

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209406

基于机器视觉的喷嘴外形关键尺寸检测系统*

杨 硕 陆向宁 何贞志 仝子悦 杜佳伟

(江苏师范大学机电工程学院 徐州 221116)

摘要: 喷水织机中喷嘴的外形尺寸对织机的运行起到至关重要的作用,为了高效地进行织机喷嘴外形尺寸参数的高精度检测,设计了一种基于机器视觉的喷嘴外形尺寸检测系统。该系统利用步进电机控制喷嘴旋转,通过 CCD 相机多角度采集喷嘴图像,通过亚像素边缘检测方法得到喷嘴的外轮廓边缘,再对边缘进行直线拟合,最后计算得出喷嘴的直径、锥度和倾斜角等参数。实验结果表明,该系统直径测量相对误差小于 1%,角度测量误差小于 2',采用多角度测量可以提高锥度和倾斜角的测量精度。该系统检测精度高,可以较好地满足实际生产应用的要求。

关键词: 喷嘴;机器视觉;亚像素边缘检测;零件外形尺寸

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Detection system of key size of jet nozzle based on machine vision

Yang Shuo Lu Xiangning He Zhenzhi Tong Ziyue Du Jiawei

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The shape size of the nozzle in the water-jet loom plays an important role in the operation of the loom. In order to efficiently detect the shape and size parameters of the loom nozzle with high precision, a nozzle shape size detection system based on machine vision is designed. In this system, the rotation of the nozzle is controlled by stepper motor, the nozzle image is collected from multiple angles by CCD camera, the outer contour edge of the nozzle is obtained by sub-pixel edge detection method, and then the edge is fitted in a straight line. finally, the diameter, taper and tilt angle of the nozzle are calculated. The experimental results show that the relative error of diameter measurement of the system is less than 1%, and the angle measurement error is less than 2'. Multi-angle measurement can improve the measurement accuracy of taper and inclination angle. The system has high detection accuracy and can meet the requirements of practical production and application.

Keywords: nozzle; machine vision; sub-pixel edge detection; part size

0 引 言

喷水织机因引纬时牵引力大、扩散性小、能耗少、噪音低等特点而被广泛使用于工业生产中,喷嘴决定了喷水织机水柱喷射的方向,其外形尺寸对于能否将纬丝稳定地送入织口,并落入到织口中的最佳位置上,起着至关重要的作用。由于喷嘴形状及尺寸误差,将导致喷射方向参数微小偏差,在短时间对织机没有明显的影响的,不易被察觉。可是在实际生产时为保证织机的织造效果,即使是喷射方向的微小偏差,在长时间的运转后,也会经常使纬线达不到最佳的位置上,从而触发探纬系统,造成织机停车、检修,大大降低了织造的效率。因此检测喷嘴外形尺寸对提高生产效率和降低生产成本有着重要意义^[1-2]。

影响喷射方向的主要尺寸为喷嘴的直径、锥度和倾斜

角,常用的测量方法为人工抽检,手动测量上述尺寸参数。使用传统测量方法的测量精度和效率无法实现自动化大规模的生产和检测^[3-4]。基于机器视觉的测量技术可以对物体进行非接触测量,提高测量精度、效率及自动化程度,满足长时间、高精度、重复生产的要求^[5-6]。董芳凯等^[7]设计了一种基于机器视觉的阀门零件同轴度测量系统,提高了测量精度,满足了生产应用的需求。程良利等^[8]开发了一套基于机器视觉的水表机芯灵敏度检测系统,检测准确率高达 99.7%。韩宗旺等^[9]搭建了一个基于机器视觉的轴类零件圆度检测平台,较准确地测出了轴的圆度误差。谭文等^[10]研制了一种基于机器视觉的 3D 激光平面度测量系统,系统测量精度可达 0.1 μm。江磊等^[11]设计并搭建了基于视觉检测的半轴花键检测实验平台,满足了半轴花键的

