文高斯峰值位置估算结果的准确性, 将其与高斯拟合的曲线峰值进行对比, 如图 6 所示。

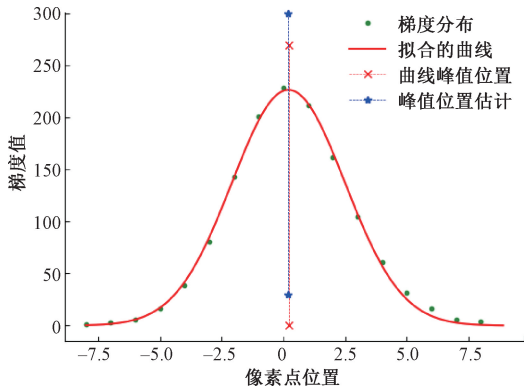


图 6 高斯峰值位置估算结果

Fig. 6 Gaussian peak position estimation results

本节提出的基于高斯峰值位置估算的亚像素边缘定位方法在保证定位精度的同时, 其计算复杂程度大大降低。

3 PIN 针尺寸检测算法设计

前文提出的改进的亚像素边缘定位方法实现了高精度、高效率的边缘检测, 在此基础上, 进一步设计完整的检测算法。基于改进亚像素算法的陶瓷天线 PIN 针尺寸检测算法流程如图 7 所示。

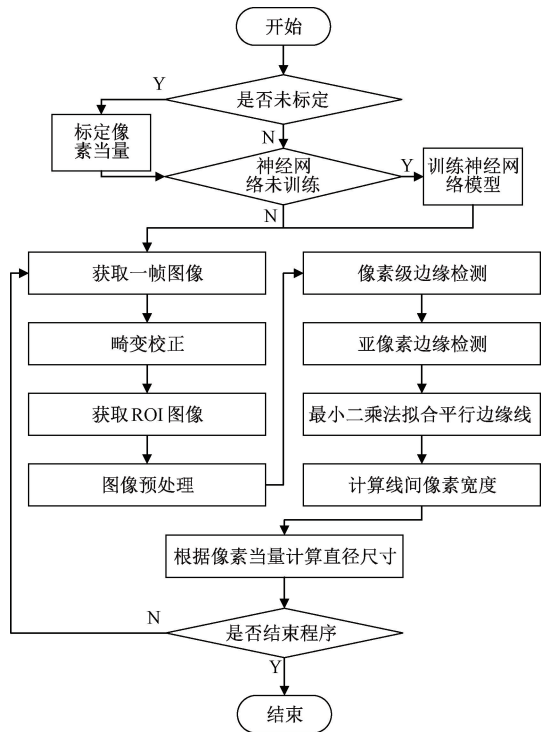


图 7 陶瓷天线 PIN 针尺寸检测算法流程

Fig. 7 Flow chart of ceramic antenna pin size detection algorithm

3.1 畸变校正

畸变校正采用经典的张正友标定法, 棋盘格的规格确定为 16×20 个格子, 单个格子边长为 1 mm, 精度为 0.001 mm。根据张正友标定法得到的相机内外参数矩阵以及坐标系转换关系式^[15]可以对相机采集的图像进行畸变矫正。

3.2 ROI 选取及图像预处理

1) 选取 ROI 区域

感兴趣区域 (region of interest, ROI) 是从被处理图像中以多种方式提取出所需要处理的区域^[16]。本文对 PIN 针的尺寸检测主要针对其上下两段直径, 因此需选取 2 个 ROI 区域。选用 YOLO-X 目标检测算法获取 PIN 针图像的 ROI 区域。将当前相机采集到的 PIN 针图像经过畸变校正后输入 YOLO-X 网络进行预测得到 ROI 提取效果如图 8 所示。

2) 图像预处理

以 PIN 针上直径为例, 首先, 将 ROI 图像格式转换为适用于 OpenCV 处理的图像格式, 由于测量算法关心的是图像中的灰度信息, 并不关心颜色信息, 所以对图像进行灰度化处理。灰度化处理后, 对图像进行高斯滤波去噪。图像预处理结果如图 9 所示。

