

·结构与工艺·

## 基于机器视觉的大型圆环零件圆度测量技术研究

段双林,姜月秋,李雪娇,高宏伟

(沈阳理工大学 沈阳 110159)

**摘要** 对于大型圆环零件的圆度测量目前主要采用人工接触式测量,工作效率较低。针对接触式测量的缺点,以基于机器视觉的非接触式测量技术对大型圆环零件圆度测量展开研究,测量过程中无需与待测零件直接接触,通过采集零件部分圆弧图像,利用拟合算法得到圆度及同心度数据。首先对采集到的图像进行预处理,针对采集图像存在噪声等因素的影响,选择处理效果最佳的双边去噪算法;其次在边缘检测及轮廓提取环节,在基于传统Canny边缘检测的基础上研究实现了改进后的Canny自适应边缘检测算法;在图像拟合环节,基于传统的最小二乘拟合算法做了改进,即最小二乘迭代拟合算法对大型圆环零件部分圆弧进行迭代拟合,验证了该算法的有效性及其优越性。本测量方法操作方便、可靠,提高了检测效率,可在误差允许的范围内快速测量出零件的尺寸。

**关键词** 机器视觉;图像预处理;Canny边缘检测;最小二乘法

中图分类号:TN606

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2018)-02-0068-05

## Research on Measurement Technology of Large Ring Parts Roundness Based on Machine Vision

DUAN Shuang-lin, JIANG Yue-qiu, LI Xue-jiao, GAO Hong-wei

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** The roundness measurement of large circular parts is mainly made by manual contact measurement, which is less efficient. For the disadvantage of contact measurement, the non-contact measurement technology based on machine vision is used to study the roundness measurement of large ring parts without direct contact with the parts to be measured, and the data of roundness and concentricity can be obtained by fitting the partial circular image of parts. At first, preprocessing the acquired image, and aiming at the influence of the noise and other factors, the bilateral denoising algorithm with the best processing effect is selected. And then, based on the traditional Canny edge detection, an improved Canny adaptive edge detection algorithm is developed for edge detection and contour extraction. At last, in the image fitting link, based on the traditional least squares fitting algorithm, the least squares iterative fitting algorithm is used to fit the partial arc of large circular parts, and the validity and superiority of the algorithm are validated. The measuring method is convenient and reliable, which improves the detection efficiency, and can quickly measure the size of the part within the allowable error.

**Key words:** machine vision; image preprocessing; Canny edge detection; least squares

对于大型零件的测量技术经历了从最开始的手工检测到自动化检测,从传统的接触式测量到非接触式测量。其中接触式测量主要以人工检测为主,存在效率低下、精度不高等问题。针对这些传

统零件测量方法所存在的问题,近年来基于机器视觉相关技术被广泛应用于各行各业,推动工业生产快速向前发展<sup>[1]</sup>。随着人工智能、机器学习和模式识别相关技术的飞速发展,国内外对机器视觉相关

收稿日期:2018-03-20

作者简介:段双林(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为图像处理、图像识别和机器学习;姜月秋(1975-),女,博士,教授,主要研究方向为空间网络技术和图像处理。

技术的研究也在持续升温,其应用从自动驾驶、癌症诊断、实时目标检测与定位技术,图像处理技术在机器视觉占据着越来越重要的地位<sup>[3-5]</sup>。

基于机器视觉的大型圆环零件圆度测量技术,对圆环零件进行图像采集时,只能对圆环零件的部分圆弧进行拍摄,再利用边缘检测与轮廓提取技术对图像的边缘轮廓进行提取并保存,最后利用图像拟合技术对提取到的边缘信息进行拟合,得到圆环零件内外圆的圆心坐标和半径数据,通过几何变量计算得到该零件的圆度与同心度数据,并进行分析研究。利用采集部分图像信息进行处理计算的技术不仅减小了系统的运算量,而且保证了检测精度,系统具有较高的利用率<sup>[6-9]</sup>。

## 1 图像预处理

### 1.1 图像灰度化

数字图像处理过程中,彩色图像是RGB三色通道,灰色图像只有单通道,所以处理彩色图像的运算量要远远大于对灰色图像的处理。灰度化后的图像包含原图像的所有特征信息。因此在对圆环零件进行尺寸测量时使用灰度图像可以减少系统的计算量,提高实时检测的成功率<sup>[10]</sup>。

### 1.2 图像去噪

由于成像设备自身的质量和外部监测条件的不理想,系统摄取到的零件部分圆环图像不可避免混入噪声,不同的滤波算法有其各自独特性质。通过对几种传统图像滤波算法的实验分析,发现双边滤波算法在对圆环图像进行滤波时,滤去噪声的同时保留了物体的边缘细节,所以本课题对采集图像去噪采用双边滤波方式处理<sup>[11]</sup>。