收稿日期:2022-03-25

* 基金项目:国家自然科学基金(52075231)、徐州市科技计划项目(KC21327)、江苏师范大学研究生科研与创新项目(2020XKT201)资助

检测生产要求,提高了检测效率。郭术义等^[12]设计了一套机械密封圈视觉尺寸在线分拣系统,系统检测次品准确度均达到 96% 以上,检测效率是游标卡尺的 29.4 倍。邢雪亮等^[13]提出一种基于机器视觉的航空铆钉尺寸检测方法,检测结果在精度要求下和实际尺寸的吻合度在 90% 以上。上述研究均通过机器视觉的方式完成了对不同零件、不同参数的检测,检测结果可以满足生产应用的需要,提高了检测效率。但针对锥形零件外形全尺寸参数(锥度、倾斜角度、直径等)的检测暂未见报道,因此本文利用机器视觉的方式实现喷嘴尺寸参数的检测。

本文设计了一种基于机器视觉的喷嘴外形尺寸参数检测系统,采用亚像素边缘检测方法对喷嘴图像进行边缘检测,再将边缘进行直线拟合,实现喷嘴直径、锥度、倾斜角等尺寸参数的自动测量。该系统提高了检测精度且可以快速得到喷嘴外形轮廓的位置关系,判断喷嘴的外形尺寸是否满足生产的要求。

1 检测系统设计

测量系统由硬件部分和软件部分组成。硬件部分包括 CCD 相机、远心镜头、光照系统、喷嘴零件支架、步进电机、PLC、计算机等部分,如图 1 所示。软件部分包括图像采集、分析及处理、运动控制、人机操作等部分组成。

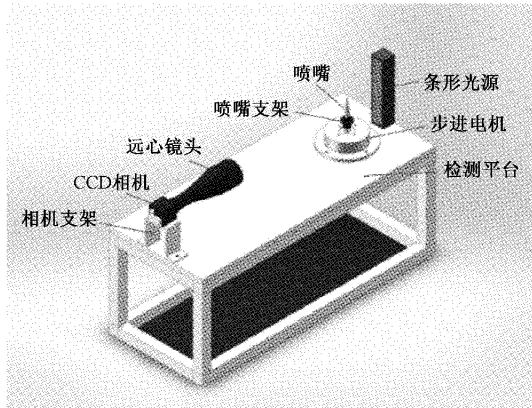


图 1 硬件部分结构示意图

将相机和喷嘴零件分别固定在支架上,调整好相机与喷嘴间的距离。采用背光源的方式可以更好地获得喷嘴的外形轮廓,选择远心镜头可以避免因相机畸变带来的测量误差。控制步进电机间歇旋转,每旋转 45°,相机采集一张图像,通过分析处理不同角度的图像,得到多个结果,提高检测的精度和稳定性,同时可以避免单一角度采集图像无法检测喷嘴上下段同轴度的问题,更全面的反应出喷嘴的外形尺寸参数。

2 外形尺寸检测算法

2.1 基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测

Teague^[14]以复域 Zernike 多项式为基,定义了图像

$f(x, y)$ 的 n 阶 m 次 Zernike 矩:

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) \cdot V_{nm}^*(\rho, \theta) dx dy \quad (1)$$

其中, $V_{nm}^*(\rho, \theta)$ 表示 $V_{nm}(\rho, \theta)$ 的共轭。在单位圆内图像 $f(x, y)$ 的 n 阶 m 次 Zernike 矩定义如下:

$$Z_{nm} = \sum_x \sum_y f(x, y) \cdot V_{nm}^*(\rho, \theta) \quad (2)$$

根据 Zernike 矩的旋转不变性,图像旋转 θ 角后的 Zernike 矩 Z'_{nm} 与旋转前 Z_{nm} 的关系为:

$$Z'_{nm} = Z_{nm} \cdot e^{-im\theta} \quad (3)$$

即图像旋转前后模保持不变,只有相角发生变化。利用旋转后图像的矩,计算出理想灰度阶跃模型的四个参数,从而实现边缘的精确定位。

图 2(a) 为 Ghosal^[15] 建立的图像理想边缘阶跃模型,阴影部分为前景区域。

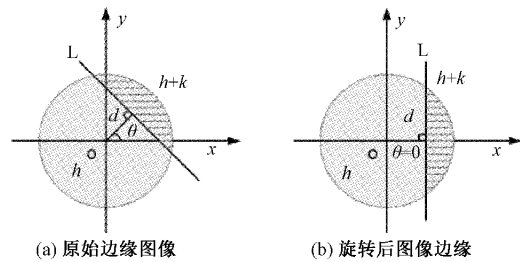


图 2 亚像素边缘检测理想模型

其中,直线 L 被单位圆包含的部分代表理想边缘,圆内 L 两侧的灰度值为 h 和 $h+k$, k 为灰度差, d 为原点到边缘的理论距离, θ 为 d 和 x 轴的夹角,图 2(b) 为图 2(a) 旋转角度 θ 后的模型。

