

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.05.014

基于机器视觉的零件圆心距在线测量系统设计

彭晶鑫¹, 石秀东¹, 姚晨明², 孙攀²

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;
2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要:为了实现精密零件尺寸在线检测的智能化与高精度,课题组设计了一种基于机器视觉的尺寸检测系统。该系统利用 OpenCV 实现算法设计,基于 Canny 边缘检测,结合 Zernike 矩实现亚像素边缘提取,利用最小二乘法实现圆心拟合。在 QT 平台上,基于 OpenCV 结合 C++ 完成测量系统的界面开发。检测结果表明:该测量系统精度能达到 0.01 mm,能够满足当前项目需求。该测量系统具有一定的工程实用性。

关键词:机器视觉;尺寸检测;亚像素边缘;Zernike 矩;最小二乘法

中图分类号:TP274.5 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2021)05-0074-06

Design of On-Line Measuring System of Center Distance of Parts Based on Machine Vision

PENG Jingxin¹, SHI Xiudong¹, YAO Chenming², SUN Pan²

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to realize the intelligentization and high precision of the on-line dimension detection of precision parts, a dimension detection system based on machine vision was designed. The center of the circle fitting was realized by using OpenCV algorithm based on Canny edge detection, combining with the Zernike moment subpixel edge detection and using the least squares method. On the QT platform, the interface development of the measuring system was completed based on OpenCV combined with C++. The test results show that the accuracy of the measuring system can reach 0.01 mm, which can meet the requirements of the current project. The measuring system has certain engineering practicability.

Keywords: machine vision; size detection; sub-pixel edge; Zernike moment; least squares

随着“中国制造 2025”发展战略的深入推进,工件尺寸特征测量技术也在飞速发展,工业上对于新的测量技术有更高的要求,需要满足自动化、高精度、高效率的特点^[1]。测量精度与相机的分辨率、光学成像系统以及图像处理算法密切相关,在技术方面如何提升尺寸测量的精度是现代制造业重要的研究方向^[2]。相机分辨率的盲目提高势必会带来成本的增加,如何在硬件条件一定的情况下提升测量精度,就需要在图像处理算法上做出改进。

在尺寸测量系统中,测量精度与边缘检测的精度

有很大关系。目前,边缘检测中比较经典的算子包括 Canny, Roberts, Sobel, Prewitt 和 Gauss-Laplace 算子等^[3]。但是,这些算子的检测精度在像素级。随着工业生产中对产品精度要求的不断提高,像素级的检测精度已经不能满足实际的生产需求。此时亚像素级别的检测算子引起越来越多的关注^[4]。将边缘领域的像素分解达到细化边缘,准确定位的方法被称为亚像素级边缘检测算法。比较常见的亚像素检测方法包括拟合法、插值法和空间矩等^[5~9]。其中 Zernike 矩^[10]作为经典的正交矩,具有对图像旋转以及尺寸变化稳

收稿日期:2021-01-20;修回日期:2021-07-13

基金项目:江苏省食品先进制造装备技术重点实验室项目(FMZ201801)。

第一作者简介:彭晶鑫(1996),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要研究方向为视觉检测、图像处理。E-mail:1309131299@qq.com

