

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005434

# 基于机器视觉的孔类零件尺寸在线检测\*

谢俊<sup>1</sup> 李玉萍<sup>1</sup> 左飞飞<sup>1</sup> 王子贤<sup>1</sup> 戎建<sup>2</sup>

(1.江苏大学机械工程学院 镇江 212013; 2.镇江大全金属表面处理有限公司 镇江 212211)

**摘要:** 应用机器视觉技术对孔类零件进行尺寸测量,采用边加工边测量的方式进行在线检测,可有效缩短零件的生产周期,提高生产效率。通过分析零件的工艺特征,选用 CMOS 相机与高精度远心镜头,对有倒角的特征采用环形光源照明,对未倒角的特征采用同轴光源照明,提高了硬件平台的柔性化。针对图像采集与传输过程中的椒盐噪声与高斯噪声,对采集后的灰度图像先采用中值滤波去除椒盐噪声,然后采用最小误差法选定阈值,将灰度图二值化,完成图像分割,再使用 Canny 算子进行边缘检测,同时去除高斯噪声。最后,使用标定板进行相机标定来获取标定系数,调用图像处理软件 Open eVision 进行尺寸测量,将系统检测数据与检具测量数据进行比较分析,实验结果表明本检测系统的精度可达 0.02 mm。

**关键词:** 机器视觉;孔类零件;图像预处理;尺寸检测

**中图分类号:** TG806;TP391 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 460.99

## On-line dimension detection of hole parts based on machine vision

Xie Jun<sup>1</sup> Li Yuping<sup>1</sup> Zuo Feifei<sup>1</sup> Wang Zixian<sup>1</sup> Rong Jian<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2.Zhenjiang Daquan Metal Surface Treatment Co., Ltd., Zhenjiang 212211, China)

**Abstract:** The dimension detection of hole parts is carried out by machine vision technology, which is the on-line detection that is implemented simultaneously with processing and measurement. Therefore, it can shorten the production cycle and improve the production efficiency. The CMOS camera and telecentric lens with high precision are selected by analyzing the process features of parts. For features of parts with chamfering, ring light is used for illumination, while coaxial light is used for illumination in the case of features without chamfering. Using those hardwares can increase flexibility of platform. For the pepper and salt noise and Gaussian noise in the process of image acquisition and transmission, median filtering is firstly used to remove the pepper and salt noise in the collected grayscale image, then the minimum error method is used to select the threshold to complete image segmentation, and then the Canny operator is used to detect edges and remove the Gaussian noise. Finally, the camera is calibrated with the calibration target to obtain the calibration coefficient and the pre-processed images are measured by Open eVision that is an image processing tool. Furthermore, the system test data is compared and analyzed with the gage measurement data. The experimental results show that the accuracy of the system can reach 0.02 mm.

**Keywords:** machine vision; hole parts; image preprocessing; size detection

## 0 引言

随着“中国制造 2025”的提出,国内机械制造业蓬勃发展,制造技术日新月异,对检测技术的要求也逐步提高。机械装备由各种零件组成,零件的质量直接影响装备的稳定性与可靠性。传统的检测方式为人工检测,虽简单方便,但速度慢、精度低、柔性差,不利于信息集成以及自动化生产

需求<sup>[1]</sup>。同时,采用高精度检测仪器如三坐标测量机<sup>[2]</sup>、激光测量机等进行检测,虽能满足精度要求,但设备价格昂贵,对环境要求高,与自动化生产线配合难度大,实现在线检测困难<sup>[3]</sup>。因此,对零件检测引入机器视觉技术,可解决人工检测与高精度检测仪器的诸多问题,有助于企业朝智能化、自动化、柔性化方向发展,带动企业转型升级。

机械零件复杂多样,有些零件的尺寸无法采用传统的

收稿日期:2020-11-25

\* 基金项目:国家自然科学基金(51675239)项目资助

测量工具进行尺寸检测,比如孔类零件,游标卡尺与内径千分尺测量的主要对象是直径为 5 mm 以上的孔,当零件的孔数量多、直径小时,检具测量困难,并且工作量大、测量精度低、效率低,此外,孔间距也难以测量准确。所以,将机器视觉技术引入到尺寸测量中,通过相机采集图像、图像处理,高效、高精度地完成孔径、孔间距的检测,弥补了传统人工检测的诸多不足。