3.3 亚像素边缘检测

根据 2.2 节, 首先由改进的 Sobel 算子计算得到梯度

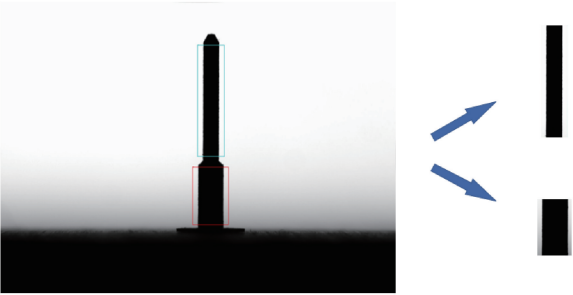


图 8 ROI 提取结果

Fig. 8 ROI extraction result graph

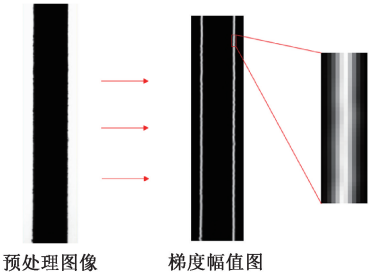


图 9 梯度幅值计算结果

Fig. 9 Gradient amplitude calculation results

幅值和梯度方向。得到的梯度幅值图如图 9 所示。

然后进行非极大值抑制和双阈值边界跟踪来获得图像的像素级边缘。进行高斯峰值位置估算,得到亚像素边缘。由于亚像素坐标为浮点型数据,无法在图像中显示。为了直观地表现亚像素边缘定位结果,本文将亚像素坐标放大 10 倍,然后取整,并将其表示在图像上,边缘检测结果如图 10 所示。

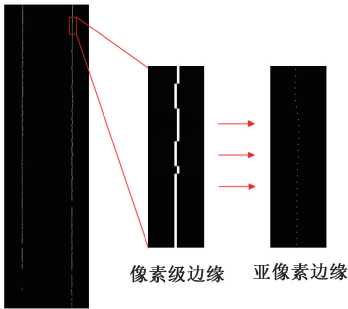


图 10 边缘检测结果

Fig. 10 Edge detection results

3.4 PIN 针直径尺寸计算

在图像中,尺寸大小都是以像素为单位的,所以需要
对像素当量进行标定^[17],并且每次开机需要标定一次。
本文通过已知尺寸的 PIN 针用文中的方法进行处理得到
像素尺寸,根据实际尺寸(单位:mm)与像素尺寸(单位:

pixel) 的比值^[16-18]就可以得到系统的像素当量为:
0. 00 517 mm /pixel。

经过亚像素边缘检测之后,可以得到目标图像的亚
像素边缘点集,该点集分为横坐标集合 X 以及纵坐标集
合 Y 。由于其边缘点分为左右两部分,为了计算 PIN 针
的直径尺寸,需要将左右两部分边缘各拟合一条直线。

首先,将边缘点集 X 和 Y 根据 X 集合的平均值分为
两部分,右半部分为 X_r 和 Y_r ,左半部分为 X_l 和 Y_l 。假设
两条拟合直线 L_l 和 L_r 的方程为式(8),根据拟合准则
式(9),求出 2 条拟合直线^[19]。

$$\begin{cases} L_l: y_l = a_l x_l + b_l \\ L_r: y_r = a_r x_r + b_r \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^q (a_l \times X_l[i] + b_l - Y_l[i])^2 \\ \min \sum_{i=1}^q (a_r \times X_r[i] + b_r - Y_r[i])^2 \end{cases} \quad (9)$$