## 2 边缘检测及轮廓提取

### 2.1 边缘检测

传统的Canny边缘检测算子平滑滤波用到的高斯函数需要人为地设定其方差参数值。选择高斯滤波器对图像平滑滤波,其中用到的高斯平滑函数 $H(x, y)$ 。

$$H(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

$$G(x, y) = f(x, y) * H(x, y) \quad (2)$$

式中,  $f(x, y)$  表示图像数据;  $G(x, y)$  表示的是平滑后的图像。

改进的自适应Canny边缘检测算法使用自适应平滑滤波来代替高斯滤波,应用到对零件图像的边缘检测过程中,取得较好的检测结果。

改进方法如下:

(1)使用自适应平滑滤波来代替高斯滤波,采用较小的平均加权模板与原图像进行迭代卷积操作,用 $f^{(n)}(x, y)$ 表示第 $n$ 次迭代之后的图像。公式如下

$$f^{(n+1)}(x, y) = \frac{\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 f^{(n)}(x+i, y+j) w^{(n)}(x+i, y+i)}{\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 w^{(n)}(x+i, y+j)} \quad (3)$$

(2)计算得出 $x, y, 45^\circ$ 以及 $135^\circ$ 四个方向上的一阶梯度分量,用 $G_x(x, y)$ 、 $G_y(x, y)$ 、 $G_{45}(x, y)$ 、 $G_{135}(x, y)$ 表示,梯度幅值 $M(x, y)$ ,梯度角度 $\theta(x, y)$ 可以由以上4个分量求出,公式如下

$$M(x, y) = \text{sqrt}(G_x^2 + G_y^2 + G_{45}^2 + G_{135}^2) \quad (4)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (5)$$

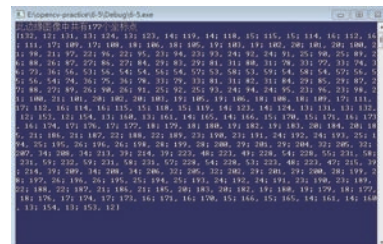
(3)引进Otsu算法对高低阈值进行设定,在对图像进行边缘检测过程中根据图像边缘的强度自适应的确定其高低阈值。

### 2.2 图像轮廓提取

使用OpenCV中的轮廓查找函数与提取函数,将检测到的图像的边缘轮廓绘制出来,同时将边缘点的坐标序列进行保存,如图1所示。



(a) 绘制轮廓后的结果



(b) 圆弧上各点坐标输出结果

图1 边缘检测与轮廓查找结果图

### 3 图像拟合

在进行拟合的过程中,最重要的两个步骤是对圆环图像边缘轮廓的查找以及对部分圆弧图像的拟合还原。其中图像的轮廓查找与提取的准确程度直接影响着圆环图像最终拟合还原质量的高低。对于拟合部分,在传统最小二乘拟合算法基础上研究,并实现了迭代最小二乘拟合算法。

最小二乘法原理是求得未知数据与实际数据之间的误差平方和达到最小,也就是保证下式中 $f$ 值达到最小,即

$$f = \sum \left( \sqrt{(X_i - X_c)^2 + (Y_i - Y_c)^2} - R^2 \right)^2 \quad (6)$$

迭代最小二乘算法在每次拟合时选择与上一次迭代较近的点进行拟合,经过多次迭代得到的圆心坐标与半径值,降低拟合过程中坐标点分布不均匀造成拟合误差,取得最佳拟合效果<sup>[12-13]</sup>。实现步骤如下:

(1)待检测点坐标 $(X_i, Y_i)$ ,  $i=1 \times N$ ,用 $\eta$ 表示收敛判别的系数,用 $t$ 表示迭代的次数。

(2)采用平均值法求解出圆心坐标值作为圆心坐标 $(a, b)$ 的初始值,公式如下

$$a = \sum x_i/n, b = \sum y_i/n \quad (7)$$

(3)根据圆的公式构建模型(I)如下

$$E_i = \sqrt{(X_i - X_c)^2 + (Y_i - Y_c)^2} - R^2 \quad (8)$$

最小二乘法要求距离的平方和最小,所以要保证 $E_i$ 取值最小,由于 $E_i$ 为非线性函数,在求解过程中受到初始点的选取以及阻尼系数的干扰,不容易得到高精度的优化解,所以在模型(I)的基础上改进得到模型(II)

$$E_i = \rho_i - X_0 \cos \theta_i - Y_0 \sin \theta_i - R \quad (9)$$

当拟合得到的圆心坐标 $(X_0, Y_0)$ 无限接近于0的时候,可以近似的将模型(I)与模型(II)看作完全等价。

(4)进行迭代拟合时将模型(I)中的圆心坐标进行转换,实现将坐标系原点最大程度地靠近圆心坐标 $(X_0, Y_0)$ ,将待检测的坐标点也做坐标转换。

(5)利用公式 $X = (A^T A)^{-1} A^T B$ 对模型(II)进行精确求解。

(6)收敛判断,设定迭代中终止的条件为

$$\mu = \left| \frac{X^n - X^{n+1}}{X^n} \right| < 1 \times 10^{-10} \quad (10)$$