定不变的特性,使得定位精度较高,在实际生产过程中应用较为广泛。课题组设计了一种基于 Zernike 距亚像素级别边缘点拟合圆心测量零件圆心距尺寸的在线检测方法。

1 测量系统概述

该测量系统主要由 4 个部分组成:图像采集、图像算法处理、尺寸测量和结果输出。其工作流程如图 1 所示。

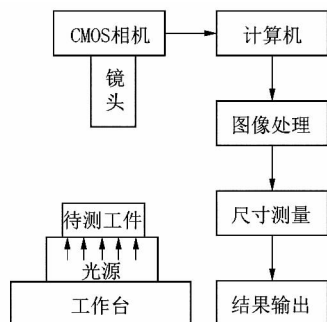


图 1 测量系统工作流程图

Figure 1 Measuring system flow chart

2 测量系统硬件设计

测量系统的硬件主要包括 LED 光源、工业相机、镜头、计算机和试验工作台。光源选择的原则就是突出目标轮廓与背景分离,综合考虑选择 LED 背向平行光源;工业相机用来采集图像,并通过千兆网口传输到计算机内存中,本系统采用海康威视的 MV-CA060-10GC 型 CMOS 面阵相机,分辨率为 $3\,072 \times 2\,018$ 像素。镜头选择海康威视 MVL-HF0828M-6MP,具有高分辨率、画面清晰度均匀性高及超低畸变等优点。实验处理器为 Intel i5-8300CPU @ 2.3GHz,内存 8.00 GiB;QT 平台基于 OpenCV 机器视觉库与 C++ 结合完成测量系统界面开发。

3 测量系统算法设计

测量系统流程如图 2 所示。

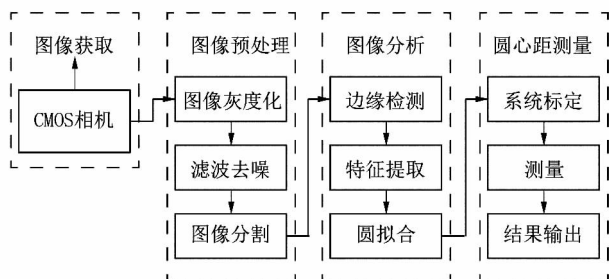


图 2 测量系统算法流程

Figure 2 Measuring system algorithm flow

图像处理算法决定了测量系统的准确性,该测量系统主要由图像预处理、图像分析和系统标定等步骤组成。课题组以双圆孔型零件为研究对象,为了达到准确测量零件圆心距的项目需求,设计了相关图像处理算法。

3.1 图像预处理

图像预处理是图像处理中比较重要的步骤。既能对图像的视觉效果有所改善,又能减少后续处理的数据内容,便于提高测量系统的效率及精度^[11]。

3.1.1 滤波处理

平滑滤波以解决图像中的噪声是图像处理领域中常见阶段,传统的滤波算法(例如高斯滤波、中值滤波、均值滤波等)可以合理地消除噪声,但是存在边缘模糊的问题,不利于边缘轮廓的准确定位。课题组使用了各向异性扩散滤波算法,基本原理是将图像中的灰度值视为化学物质的质量分数值,物质之间的外部扩散等同于平滑滤波,根据合适的热扩散系数,可以提高区域内的平滑度并减小区域之间的平滑度差异的实际效果,从而有效处理噪声,保留边缘细节。图 3 为扩散滤波处理后的二维效果图,图 4 为扩散滤波处理后的三维效果图。在经过一系列参数设置试验后,发现当迭代次数 $\lambda = 10$,使用参数 $t = 0.1$ 时,既能很好地去除噪声,又没有对边缘造成破坏,达到了理想中去噪保边的效果。

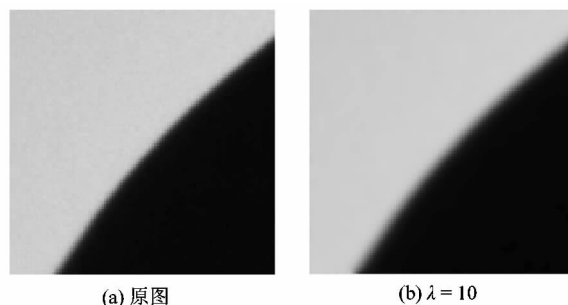


图 3 扩散滤波处理二维效果图

Figure 3 2D effect diagram of diffusion filtering processing

3.1.2 图像阈值分割

在图像处理中将待测工件与背景分割,避免对非“兴趣”区域进行运算,提高图像处理算法的效率。在图像分割的过程中,阈值的选择对边缘的提取有很大程度的影响^[12-14]。公式如下:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) > T; \\ 0, & f(x, y) \leq T. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 为像素点 (x, y) 的灰度值; $g(x, y)$ 为图像