## 1 零件检测流程设计

零件需要正反两面加工,因此,零件的尺寸检测也需正反两面检测。传统的零件尺寸检测均是在加工完毕后进行,而本文采用如图 1 所示的检测方式,将零件的加工与检测融合在一起,可实现边加工边检测,缩短了零件生产周期。生产线共设有 5 个工位,分别是正面加工工位、反面加工工位、正面影像检测工位、反面影像检测工位和终检工位。首先,将正、反面加工的 NC 程序上传至相应的加工工位,数控机床完成正面加工后,将零件送至正面影像检测工位进行尺寸检测,并将检测结果上传至 MES;再送去反面加工,待加工完毕后进行反面影像检测,同样将检测结果上传至 MES;最后,终检工位通过 MES 获取当前零件正反面的影像测量结果,并合并测量结果,回传 MES 进行存档。

采用该检测流程,可使零件加工完毕、即刻检测,提高了生产与检测效率,还可防止零件被氧化而产生锈斑,影响图像采集效果及后续尺寸检测的精度。

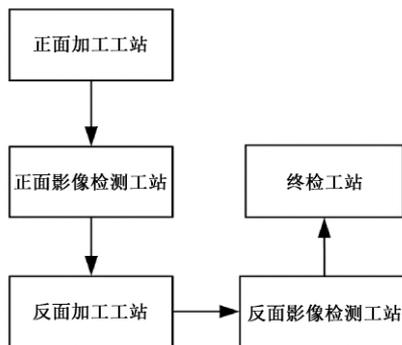


图 1 零件检测流程

## 2 视觉检测平台设计

本视觉检测系统针对机加工零件进行尺寸测量,主要包括个人计算机、光源、镜头、工业相机、图像处理软件 Open eVision。

### 2.1 图像采集硬件

#### 1) 相机

工业相机按感光芯片类型可分为 CCD(charge coupled device)相机和 CMOS(complementary metal oxide semiconductor)相机。CMOS 图像传感器结构简单,制造工艺没有 CCD 图像传感器复杂,并且集成度高,所以成本较低,CMOS 相机

还具有功耗小、输出速度快等优点<sup>[4]</sup>,适用于高速场合与空间应用。当被检零件尺寸大,无法一次性采集到全部特征,需要多次拍照,因而相机要移动,这对相机的输出速度提出较高要求,故选用 CMOS 工业相机。本文选用的是海康 1 200 万像素 CMOS 黑白工业相机,分辨率为 4 096 pixel×3 000 pixel。

#### 2) 镜头

远心镜头相比于其他镜头能消除透视误差,物体无论距镜头近或远,所有物体在相机上显示出相同的大小。由于其具有畸变小、景深大、分辨率高等优势,本文选用高精度远心镜头,物方视场为  $\phi 80$  mm,景深为  $\pm 12.1$  mm,畸变  $< 0.1\%$ ,远心度  $< 0.1^\circ$ 。

#### 3) 光源

光源的作用是突出特征分析区域,减少其他区域的干扰。光源大致可分为卤素灯、LED、荧光灯,本文选用工业上常用的 LED,LED 具有使用寿命长、耗电量低、稳定性好以及安全性高等优势<sup>[5]</sup>。

根据机械零件实际加工工艺,会对零件的孔、边、槽、凸台等特征进行倒角,可去除边缘的毛刺,防止被利边割伤,并且便于装配。通过采用各种光源对不同零件上带倒角的特征进行打光实验,发现环形光源能突出带倒角的特征,图像采集效果最佳,有利于进行尺寸检测,故带倒角的特征均采用环形光源,当光源越靠近零件表面,待测特征越明显,最终设定环形光源到零件上表面的安全距离为 5 mm,打光效果如图 2 所示。

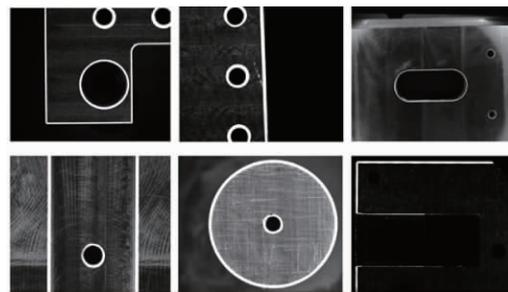


图 2 环形光源的打光效果

考虑到某些零件特征未倒角,因而对未倒角的特征进行打光实验,找出最合适的光源类型。通过实验发现同轴光源适用于未倒角的特征,效果如图 3 所示。由于同轴光源的光垂直打到零件表面上,同轴光在安装时无需离目标太近,但也不能太远,因为离被测目标越远,要求选用的同轴光源就越大,否则不能保证光的均匀性。