其中, q 为亚像素边缘点个数, a_l 和 a_r 为直线斜率,
 b_l 和 b_r 为直线截距。

最小二乘法拟合直线之后,就可以进一步求解直径
尺寸。其拟合的 2 条直线方程为式(8),选取直线 L_r 上
的两个端点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 然后根据点线间距
公式:

$$D_i = \frac{|a_l x_i - y_i + b_l|}{\sqrt{a_l^2 + (-1)^2}} \quad (10)$$

分别求出 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 到直线 L_l 的像素距离
 D_1 和 D_2 ,取平均值得到 L_l 和 L_r 之间的平均间距 D , 然后
根据像素当量 pm 和式(11) 计算得到实际直径尺寸
 d ^[20]。

$$d = \frac{D}{pm} \quad (11)$$

整体检测最终结果如图 11 所示。

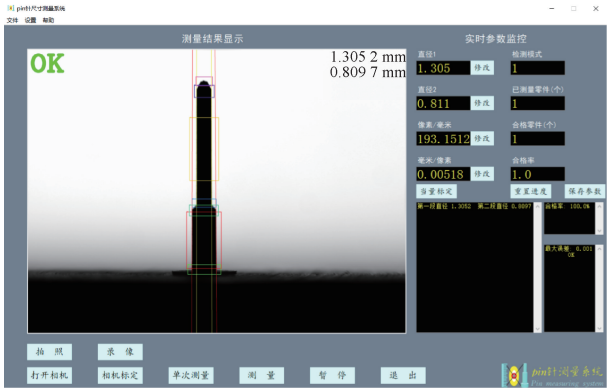


图 11 最终结果

Fig. 11 Final result

4 实验结果与分析

4.1 实验环境

本文实验以 Intel i5-11260H 6 核 12 线程 CPU、DDR4 3 200 MHz 16 GB 内存、Windows10 操作系统的计算机为硬件平台;开发环境为 Python3.8,结合 OpenCV4.5.5 图像处理函数库以及 Numpy1.20.3 科学计算库进行算法验证,并使用 Tkinter 工具包设计 GUI,以 PyCharm2021 作为软件平台。

本文设计的软件界面如图 11 所示,其中包括图像采集及显示模块,用于采集被测 PIN 针的图像、图像的预处理和显示测量结果;ROI 提取模块,用于深度学习框架获取 PIN 针的 ROI 区域并剔除图像冗余信息;标定模块,用于对像素当量进行标定;测量模块,用于亚像素边缘检测以及利用最小二乘法在亚像素边缘图中拟合零件平行边缘线,计算所述平行边缘线之间的间距;参数监控及保存模块,用于实时跟踪测量进度并显示关键参数,对参数进行本地保存。

本文设计的实验装置如图 12 所示,为了方便展示,图中将防光黑箱暂时卸下。

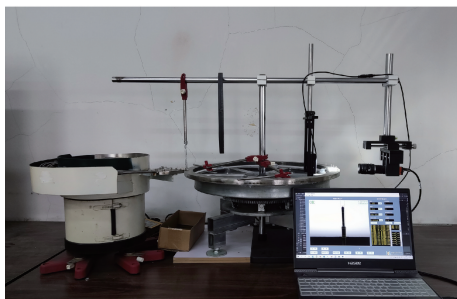


图 12 PIN 针检测装置

Fig. 12 PIN needle detection device

4.2 实验结果分析

为了验证本文所提出的基于高斯峰值位置估算改进的亚像素算法的精度及性能优势,用该算法对采集的 PIN 针图像进行直径尺寸检测后,通过螺旋测微仪测得其真实尺寸进行测量误差对比及分析,通过同一批 PIN 针样本横向对比像素级测量算法和传统高斯拟合亚像素测量算法的检测平均相对误差及平均耗时,实验结果如图 13 所示。

通过以上数据的分析,可以看出本文改进的基于高斯峰值位置估算的亚像素算法的检测相对误差对比传统基于高斯拟合的亚像素算法相差不大,明显优于像素级测量算法。其中,像素级算法、基于拟合的亚像素级算法以及本文改进的算法的测量平均相对误差分别为