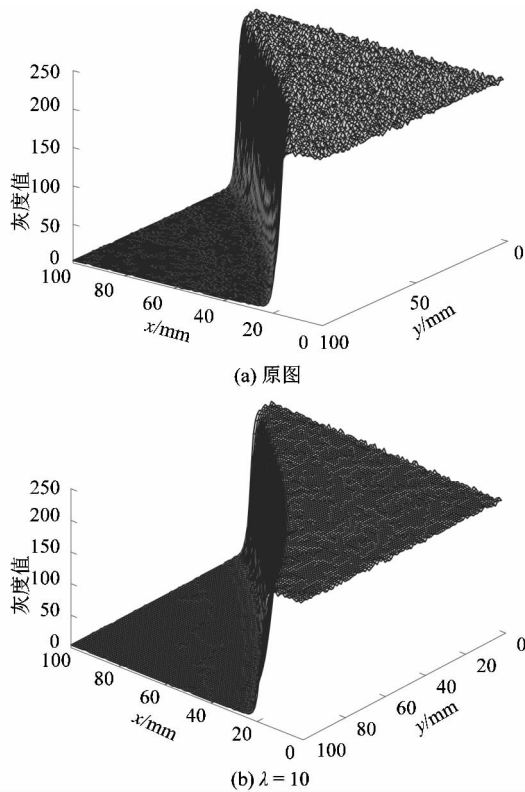


图4 扩散滤波处理三维效果图
Figure 4 3D effect diagram of diffusion filtering processing

分割后的像素点坐标值; T 为阈值(以能完整提取“兴趣”为原则,文中采用最大类间方差法求得 T 为 101)。

式(1)表示的实际含义是图像中像素点灰度值大于阈值灰度值时 T 设置为 1,如果低于阈值灰度值时,则 T 设置为 0。为避免遗漏零件轮廓边缘,采用闭运算进行形态学处理,图像分割效果如图 5 所示。



图5 OTSU 法二值化图像
Figure 5 Binary results by OTSU method

3.2 图像分析

3.2.1 亚像素边缘检测

Zernike 作为一种积分算子,应用于亚像素检测中定位精度较高,同时抗噪声性能良好,在边缘检测中优势明显。基本原理为:由于 Zernike 矩具有旋转不变性,基于理想的阶跃边缘模型,根据矩的关系式结合合适的阈值处理方式,求得相关边缘参数,从而定位亚像

素边缘点。Zernike 矩的关键是极坐标内部空间中准确定位单位圆 $x^2 + y^2 \leq 1$ 的复数函数集:

$$V_{nm}(x, y) = V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm}(\rho) e^{jm\theta} \quad (2)$$

式中: n 为多项式阶数, m 为幂指数,均为整数并满足 $n \geq 0, n \geq |m|$ 且 $n - |m|$ 为偶数; ρ 为边缘点到圆心的直线距离; θ 为边缘点垂线与 x 轴之间的夹角; j 表示虚数单位。

$R_{nm}(\rho)$ 为实值径向多项式:

$$\sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)! \rho^{(n-2s)}}{s! \left(\frac{(n+|m|)}{2} - s\right)! \left(\frac{(n-|m|)}{2} - s\right)!} \quad (3)$$

边缘点的 n 阶 m 次 Zernike 矩 Z_{nm} 定义为:

$$\frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) V_{nm}^*(\rho, \theta) dx dy \quad (4)$$

式中 $V_{nm}^*(\rho, \theta)$ 为 Zernike 共轭多项式。

如图 6 所示,将像素看作单位圆, O 为像素中心, 1 个像素单位为半径。边缘分割线 $f(x, y)$ 将像素点圆进行再次细化分成 2 部分,灰度值分别为 h 和 $h+k$ (k 为阶跃灰度值), d 为像素中心到边缘分割线的距离。图 6(b) 是图 6(a) 沿像素中心顺时针旋转 θ 后的边缘模型。