### 2.2 相机运动平台

机械零件尺寸各异,尺寸小的零件采集一次图像便可完成尺寸检测,但当零件过大时,由于相机视场有限,不能一次性采集到零件的所有特征,需多次拍照。机加工零件多为钢类,重量大,若移动零件来进行多次图像采集,则检测速度慢,所以选择移动相机。虽然相机可能会轻微振动,产生噪声,但可以通过后期的图像预处理去除噪声,从而避

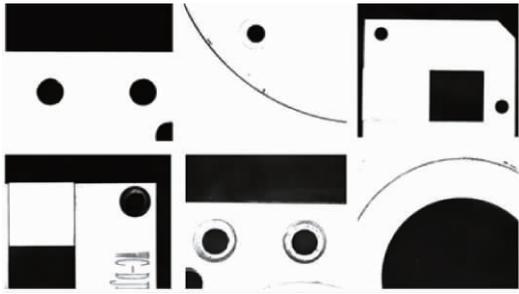


图3 同轴光源的打光效果

免影响检测精度。因此,设计了如图4所示的相机运动平台,相机可在X向、Y向、Z向的轨道上自由移动,以采集到零件的全部特征。3个方向的有效行程分别为 $X=400\text{ mm}$ , $Y=500\text{ mm}$ , $Z=50\text{ mm}$ 。

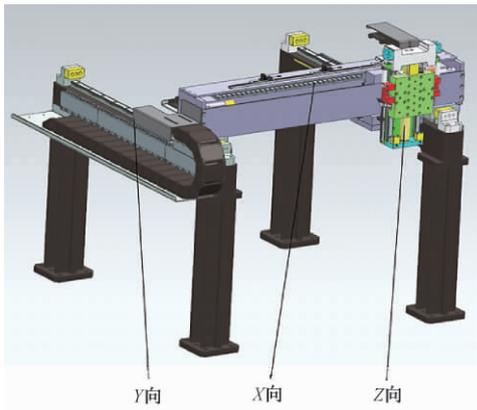


图4 相机运动平台

### 3 图像预处理

为了提高感兴趣特征的可读性,对图像进行尺寸测量前需要进行预处理,从而增强后续检测过程中特征识别的可靠性,提高检测结果的准确性。以某智能装备上的支撑板为例,该支撑板起固定作用,如图5所示。

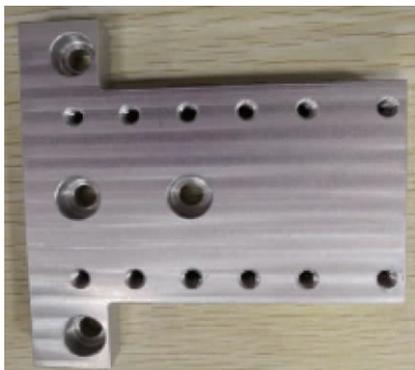


图5 支撑板

#### 3.1 图像去噪

本文选用的相机为黑白相机,无需将彩色图像转换为

灰度图像。采用灰度图像可过滤掉颜色信息,减少计算量,节省图像处理时间<sup>[6]</sup>。在图像采集与传输过程中,主要产生的噪声为高斯噪声与椒盐噪声,这两类噪声严重影响图像质量<sup>[7]</sup>,以至于影响系统检测精度,所以需要进行图像预处理。常用的图像预处理方法有图像滤波、图像增强、形态学运算等。由于图像增强、形态学中的开闭运算与腐蚀膨胀会改变边缘位置<sup>[8]</sup>,影响尺寸检测精度,因此采用图像滤波进行图像去噪,常见的滤波方法有中值滤波、均值滤波、高斯滤波等<sup>[9]</sup>。