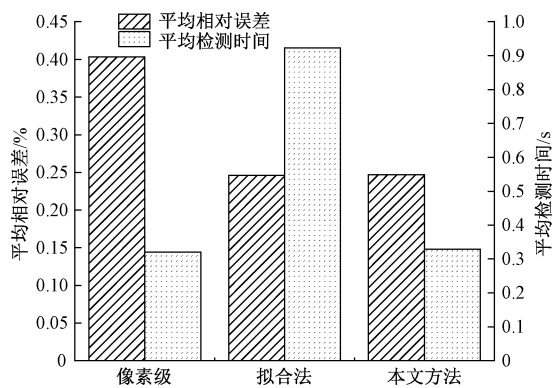


图 13 实验结果

Fig. 13 Experimental result

0.40%、0.25%、0.25%,检测精度为 ± 0.005 mm。其平均耗时相对于传统的拟合法缩短了 64.32%,与像素级检测算法不相上下。相当于同时拥有了亚像素算法的高精度以及像素级算法的高效率。因此本文的改进亚像素检测算法优势明显。

5 结论

本文利用上下线运动控制装置以及图像采集系统连续采集陶瓷天线 PIN 针的图像数据,结合各种运算判定处理算法对图像进行畸变校正、目标识别、边缘提取和尺寸检测,实现了在无接触条件下对陶瓷天线 PIN 针的高精度在线检测。

针对传统陶瓷天线 PIN 针尺寸初检方法,从本质上进行改进:从千分尺等工具目测检测到基于机器视觉的自动检测。经验证,其测量平均相对误差小于 0.25%,平均检测时间为 0.329 s。

提出了一种基于高斯峰值位置估算的亚像素边缘检测算法,在检测精度上与基于高斯拟合的亚像素算法不相上下,但是在计算速度上有较大地提升。经验证,其平均耗时相对于传统的拟合法缩短了 64.32%。

提出了一种基于改进亚像素算法的陶瓷天线 PIN 针在线精密检测方法,该方法不仅具有学术价值,更具有实用价值,可推广应用于类似 PIN 针的高精度、大批量的零件检测。

参考文献

- [1] 徐自强,郑轶,杨邦朝,等. 小型化低温共烧陶瓷片式天线研究[J]. 电波科学学报, 2011, 26(5): 850-854.
- XU Z Q, ZHENG Y, YANG B CH, et al. Compact chip antenna based on LTCC technology[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(5): 850-854.