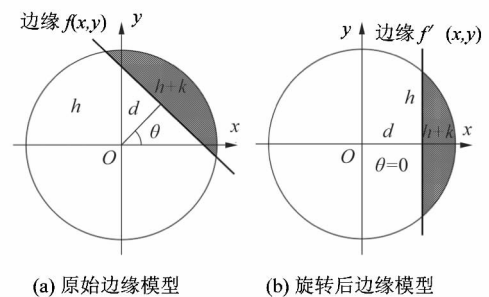


图6 Zernike 矩边缘模型
Figure 6 Zernike moment edge model

基于 Zernike 矩旋转不变的特性,只改变相位角,幅值不变。设旋转之后的 Zernike 矩为 Z'_{nm} , 可得旋转前后矩的关系式:

$$Z'_{nm} = Z_{nm} e^{-jm\theta} \quad (5)$$

求得 4 个模型参数 θ, d, h 和 k :

$$\theta = \arctan \left[\frac{\text{Im}(Z_{11})}{\text{Re}(Z_{11})} \right];$$

$$d = \frac{Z_{20}}{Z'_{11}} = \frac{Z_{20}}{Z_{11}} e^{-j\theta};$$

$$h = \frac{Z_{00} - \frac{k\pi}{2} + k \arcsin d + kd \sqrt{1-d^2}}{\pi};$$

$$k = \frac{3Z'_{11}}{2(1-d^2)^{3/2}} = \frac{3Z_{11}}{2(1-d^2)^{3/2}} e^{j\theta} \quad (6)$$

在 $N \times N$ 的 Zernike 模板内,亚像素点的坐标公式:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \frac{N}{2} d \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: (x_s, y_s) 表示边缘亚像素点坐标, (x_0, y_0) 表示像素中心点坐标。

亚像素边缘点的判定条件: $k \geq k_i$ 且 $d \leq d_i$ 。 k 为灰度差值; k_i 为灰度阈值; d_i 为距离阈值。阈值的选择对于边缘点是否能准确定位至关重要。如果灰度阈值 k_i 取值太小,则会导致虚假边缘,如果灰度阈值 k_i 过大,则会丢失边缘。传统的 Zernike 矩边缘检测优化算法都是固定灰度阈值,效率较低,精度不高。课题组采用最大类间方差法对零件全局图像进行最优灰度阈值选取,提升了测量系统的精度。实现该图像算法代码如下:

```
Zernike_Subpixel (const cv::Mat img,
cv::Rect rect,
double k_value,
Zernike_Matric zernike_matric,
Vector<Point2f> &subpixelContours,
Point2f rawCenter,
float rawRadius,
int ringthickness);
```

如图 7 所示, Zernike 亚像素边缘检测算子可以达到细化粗边缘像素点,从而实现精准定位的目的。

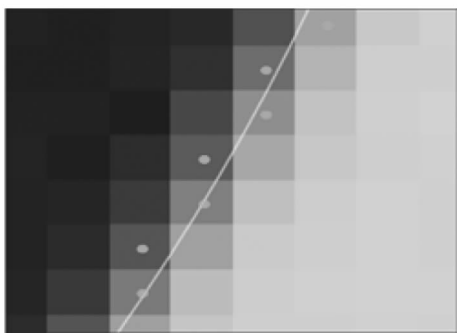


图 7 边缘检测示意图

Figure 7 Schematic diagram of edge detection

3.2.2 圆拟合

课题组采用最小二乘法对零件圆轮廓的亚像素边缘特征信息进行圆心的拟合。根据最小均方差准则,使在该平面圆的圆周上采集的离散点 (x_i, y_i) 与理想圆圆心 (x_e, y_e) 距离残差平方和最小化。离散点到圆

心的距离 d_i 表示为:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_e)^2 + (y_i - y_e)^2} \quad (8)$$