由式(3)可知,当 $m = 0, 2, 4$ 时 $Z'_{nm} = Z_{nm}$, 当 $m = 1, 3$ 时 Z'_{nm} 为复数。令 $\text{Re}[Z_{nm}]$ 和 $\text{Im}[Z_{nm}]$ 分别表示 Z_{nm} 的实部和虚部,则 Z'_{nm} 及旋转角度 θ 为:

$$Z'_{nm} = \cos\theta_{nm} \cdot \text{Re}[Z_{nm}] + \sin\theta_{nm} \cdot \text{Im}[Z_{nm}] \quad (4)$$

$$\theta = \arctan \frac{\text{Im}[Z_{nm}]}{\text{Re}[Z_{nm}]} \quad (5)$$

根据图 2 可以求出旋转后图像不同阶次的 Zernike 矩:

$$\begin{cases} Z'_{00} = h\pi + \frac{k\pi}{2} - k\sin^{-1}d - kd\sqrt{1-d^2} \\ Z'_{11} = \frac{2k(1-d^2)^{3/2}}{3} \\ Z'_{20} = \frac{2kd(1-d^2)^{3/2}}{3} \\ Z'_{31} = k \left[\frac{4}{5}d^2(1-d^2)^{3/2} - \frac{2}{15}(1-d^2)^{3/2} \right] \\ Z'_{40} = k \left[-\frac{2}{5}d(1-d^2)^{3/2} + \frac{16}{15}d^3(1-d^2)^{3/2} \right] \end{cases} \quad (6)$$

由此可得:

$$d = \frac{Z'_{20}}{Z'_{11}} \quad (7)$$

$$k = \frac{3Z'_{11}}{2(1-d^2)^{3/2}} \quad (8)$$

由图 2 可推导出亚像素边缘检测公式为:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + d \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, (x_s, y_s) 是边缘的亚像素坐标, (x, y) 表示图 2 原点坐标。公式的推导是在单位圆内进行的,但在实际应用中使用的模板要比单位圆大。假设使用的 $N \cdot N$ 模板进行卷积计算,相当于将单位圆放大 $N/2$ 倍^[16],因此亚像素坐标公式应为:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{Nd}{2} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.2 判断条件的优化

传统 Zernike 矩算法边缘点的判断条件为:

$$k \geq k_i \cap d \leq d_i \quad (11)$$

k_i, d_i 为相对灰度 k 和距离 d 的阈值。其中不同图像得到的 k_i 变化范围较大,采用固定值对判断结果影响较大,如果采用手动调节 k_i 的值,在降低检测效率的同时又容易存在误差。

本文计算出旋转后图像不同阶次的 Zernike 矩,由式(6)可求得原点到边缘的高阶距离分别为:

$$d_1 = \sqrt{\frac{5Z'_{31} + Z'_{11}}{6Z'_{11}}} \quad (12)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{5Z'_{40} + 3Z'_{20}}{8Z'_{20}}} \quad (13)$$

加入不同阶次下的图像边缘 d_1, d_2 , 图 2(b)的理想灰度模型如图 3 所示。

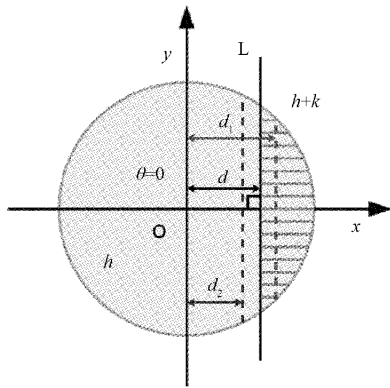


图 3 不同阶次下的图像边缘

其中 d, d_1, d_2 三者的位置关系并不固定。将图 3 与真实测量环境相结合,测量时采用背光源,得到的图像背景为灰度值较高的白色,被测物体为灰度值较低黑色。假设直线 L 为检测出的物体边缘, L 左侧灰度值为 h 的区域为被测物体, L 右侧灰度值为 $h+k$ 的区域为图像背景。由于目标图像的灰度阶跃模型并不理想,如图 4(b)所示物体的实际边缘 L_R 应该在边缘 L 更靠近图像背景的一侧即 x 轴