一些边缘检测算子中含有高斯函数可去除高斯噪声,效果等同于高斯滤波。因此,图像中的高斯噪声将会在边缘检测时去除,故只针对图像中含有的椒盐噪声进行图像去噪。为了突出对比滤波方法的去噪效果,通过MATLAB仿真实验,向采集的灰度图中加入方差为0.1的椒盐噪声,结果如图6所示,然后分别采用滤波窗口为 $3\times 3$ 的中值滤波、均值滤波、高斯滤波(标准差为0.4)进行去噪,结果如图7~9所示。根据仿真结果可知,中值滤波去除椒盐噪声效果最好,故选择中值滤波进行图像去噪。

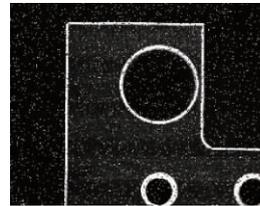


图6 加入椒盐噪声

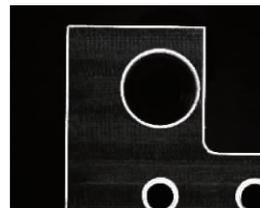


图7 中值滤波效果

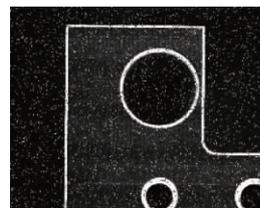


图8 高斯滤波效果

#### 3.2 图像分割

图像分割基于阈值分割,具有高效、简单、实用的特点,被广泛运用。阈值分割适用于目标与背景的灰度级差异大的场合中,相机采集的图像中零件轮廓与背景有明显的灰度级差异,故而基于阈值分割,将目标与背景分开。常用的

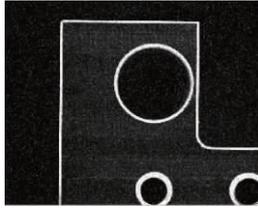


图 9 均值滤波效果

阈值分割方法有最小误差法、迭代法、最大类间方差法等<sup>[10]</sup>。本文采用最小误差法进行阈值分割,实现步骤如下:

1) 设目标、背景灰度值的密度分别为  $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ , 目标点、背景点分别占图像总点数的  $m$  与  $1-m$ , 则混合概率密度  $f(x)$  为:

$$f(x) = mf_1(x) + (1-m)f_2(x) \quad (1)$$

2) 选定阈值  $T$ , 求总的误差概率  $p(T)$ :

$$p(T) = mp_1(T) + (1-m)p_2(T) \quad (2)$$

其中,

$$p_1(T) = \int_T^{\infty} f_1(x)dx, p_2(T) = \int_{-\infty}^T f_2(x)dx \quad (3)$$

3) 根据最小分类误差思想给出准则函数  $J(T)$ , 当  $J(T)$  最小时, 即可求出最佳阈值  $T^*$ 。

$$J(T) = 1 + 2[P_1(T)\ln\sigma_1(T) + P_2(T)\ln\sigma_2(T)] - 2[P_1(T)\ln P_1(T) + P_2(T)\ln P_2(T)] \quad (4)$$

其中,

$$P_1(T) = \sum_{x=0}^T h(x), P_2(T) = \sum_{x=T+1}^{L-1} h(x) \quad (5)$$

$$\mu_1(T) = \frac{\sum_{x=0}^T h(x)x}{P_1(T)}, \mu_2(T) = \frac{\sum_{x=T+1}^{L-1} h(x)x}{P_2(T)} \quad (6)$$

$$\sigma_1^2 = \frac{\sum_{x=0}^T (x - \mu_1(T))^2 h(x)}{P_1(T)} \quad (7)$$

$$\sigma_2^2 = \frac{\sum_{x=T+1}^{L-1} (x - \mu_2(T))^2 h(x)}{P_2(T)} \quad (8)$$

则最佳阈值  $T^*$ :

$$T^* = \text{Arg} \min_{0 < T < L-1} J(T) \quad (9)$$

最小误差法分割结果如图 10 所示, 可以看出采用该算法, 分割效果明显, 目标与背景完全隔开, 有助于后续检测。

### 3.3 边缘检测

图像边缘检测需满足两个要求: 抑制噪声与精确定位边缘。在实际应用中, 常用的边缘检测算子有 Log 算子、Robert 算子、Sobel 算子、Canny 算子等<sup>[11]</sup>。本文选用 Canny 算子进行边缘检测, 该算子基于 3 个准则: 定位精度准则、信噪比准则和单边响应准则<sup>[12]</sup>, 实现步骤如下<sup>[13]</sup>:

1) 用一个高斯滤波器平滑输入图像, 令  $f(x, y)$  为输入图像,  $G(x, y)$  为高斯函数, 平滑后的图像  $f_s(x, y)$  为:

$$f_s(x, y) = G(x, y) \cdot f(x, y) \quad (10)$$

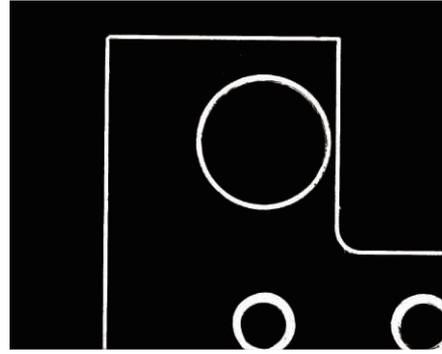


图 10 最小误差法分割结果

2) 计算图像梯度幅值和角度。

$$M(x, y) = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (11)$$

$$\alpha(x, y) = \arctan \left[ \frac{g_y}{g_x} \right] \quad (12)$$

其中,

$$g_x = \frac{\partial f_s}{\partial x}, g_y = \frac{\partial f_s}{\partial y} \quad (13)$$

3) 对梯度幅值图像应用非极大值抑制: 寻找最接近  $\alpha(x, y)$  的方向  $d_k$ , 若  $M(x, y)$  的值大于沿  $d_k$  的两个像素, 则令  $g_N(x, y) = M(x, y)$ , 否则, 令  $g_N(x, y) = 0$  (抑制),  $g_N(x, y)$  为非极大值抑制后的图像。

4) 用双阈值处理和连接分析来检测并连接边缘<sup>[14]</sup>: 使用高阈值  $T_H$  与低阈值  $T_L$ , 高、低阈值比率应为 2:1 或 3:1。将  $< T_L$  的点抛弃, 赋 0; 将  $> T_H$  的点标记, 确定为边缘点, 赋 1 或 255; 将  $< T_H$  并且  $> T_L$  的点只有与  $> T_H$  的像素连接时才会被保留, 赋 1 或 255。

采用 Canny 算子可去除高斯噪声, 也能真正检测到弱边缘, 效果如图 11 所示。

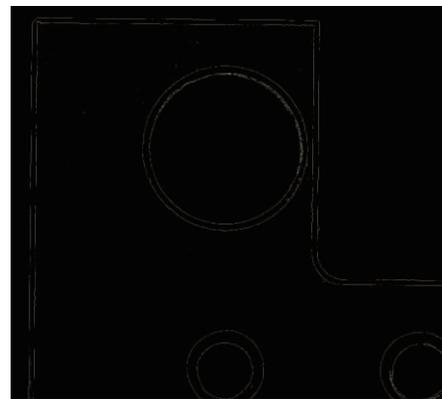


图 11 Canny 算子检测边缘

## 4 尺寸测量

### 4.1 相机标定

尺寸测量需清楚知道图像中每个像素对应的实际物理

尺寸,因此需要对相机进行标定,相机标定的精度会直接影响系统精度。常见的相机标定方法<sup>[15]</sup>有相机自标定法、传统相机标定法和主动视觉相机标定法。本文采用传统的相机标定法,该方法成本低、检测精度高。

采用 12×9 棋盘格标定板进行标定,每个格子为 3 mm,取标定板 X 向 12 个格子的像素距离与 Y 向 9 个格子的像素距离,得到 21 组数据,求其平均值,将平均值与 3 mm 做比值得到标定系数即为一个像素的实际物理尺寸。

#### 4.2 尺寸测量实现过程

图像经预处理后,调用 Open eVision 中的算法进行尺寸测量。以支撑板的内孔为例,使用 EasyGauge 模块中的 CircleGauge 功能,如图 12 所示,该功能是由 3 个直径不相等的同心圆组成,最大、最小圆确定检测范围且距中间圆等距,根据检测区域内的像素点,采用最小二乘法拟合出圆,以绿色圆显示。