其中, $X$ 表示 $a, b, r$ 。

### 4 几何量测量

针对提取出来的大型圆环零件的圆弧图像,结合数学中相关尺寸的测量原理对零件图像的轮廓进行测量,课题主要测量数据包括零件内外圆的半径和圆度、内外圆心坐标和同心度。

#### 4.1 圆环半径测量及圆度

圆度是指圆形零件的横截面接近理论圆的程度,是判定待检测的圆环零件是否合格的最直接依据。系统利用迭代最小二乘法拟合原理对得到的部分圆弧图像进行拟合,可以得到对应的内外圆环的半径值,然后求出圆度值<sup>[14]</sup>。

#### 4.2 圆环圆心坐标及同心度

同心度是指圆环零件内外两个同心圆圆心的重合程度,假设经过拟合得到的圆环零件外圆圆心坐标是 $(X_0, Y_0)$ ,内圆圆心坐标是 $(X_i, Y_i)$ 。同心度即为内外两圆圆心距离的绝对值,绝对值越小说明该圆环零件的同心度越高,同心度的计算公式如下

$$D = \sqrt{(X_0 - X_i)^2 + (Y_0 - Y_i)^2} \quad (11)$$

### 5 测量结果与分析

#### 5.1 实验设备和软件平台

实验设备包括图像采集设备和计算机两部分,图像采集设备使用MV-E600M系列的CCD工业数码相机,以及环形的LED光源作为照明设备,为了方便对图像的采集,系统使用的图像采集设备如图2所示,将相机用支架固定,并且相机在对图像进行采集的过程中可以上下、前后根据具体测量零件尺寸的大小适应性进行调动,扩大检测零件的尺寸范围。

在软件平台上,运行环境是基于Windows7系统上运用VS2010开发的,对图像的处理过程是基于OpenCV视觉函数库实现的,软件界面如图2所示。



图2 软件测量界面

## 5.2 实验结果与分析

### 5.2.1 零件实验测量结果

选取圆环零件进行重复测量并对其测量误差进行分析。

图3为外圆直径500 mm,内圆直径为400 mm的圆环零件。



图3 圆环零件

表1是对圆环零件1内外圆心坐标的测量值以及对同心度的计算结果。

表1 零件的圆心坐标与同心度测量值 单位/mm

测量次数	外圆圆心坐标	内圆圆心坐标	同心度
1	(644.70, 514.73)	(644.57, 514.60)	0.183
2	(644.86, 514.77)	(644.61, 514.65)	0.277
3	(644.69, 514.62)	(644.59, 514.60)	0.102
4	(644.66, 514.60)	(644.57, 514.58)	0.092
5	(644.72, 514.72)	(644.60, 514.64)	0.144
6	(644.71, 514.73)	(644.60, 514.63)	0.149
7	(644.71, 514.74)	(644.60, 514.65)	0.142
8	(644.67, 514.62)	(644.59, 514.55)	0.106
9	(644.68, 514.66)	(644.55, 514.56)	0.164
10	(644.76, 514.70)	(644.59, 514.60)	0.197
11	(644.73, 514.71)	(644.59, 514.59)	0.184
12	(644.80, 514.70)	(644.61, 514.62)	0.206
平均值	(644.72, 514.70)	(644.59, 514.61)	0.162

表2是对圆环零件内外半径的检测值以及对圆度的计算结果。

表2 圆环零件的内外半径测量值 单位/mm

次数	外径	内径	外圆度	内圆度
1	500.201	400.219		
2	500.225	400.256		
3	500.449	400.427		
4	500.354	400.377		
5	500.398	400.450		
6	500.402	400.371		
7	500.209	399.210		
8	500.311	400.333		
9	499.420	400.449		
10	500.399	400.457		
11	500.398	400.379		
12	500.341	400.326		
平均	500.342	400.354	0.248	0.240

测量系统要求最大误差不超过1 mm,通过对圆环零件进行测量可以看出,系统对圆环零件的圆度以及同心度的测量结果的误差都在允许的误差范围之内,通过多次测量求平均值可以缩小误差范围。