边缘轮廓上的点与理想圆的误差 ε_i 可表示为:

$$\varepsilon_i = d_i^2 - r^2 \quad (9)$$

依据最小二乘法原理轮廓各个边缘点与半径 r 的误差平方和 M 最小,即:

$$M = \min \left(\sum_{i \in E} (\varepsilon_i)^2 \right) \quad (10)$$

式中 E 为边缘轮廓点的集合。

将式(10)看作 x_e, y_e, r 的三元函数 $M = f(x_e, y_e, r)$ 。由函数求极值的方法,分别对参数 x_e, y_e, r 求偏导,并令 $\frac{\partial M}{\partial x_e} = \frac{\partial M}{\partial y_e} = \frac{\partial M}{\partial r} = 0$,由此可以求得圆心坐标 (x_e, y_e) 和半径 r 。

4 实验结果分析

搭建实验平台,对试件进行 15 次测量实验,根据最小二乘法,获取左右圆的圆心位置分别为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) 。以圆心之间的欧式距离作为像素尺寸,则圆心距计算

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (11)$$

利用式(11)计算出的圆心距作为像素距离,单位为像素,利用系统预先标定求得的像素当量 n 可以求得圆心距的物理尺寸。以三坐标测量机圆心距测量数据为标准参考值,该测量系统测量值与三坐标机测量误差在 0.01 mm 以下,测量结果曲线如图 8 所示。对比 2 种测量方法的数据曲线,表明该系统测量结果可靠,精度满足实际生产需求。

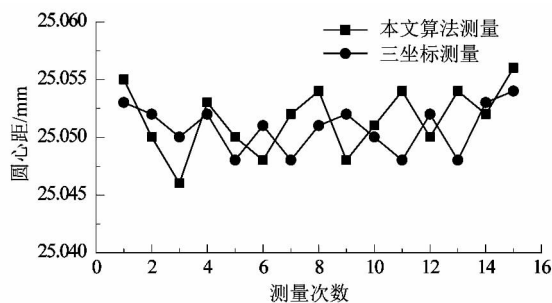


图 8 测量结果曲线

Figure 8 Graph of measurement results

5 测量系统界面设计

在 QT 平台下,利用 C++ 语言开发了圆心距测量系统。采用 OpenCV 视觉库完成图像处理算法的设计,结合 C++ 语言,完成界面设计,测量界面如图 9 所示。该测量系统能够实时显示试件 2 个内圆的圆心距和圆心坐标。



图9 测量系统界面

Figure 9 Interface of measuring system

6 结论

课题组设计了基于机器视觉技术的零件圆心距在线测量系统,该系统利用 OpenCV 视觉库进行算法设计,实现对零件圆心距的非接触式智能化测量。使用改进的 Zernike 矩亚像素边缘检测算子检测边缘轮廓点,在相机分辨率不变的情况下,提升了测量精度,同时节省了硬件配置成本,具有一定的工程实用价值。该测量系统下一步的任务是不断完善其通用性,并应用于准确测量孔型零件的其它主要参数中。

参考文献:

- [1] 万子平,马丽莎,陈明,等. 机器视觉的零件轮廓尺寸测量系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2017,17(12):32-34.
- [2] 胡子文. 亚像素视觉测量技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019:1.

(上接第 73 页)

3 结论

课题组提出一种基于改进遗传算法与二维最大熵的编织袋缺陷检测方法,通过搭建编织袋缺陷检测软硬件系统,对某厂复合编织袋生产过程中产生的缺陷进行在线检测,达到了良好的效果。试验结果表明:

1) 预处理抑制了背景纹理,增大了缺陷与背景的分度,利于后续的缺陷分割;

2) 结合改进遗传算法的二维最大熵分割预处理图所获得的质量缺陷细节清晰,结构干扰元素与细微瑕疵点被抑制,其缺陷分割精度要远高于一维最大熵法与迭代阈值法,IoU 系数高于 0.899,同时,相较于结合一般遗传算法的二维最大熵法,其分割速度更快,平均分割时间缩短了 7.4%;