的正方向。所以为了更接近零件的真实边缘,本文选取 d_1 和 d_2 中值较大的作为 d 带入式(10)计算亚像素坐标。

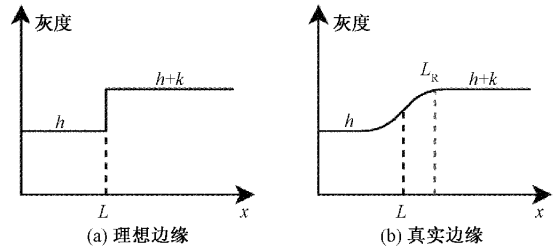


图 4 灰度阶跃模型

由于采集到的图像背景与零件灰度差较大,图像的直方图为双峰型,更适合采用迭代法计算阈值。即将图像按灰度值分为 A、B 两部分,通过不断迭代将最终的收敛值作为阈值,具体步骤如下:

- 1) 将图像的灰度最大值和最小值分别记作 Z_{\max} 和 Z_{\min} , 令初始值 $k_0 = (Z_{\max} + Z_{\min})/2$ 。
- 2) 根据初始值 k_0 将图像分为 A、B 两部分,分别求出两部分的平均灰度值 Z_A 和 Z_B 。
- 3) 求出新阈值 $k_i = (Z_A + Z_B)/2$ 。
- 4) 若 Z_A 和 Z_B 不再变化,则 k_i 即为最终的阈值,否则继续步骤 2) 直至不再变化。

同时考虑高阶矩对结果的影响,本文提出一种新的边缘判断条件:

$$k \geq k_i \cap d \leq d_i \cap |d_1 - d_2| \leq d_i/2 \quad (14)$$

此判断条件结合了低阶矩的抗噪性和高阶矩细化边缘的特点,使边缘定位更加准确。

2.3 检测算法流程

检测算法的具体步骤如图 5 所示。

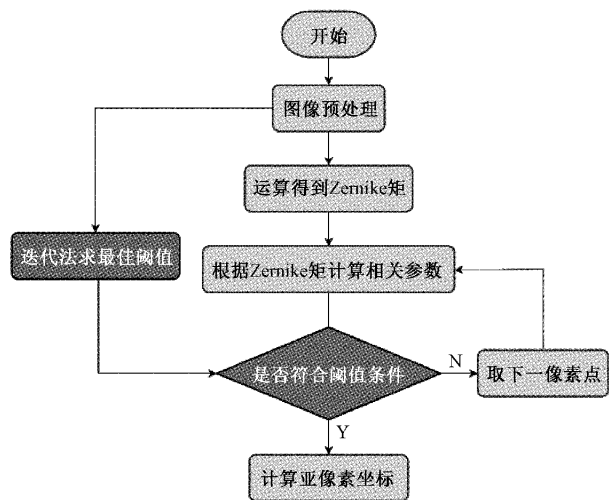


图 5 检测算法流程

第 1 步:对采集到的图像进行预处理,降低背景噪声的影响;

第 2 步:根据图像灰度,采用迭代算法分割图像,不断

迭代将图像分为前景和背景两部分,最终收敛为最佳的阶跃灰度阈值 k_i 。

第 3 步:用 7×7 的 Zernike 矩模板与第一步得到的梯度图像进行卷积运算,得到 $Z_{00}, Z_{11}, Z_{20}, Z_{31}, Z_{40}$ 。

第 4 步:取一边缘像素点,计算出 θ, k, d 。

第 5 步:根据式(14)判断像素点是否满足条件。如果满足则利用式(10)计算亚像素坐标。如果不满足条件则取下一个边缘像素点重复第 4 步,直至所有边缘像素点计算完成。