- [2] 邢雪亮, 甘文波, 蒋朝根. 基于机器视觉的航空铆钉尺寸检测技术[J]. 计量学报, 2020, 41(5): 518-523.
- XING X L, GAN W B, JIANG CH G. Technology of size detection of air rivets based on machine vision[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(5): 518-523.
- [3] 刘凌霄, 王德成, 程鹏, 等. 基于改进亚像素算法的弹簧内外径尺寸检测[J]. 光学技术, 2021, 47(5): 587-593.
- LIU L X, WANG D CH, CHENG P, et al. Spring inner and outer diameter dimension detection based on improved sub-pixel algorithm[J]. Optical Technique, 2021, 47(5): 587-593.
- [4] 牛鹏磊. 高精度图像测量系统研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
- NIU P L. Research on high-precision image measurement system [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021.
- [5] 杜港, 佟强, 侯凌燕, 等. 基于 Canny-Franklin 矩的亚像素边缘检测方法[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-16.
- DU G, TONG Q, HOU L Y, et al. Sub-pixel edge detection method based on Canny-Franklin moments[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems: 1-16.
- [6] 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.
- YIN F M, WANG K, ZHAO L. Sub-pixel edge detection algorithm based on gray-moment for thickness measurement of cable sheath material[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 128-133.
- [7] WANG ZH CH, WANG ZH, HUANG N H, et al. An improved Canny-Zernike subpixel detection algorithm[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2022, 2022.
- [8] 刘红涛, 陆安江, 彭熙舜, 等. 光照不均匀下的工件图像亚像素边缘检测[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(10): 1-7.
- LIU H T, LU AN J, PENG X SH, et al. Subpixel edge detection of workpiece images under uneven illumination[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(10): 1-7.
- [9] 周钰, 孙力, 陈思蓉, 等. 基于机器视觉的芯片偏移检测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(12): 229-236.
- ZHOU Y, SHUN L, CHEN S R, et al. Die position offset detection system based on machine vision[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(12): 229-236.
- [10] WANG Y N, SHUAI S S, REN X F, et al. Sub-pixel high precision dimensional measurement method for aero-engine hollow turbine blade based on industrial computed tomography image[J]. China Foundry, 2022, 19(4): 307-320.
- [11] HAIBING H, ZHENG X, YIN J, et al. Research on O-ring dimension measurement algorithm based on cubic spline interpolation[J]. Applied Sciences, 2021, 11(8): 3716.
- [12] 徐从裕, 徐俊, 高雨婷, 等. 面向在线测量的亚像素提取与实验验证[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 23-29.
- XU C Y, XU J, GAO Y T, et al. Research on improved sub-pixel extraction algorithm for real-time detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 23-29.
- [13] 江涛, 李媛, 贺晨龙. 基于轮廓角点检测的螺纹关键参数视觉测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 54-61.
- JIANG T, LI Y, HE CH L. Visual measurement method of thread key parameters based on contour corner detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(7): 54-61.
- [14] 马兰, 李照照, 杨雪林, 等. 基于高斯插值提高雷达测距精度的研究[J]. 火控雷达技术, 2021, 50(1): 41-47.
- MA L, LI ZH ZH, YANG X L, et al. Improving radar ranging accuracy based on gaussian interpolation[J]. Fire Control Radar Technology, 2021, 50(1): 41-47.
- [15] 邹哲磊, 曾维友. 基于机器视觉的卡尺工具法轴承精密测量[J]. 机床与液压, 2023, 51(2): 53-58.
- ZOU ZH H, ZENG W Y. Precision measurement of bearing based on machine vision caliper tool method[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(2): 53-58.
- [16] 洪涛, 程诚. 振动条件下的尼龙拉链厚度尺寸视觉在线测量算法[J]. 计量学报, 2021, 42(4): 451-457.
- HONG T, CHENG CH. Visual on-line measurement algorithm for thickness dimension of nylon zipper under vibration condition[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(4): 451-457.
- [17] 张喜民, 余奇颖, 张金博, 等. 基于机器视觉的手机尾插件精密测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 47-54.
- ZHANG X M, YU Q Y, ZHANG J B, et al. Research on

precision measurement method for mobile phone tail plug part based on machine vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 47-54.

[18] 许斌,徐凡颖,辛若铭. 基于区域灰度梯度差异的摆片基片特征尺寸视觉测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2022,43(5):128-135.

XU B, XU F Y, XIN R M. A visual measurement method for feature size of pendulum substrate based on regional gray gradient difference[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5):128-135.

[19] 李文杰,王海旺,李团兴,等. 基于平行线拟合的轴类零件几何尺寸视觉测量[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(10): 361-367.

LI W J, WANG H W, LI T X, et al. Parallel line fitting based size measurement for shaft parts in vision measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(10): 361-367.

[20] 杨硕,陆向宁,何贞志,等. 基于机器视觉的喷嘴外形关键尺寸检测系统[J]. 电子测量技术, 2022, 45(17): 107-112.

YANG SH, LU X N, HE ZH ZH, et al. Detection system of key size of jet nozzle based on machine vision [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(17): 107-112.

作者简介



柴瑞武,2021 年于浙江科技学院获得学士学位,现为中国计量大学硕士研究生,主要研究方向为机器视觉与图像处理技术。
E-mail: chairuiwu@163.com



Chai Ruiwu received his B. Sc. degree from Zhejiang University of Science and Technology in 2021. Now he is a M. Sc. candidate in China Jiliang University. His main research interests include machine vision and image processing technology.



陈乐(通信作者),1978 年于浙江大学获得学士学位,1994 年于浙江大学获得硕士学位,2006 年于浙江大学获得博士学位,现为中国计量大学教授,主要研究方向为计量测试与远程校准、在线检测与控制系统等。

E-mail: clcjl@126.com

Chen Le (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Zhejiang University in 1978, M. Sc. degree from Zhejiang University in 1994 and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2006, respectively. Now she is a professor in China Jiliang University. Her main research interests include metrological testing and remote calibration, online detection and control systems.