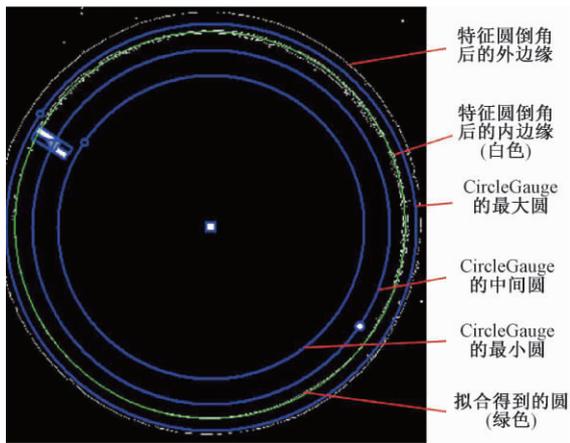


图 12 最小二乘法拟合圆

值得注意的是,根据机械加工工艺,零件的轮廓均会倒角,当环形光源打在目标特征上,轮廓在电脑上以白色粗实线显示,当测量圆形凸台直径时,系统应检测到粗实线的外圆;当测量圆孔时,系统需检测粗实线的内圆,这样提高了测量精度。图 13 所示为测量支撑板的内孔,应测量粗实线的内圆。根据图像预处理后提取的内边缘,采用最小二乘法,获得圆直径与圆心,孔间距便可根据圆心坐标计算得到。最后,将像素尺寸乘以标定系数获得实际物理尺寸。

#### 4.3 测量结果分析

按照图 13 的标注,本检测系统测量的支撑板孔径与孔间距结果如表 1 所示,从该表中可看出,系统测量值的精度达到了毫米的千分位,精度较高。

由于检测的尺寸太多,选取其中一个尺寸进行重复测试,验证系统的稳定性与准确性。随机选取孔 6 进行重复试验,共测量了 8 组数据,如表 2 所示,对比分析内径千分尺测量值与系统测量值,通过计算可知,最大绝对误差为

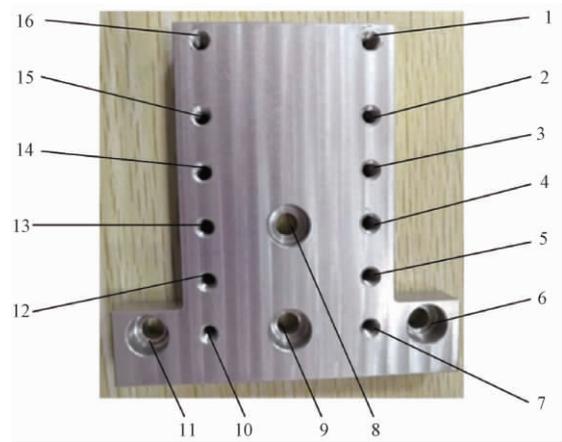


图 13 支撑板内孔标注

表 1 检测系统尺寸测量结果

名称	孔径/mm	名称	孔间距/mm
孔 1	3.011	孔 1、孔 2	18.021
孔 2	3.021	孔 2、孔 3	15.022
孔 3	3.003	孔 3、孔 4	15.143
孔 4	3.022	孔 4、孔 5	15.105
孔 5	3.023	孔 5、孔 7	15.102
孔 6	5.038	孔 6、孔 9	35.023
孔 7	3.043	孔 8、孔 9	30.024
孔 8	5.025	孔 9、孔 11	35.113
孔 9	5.014	孔 10、孔 12	15.121
孔 10	3.030	孔 12、孔 13	15.023
孔 11	5.021	孔 13、孔 14	15.141
孔 12	3.011	孔 14、孔 15	15.124
孔 13	3.022	孔 15、孔 16	18.011
孔 14	3.005	孔 7、孔 10	40.102
孔 15	3.023	孔 5、孔 12	40.113
孔 16	3.003	孔 4、孔 13	40.012
		孔 3、孔 14	40.089
		孔 2、孔 15	40.021
		孔 1、孔 16	40.023

0.026 mm,最大相对误差为 0.516%,因此,本文系统精度达到 0.02 mm。此外,系统的平均测量值为 5.0365 mm,标准方差为 0.0018 mm,最大测量值与最小测量值之差为 0.006 mm,从这 3 个数据可以看出,系统测量结果波动平稳,系统稳定性较好。综上所述,本文系统具有较好的稳定性和准确性。

#### 4.4 误差产生原因分析

在视觉检测中,尺寸检测会由于多种原因产生误差,首先是算法误差,由于本检测系统对图像进行多次处理,各种算法本身存在一定误差,并且算法对于不同的对象误差大小也不同;其次是系统误差,由于成像系统的结构,导致采