3) 对分割出的缺陷进行连通域标记,快速获取缺陷的数量、质心等参数,实现缺陷的精准统计与定位。

参考文献:

- [1] 李纪峰,赵凤霞,金少搏. 玻璃纤维布的机器视觉缺陷检测系统设计

- [3] 蔡艳,叶连祥,孙大为,等. 基于改进的 Zernike 矩亚像素边缘提取算法外螺纹非接触测量[J]. 上海交通大学学报,2014,48(10):1468-1472.
- [4] 杨浩,裴蕾,李昌顺. 基于 Zernike 矩亚像素边缘检测的快速算法[J]. 计算机应用研究,2011,28(11):4380-4385.
- [5] 吴鹏,徐洪玲,宋文龙,等. 基于非线性四阶图像插值的亚像素边缘检测算法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2015,36(2):243-247.
- [6] DA F P, ZHANG H. Sub-pixel edge detection based on an improved moment[J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(12):1645-1658.
- [7] 朱维斌,刘明佩,叶树亮. 基于邻域特性分析的小模数齿轮亚像素图像边缘检测[J]. 仪器仪表学报,2018,39(3):148-156.
- [8] FABIJANSKA A. Gaussian-based approach to subpixel detection of blurred and unsharp edges [C]//2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems. Warsaw, Poland: IEEE, 2014:641-650.
- [9] 韩东,李煜祺,武彦辉. 基于高斯拟合的亚像素边缘检测算法[J]. 计算机应用与软件,2018,35(6):210-213.
- [10] GHOSAL S, MEHROTRA R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection [J]. Pattern Recognition, 1993, 26(2):295-306.
- [11] 何奎. 基于图像处理技术的圆环零件检测方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2017:15-20.
- [12] 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.
- [13] 许鑫杰,王秀峰,鲁文其,等. 基于边缘检测的零件轮廓识别系统开发[J]. 机电工程,2019,36(2):201-205.
- [14] 郑文学,岳智珉,唐旭晨,等. 基于机器视觉的水表检定方法研究[J]. 机电工程,2019,36(3):271-274.

计[J]. 机械设计与制造,2018(1):163.

- [2] 张缓缓,马金秀,景军峰,等. 基于改进的加权中值滤波与 K-means 聚类的织物缺陷检测[J]. 纺织学报,2019,40(12):50-56.
- [3] 李小宁,杨学志. 结合自适应中值滤波和 GGCM 的织物质量检测[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2016,39(7):906-910.
- [4] 董蓉,李勃. 基于最优参数非线性 GLCM 的织物瑕疵检测算法[J]. 计算机工程与设计,2015,36(9):2467-2471.
- [5] 赵树志,狄岚,何锐波. 基于改进判别性完整局部二值模式与格分割的织物瑕疵检测方法[J]. 纺织学报,2018,39(9):57-64.
- [6] 唐长明,钟剑锋,钟舜聪,等. 基于改进自适应遗传算法和二维最大熵的超声红外热像缺陷识别[J]. 红外技术,2020,42(8):801-808.
- [7] 张恒,倪永婧. 面向目标特征提取的连通域标记算法[J]. 计算机与网络,2015,41(7):59.
- [8] 张袁,刁虹雪,林玉兵,等. 基于视觉传感器的经编织物缺陷检测系统研究[J]. 工业控制计算机,2017,30(1):10-11.
- [9] 胡浩,李俊峰,沈军民,等. 基于机器视觉的小磁瓦表面微缺陷检测方法研究[J]. 机电工程,2019,36(2):117-123.
- [10] 刘艳华. 迭代阈值分割法在 X 射线焊缝检测中的应用[J]. 自动化技术与应用,2015,34(10):76.
- [11] 郭海涛,杨志民,田坦,等. 海底小目标声呐图像一维最大熵分割的改进方法[J]. 海洋学报(中文版),2007(4):153.