3 喷嘴外形尺寸检测

3.1 ROI 区域划分

由于喷嘴与相机的相对位置固定,采集到的图像竖方向不发生变化,所以针对不同的测量参数对采集到的图像进行 ROI 区域划分,如图 6 所示。其中 A 区域测量喷嘴前端的锥度和倾斜角,B 区域测量喷嘴的直径。

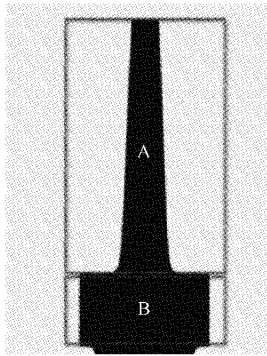


图 6 划分 ROI 区域

3.2 喷嘴直径测量

对 B 区域的图像进行亚像素边缘检测,得到各边缘点的坐标。在同一纵坐标下,存在左右两个横坐标分别 x_1, x'_1 。假设得到了 N 对纵坐标相同的坐标点,其横坐标分别为 $x_2, x'_2, x_3, x'_3 \dots x_n, x'_n$, 则直径 D 的计算公式如下:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x'_i|}{N} \quad (15)$$

3.3 锥度和倾斜角测量

对 A 区域的图像进行亚像素边缘检测,得到各边缘点的坐标,并根据坐标拟合出两条直线。两直线方程分别为 $L_1: y = k_1x + b_1, L_2: y = k_2x + b_2$ 。根据式(16)可求得锥度 α 和倾斜角 β 。

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\left|\frac{k_1 - k_2}{1 + k_1k_2}\right|\right) \\ \beta = \left|\max(\theta_1, \theta_2) - \frac{\alpha}{2}\right| \end{cases} \quad (16)$$

其中 θ_1, θ_2 分别为直线 L_1, L_2 与 Y 轴的夹角,如式(17)。

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan\left(\frac{1}{k_1}\right) \\ \theta_2 = \arctan\left(\frac{1}{k_2}\right) \end{cases} \quad (17)$$

4 实验与结果分析

检测系统上位机软件系统平台为 Windows10,软件为 Pycharm 2020 Win64 版本,处理器 Inter Core i5-5200U,主频为 2.20 GHz,内存为 12 GB。同时使用 Qt Designer 设计了检测系统的人机界面,如图 7 所示。

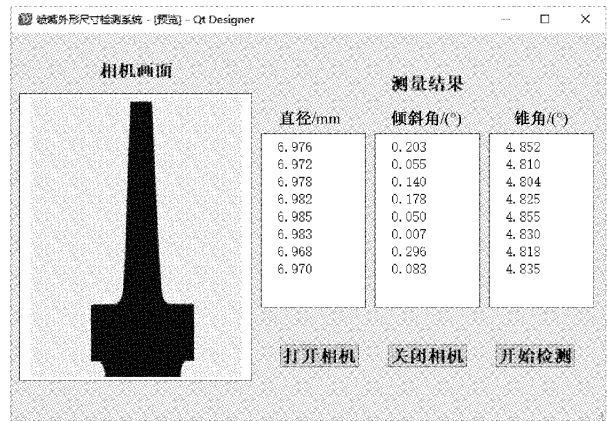


图 7 系统人机界面

4.1 相机标定

在基于机器视觉的检测系统中,相机标定是参数测量前的必要环节,对实验结果起到了决定性作用。相机标定主要包括两方面:畸变标定和尺寸标定。由于光学镜头的不同,采集的图像会产生不同程度的畸变,其中最常见的是桶形畸变,有畸变的图像会使检测结果存在较大误差。本文选择使用远心镜头采集图像,远心镜头的畸变率 $\leq 0.1\%$,满足测量要求,所以可以不进行畸变标定。

检测系统通过图像处理得到的参数是图像中的像素尺寸,为了得到物体实际的物理尺寸,需要将两种尺寸进行换算。尺寸标定的目的是为了得到图像中像素尺寸与物体实际尺寸的换算关系 P ,单位为 mm/pixel。选择高精度加工的量块进行尺寸标定,标定采用多次检测后取平均值作为检测结果。对 5.000 mm 的标准量块亚像素边缘检测后的测量结果为 167.989 像素。因此该检测系统的尺寸标定结果为 $P = 0.02976$ mm/pixel。