### 5.2.2 误差分析

(1)图像的噪声误差。采集待检测图像时不可避免的混入一部分噪声,对图像进行预处理的过程中不可能完全消除噪声的影响。

(2)系统的硬件误差。检测系统的环境因素偏差会导致在读取零件边缘信息时形成提取误差,图像获取设备的限制,会使得图像在读取过程中精度不够,造成图像读取误差。

(3)系统的软件误差。系统的软件误差也就是计算方法不完善所造成的误差。测量过程中图像预处理与边缘提取出现的误差都会对图像的拟合造成干扰,导致拟合得到的圆心坐标与半径出现误差,造成计算出的圆度与同心度数据出现误差。

(4)利用最小二乘法进行圆拟合时,在拟合圆



心时由于此算法的复杂度,优化此算法后在圆的拟合过程中仍存在误差。

## 6 结论

针对传统的接触式测量方法的一些缺点及局限性,基于机器视觉的大型圆环零件的检测技术不需要和待检测零件有直接接触,并有较快的测量速度与高测量精度、实时性高,凭借这些优势使得基于机器视觉的检测技术在生产制造业中发展迅速。

## 参考文献

- [1] 田树涛. 测绘新技术在工程测量中的应用与研究[J]. 建筑设计管理, 2014, 5: 95-96.
- [2] 刘祥锋. 基于机器视觉技术的零件尺寸检测系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [3] 关胜晓. 机器视觉及其应用发展[J]. 自动化博览, 2005, 3: 88-92.
- [4] 马玉真, 胡亮, 方志强. 计算机视觉检测技术的发展及应用研究[J]. 济南大学学报, 2004, 3: 222-227.
- [5] 刘兆妍, 马翠红, 刘兆妮. 基于机视觉的机械零件测量技术[J]. 机械设计与制造, 2005, 7: 144-146.
- [6] Jiang B C, Wang C C, Hsu Y N. Machine vision and background remover-based approach for PCB solder joints inspection[J]. International Journal of Production Research, 2007, 45(2): 451-464.
- [7] Huang Y J, Lee F F. Classification of phalaenopsis plantlet parts and identification of suitable grasping point for automatic transplanting using machine vision[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(1): 89-99.
- [8] Slaughter D C, Obenland D M, Thompson J F, et al. Non-destructive freeze damage detection in oranges using machine vision and ultraviolet fluorescence[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 48(3): 341-346.
- [9] Kuo W M, Chuang S F, Nian C Y, et al. Precision nano-alignment system using machine vision with motion controlled by piezoelectric motor[J]. Mechatronics, 2008, 18(1): 21-34.
- [10] 彭激汐, 赵冠先, 王志前. 基于图像识别系统的灰度化算法研究与效率分析[J]. 电子世界, 2014, 7: 105-106.
- [11] 刘涛. 小波域中的非局部平均去噪算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [12] 吕洪赫, 姚振杰, 易卫东. 基于对称性的最小二乘拟合随机椭圆检测算法[J]. 电子测量技术, 2011, 34(5): 37-41.
- [13] 张秀芝, 王龙山, 于忠党. 基于最小二乘支持向量回归的小零件精密测量技术研究[J]. 农业机械学院, 2009, 40(8): 189-192.
- [14] 车佳斯. 零件圆度与圆柱度的图像测量研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2015.

## (上接第35页)

- [2] 朱桂兵. 无铅锡膏印刷缺陷的3D-SPI分析[J]. 丝网印刷, 2011(3): 33-36.
- [3] 易群生. 锡膏印刷质量检测中的光栅控制及三维测量技术研究[D]. 广东: 广东工业大学, 2012.
- [4] 张效栋, 孙长库, 刘斌, 等. 电路板锡膏均匀性参数检测系统[J]. 纳米技术与精密工程, 2008, 6(4): 278-283.
- [5] Huang C Y, Lin Y H, Ying K C, et al. The solder paste printing process: critical parameters, defect scenarios, specifications, and cost reduction[J]. Soldering & Surface Mount Technology, 2011: 211-223; DOI: 10.1108/09540911111169057.
- [6] Wang S T. Integrating the Taguchi method and the multi-attribute decision-making method to optimize the surface mount technology solder paste printing thickness process[J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, 2013, 0(0): 1-9; DOI: 10.1177/0954405413484138.
- [7] 卢韶芳, 费斌, 张超, 等. 摄像机定位深度误差修正方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(1): 36-40.
- [8] 文生平, 曾小英, 刘云明. 基于蚁群算法的Tripod机器人路径优化研究[J]. 机械与电子, 2017, 35(3): 77-80.
- [9] 王树西, 李安渝. Dijkstra算法中的多邻接点与多条最短路径问题[J]. 计算机科学, 2014, 41(6): 217-224.
- [10] 刘金生, 余义斌, 罗兵. 基于压电陶瓷的锡膏三维检测投影光栅移相设计[J]. 五邑大学学报(自然科学版), 2012, 26(1): 49-52.