表 2 对比系统测量值与内径千分尺测量值

次数	系统测量值/ mm	内径千分尺 测量值/mm	绝对 误差/mm	相对 误差/%
1	5.038		0.024	0.476
2	5.035		0.021	0.417
3	5.037		0.023	0.457
4	5.040	5.014	0.026	0.516
5	5.035		0.021	0.417
6	5.034		0.020	0.397
7	5.037		0.023	0.457
8	5.036		0.022	0.437

集到的图像存在畸变,还有光源的不稳定会产生噪声;最后是零件材料的影响,由于是金属零件,表面会反光,光源调节不当会影响图像质量,产生误差。

## 5 结 论

将机器视觉技术应用到零件尺寸检测中,避免了传统接触式检测的弊端,提高了检测效率与精度,大幅度降低人力成本与设备成本。本文提出采用边加工边测量的方式进行在线检测,可防止零件氧化而影响图像采集质量,降低了图像预处理的难度,提高了检测精度。并且相比于传统的加工完毕后再检测,可有效缩短零件的生产周期,提高生产效率。

本检测系统采用 CMOS 相机与高精度远心镜头,将被检目标特征分为两类:有倒角的特征和未倒角的特征,提出有倒角的特征使用环形光源,未倒角的特征使用同轴光源,能够突出特征分析区域,提高了图像采集质量。此外,设计的相机运动平台能在 X 向、Y 向、Z 向自由移动,可满足不同尺寸零件的检测,提高了硬件平台的柔性化。

对相机采集的图像采用中值滤波去除椒盐噪声,最小误差法进行阈值分割,Canny 算子去除高斯噪声并精确定位边缘。采用标定板进行相机标定,获取标定系数,调用 Open eVisoin 进行尺寸测量,将测量结果与内径千分尺测量值进行比较分析,实验结果表明本检测系统精度可达 0.02 mm。由于受系统误差、算法误差以及零件材料的影响,检测精度未能达到更高的要求,在今后的研究工作中,将从优化算法、提高图像采集硬件等方向减小检测系统误差,以求得更高的尺寸检测精度。

## 参考文献

[1] 谢珩,汪成龙,黄振雄,等.基于 LabVIEW 的五金件尺

寸检测方法[J].电子测量技术,2019,42(24):152-156.

- [2] 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.
- [3] 杨光.基于机器视觉的精密零件尺寸检测关键技术研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2014.
- [4] 刘平.基于深度学习的微型电机转子外观检测系统设计[D].桂林:桂林电子科技大学,2019.
- [5] 尚会超,杨锐,段梦珍,等.机器视觉照明系统的关键技术分析[J].中原工学院学报,2016,27(3):16-21.
- [6] 魏利胜,丁坤,段志达.基于高斯加权均值分割的轴承工件检测和定位研究[J].电子测量与仪器学报,2019,33(10):118-127.
- [7] 王爱珍.基于机器视觉的低对比度物体二维尺寸测量方法的研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [8] 庞博.基于机器视觉的高精度零件尺寸检测系统研究及实现[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [9] 苑玮琦,薛丹.基于机器视觉的隧道衬砌裂缝检测算法综述[J].仪器仪表学报,2017,38(12):3100-3111.
- [10] 朱文博,洪都.基于图像处理的零件二维尺寸检测方法[J].光学技术,2020,46(2):184-191.
- [11] 杨艳.基于深度学习的工件尺寸在线视觉检测关键技术研究[D].济南:山东大学,2019.
- [12] 林书青.基于机器视觉的汽车安全带 MGG 质量检测研究[D].镇江:江苏大学,2018.
- [13] 张玉登,刘新妹,殷俊龄.基于机器视觉的 PCB 图像焊点数据自动识别技术[J].国外电子测量技术,2020,39(11):12-16.
- [14] 马健翔,任安虎,牛孝通.基于机器视觉的车辆排队长度检测[J].国外电子测量技术,2018,37(8):86-89.
- [15] 陈为,李泽辰,张婧,等.基于 HALCON 的工业机器人视觉系统标定方法研究[J].电子测量技术,2020,43(21):137-141.

## 作者简介

谢俊,工学博士,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为机器视觉、并联机构。

E-mail: xiejun@ujs.edu.cn

李玉萍(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为机器视觉。

E-mail: 2810773854@qq.com