4.2 外形尺寸检测结果

使用标准量块对算法进行验证,对 5.000 mm 的标准量块亚像素边缘检测后得到量块两条边缘的夹角,检测结果如表 1 所示。

由表 1 可知,本文算法对标准量块两条边之间的夹角检测结果的相对误差稳定在 $2'$ 以内,说明了算法的准确度和稳定性良好,可以用在喷嘴外形参数的检测上。

表 1 标准量块检测结果

测量次数/次	真实值/(°)	测量值/(°)	绝对误差/(′)
1	0	0.021	1.26
2	0	0.023	1.38
3	0	0.016	0.96
4	0	0.012	0.72
5	0	0.020	1.20
6	0	0.023	1.38
7	0	0.016	0.96
8	0	0.013	0.78
9	0	0.019	1.14
10	0	0.016	0.96

分别对直径、锥度和倾斜角进行检测,并根据得到的尺寸标定结果 P 对检测结果进行换算。检测时电机每旋转 45° 相机就采集一张图像,一个喷嘴旋转一周后得到 8 张图像为一组,进行四组检测,共 32 张图片的检测结果如下。

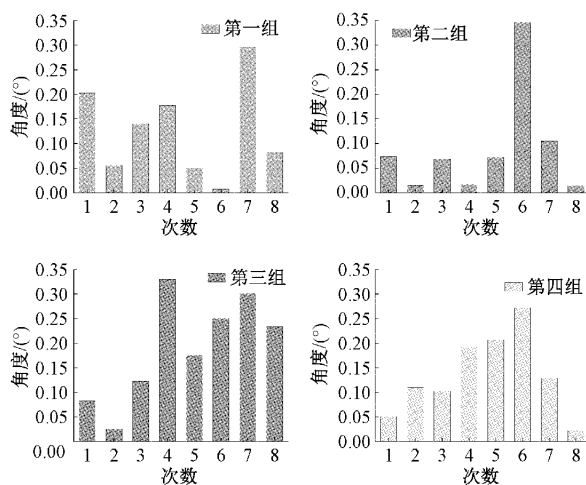


图 8 倾斜角测量结果

1) 32 张图的倾斜角测量结果如图 8 所示,取每组结果的最大值作为该零件的倾斜角,4 个零件的倾斜角分别约为 0.30° 、 0.35° 、 0.33° 和 0.27° 。由图 8 可知,每组数据都有较大的波动,说明不同角度拍摄的图像测量结果差距较大,单一角度得到的倾斜角显然不准确,多角度采集图像的方法极大程度地提高了测量的可靠性。

2) 32 张图的直径测量结果如图 9 所示。整体来看,除个别误差较大的点外其余点稳定分布在 $6.970\sim 6.980$ mm 附近,平均值为 6.975 mm,使用千分尺测量直径的结果约为 6.985 mm,相对误差为 0.143% 。观察每一组数据可以发现,不同角度的测量结果有所不同,侧面反应出喷嘴的圆度不是 0,单一角度的测量结果具有一定的随机性,会降低测量的准确度,因此采用多个角度的图像测量喷嘴直径可以提高检测精度。

3) 32 张图的锥度测量结果如图 10 所示,测量结果稳

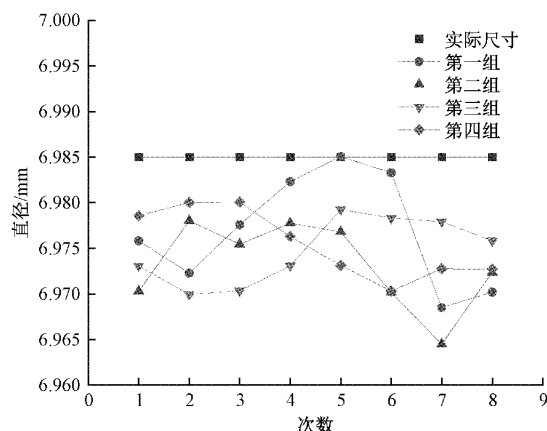


图 9 直径测量结果

定分布在 $4.800^\circ\sim 4.900^\circ$ 附近,平均值为 4.838° 。其中每组数据都呈现规律性的波动,说明喷嘴上端的圆度存在误差,多角度测量的方法提高了测量结果的准确度。

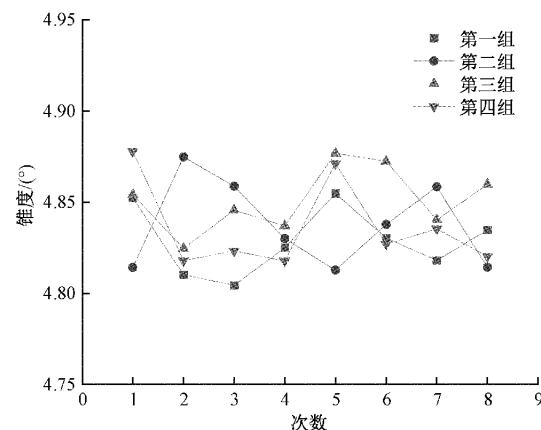


图 10 锥度测量结果

5 结 论

本文设计了一种基于机器视觉的喷嘴外形尺寸检测系统,该系统使用亚像素边缘检测算法得到喷嘴的边缘轮廓,在此基础上对喷嘴的锥度、倾斜角、直径等参数进行检测,通过测量结果判断喷嘴零件的关键参数是否符合生产要求,提高了检测效率和精度。通过标准量块验证了算法具有较好的准确度和稳定性,多角度测量有效地避免了测量结果的偶然性,提高了准确度。3 个参数均得到了稳定且高精度的测量结果,满足实际生产时的精度要求。同时根据不同角度的数据可以侧面反应出该喷嘴的整体结构,有利于对该零件是否合格做出全面判断。该检测系统对提高生产效率和延长织机的使用寿命具有一定的实际意义。

参考文献

- [1] 张亮,冯志华,刘帅,等. 喷气织机辅助喷嘴喷孔结构优化设计[J]. 纺织学报, 2016, 37(6):112-117,123.
- [2] 宋帅帅,黄锋,江燕斌. 基于机器视觉几何量测量技

- 术研究进展分析[J]. 电子测量技术, 2021, 44(3): 22-26.
- [3] 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.
- [4] 徐兴波. 基于机器视觉的轴类零件尺寸测量系统的研制[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.
- [5] 张伟, 韩宗旺, 程祥, 等. 基于机器视觉零件轴线直线度误差测量的研究[J]. 光学精密工程, 2021, 29(9): 2168-2177.
- [6] 丁成波, 刘蜜, 刘超. 基于机器视觉的动态环境下小尺寸轴检测系统[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(4):78-80,85.
- [7] 董芳凯, 郑智贞, 袁少飞, 等. 基于机器视觉的阀门零件同轴度测量系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(11):81-83,87.
- [8] 程良利, 唐旭晟, 朱博文, 等. 基于机器视觉的水表机芯灵敏度检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6):88-95.
- [9] 韩宗旺, 张伟, 程祥, 等. 基于机器视觉的短轴零件圆度检测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(10): 93-96.
- [10] 谭文, 方森, 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.
- [11] 江磊, 朱华炳, 王烽, 等. 基于机器视觉的汽车半轴花键参数检测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(11): 119-122.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 陈康清, 陈新度, 吴磊, 等. 大尺寸面板级封装芯片精密定位检测[J]. 电子测量技术, 2021, 44(16): 141-147.
- [15] 陈璐, 关立文. 基于改进 Zernike 矩的亚像素钻铆圆孔检测方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(6):438-444.
- [16] 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.

作者简介

杨硕, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉测量技术。

E-mail:994949791@qq.com

陆向宁, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为无损检测、微电子封装可靠性分析。

E-mail:lxnam89@163.com

何贞志(通信作者), 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为机电系统检测技术、轴承振动测试与分析。

E-mail:hezz82@163.com

金子悦, 本科, 主要研究方向为机器视觉测量技术。

E-mail:2720535314@qq.com

杜佳伟, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉测量技术。

E-mail:1432061335@qq.com