DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.02.007

基于机器视觉算法的轴承套端面缺陷检测研究

骆腾斌¹,陈 硕^{1*},赵紫阳¹,连青惠²

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116; 2. 福建省永安轴承有限责任公司, 福建 永安 366000)

摘要:针对目前人工检测轴承套端面缺陷存在的效率低、人为因素影响大等诸多问题,提出了一种应用机器视觉技术实现轴承套端 面缺陷检测的方法。首先,对采集到的图像进行了平滑处理,并运用自适应阈值的 Canny 算子完成了边缘检测;其次,利用最小二 乘法拟合了轮廓圆,从而提取出了轴承端面的圆环区域;然后,通过 Otsu 算法计算出了圆环区域的最佳阈值,实现了阈值分割;最 后,通过提取各连通域的特征来检测和判别缺陷。实验结果表明:该方法能有效地检测出轴承套端面存在的缺陷,且误检率低于 3%,漏检率低于 1%,检测时间不超过 50 ms,可满足在线检测要求。

关键词:轴承;表面检测;Otsu 算法;机器视觉

中图分类号:TH133.3;TP391.4 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)02-0148-05

Defect detection algorithm for bearing end face based on machine vision technology

LUO Teng-bin¹, CHEN Shuo¹, ZHAO Zi-yang¹, LIAN Qing-hui²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Fujian Yongan Bearing Co., Ltd., Yongan 366000, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and high influence of human factors in manual inspection of bearing end face defects, a method was proposed to detect the defects of bearing end surface by machine vision technology. Firstly, the image was smoothed and the edge detection was done by using the Canny operator of adaptive threshold. Secondly, the contour circle was fitted by the least square method to extract the annular area of the bearing end face. Thirdly, the optimal threshold of the ring region was calculated by Otsu algorithm, so that the threshold segmentation can be realized. Finally, the defects were detected and discriminated by extracting the characteristics of the connected domains. The experimental results indicate that the method can effectively detect the defects. The false detection rate is less than 3% and the undetected rate is less than 1%. The detection time is less than 50ms. The proposed algorithm can meet the requirements of on-line inspection.

Key words: bearing; surface inspection; otsu algorithm; machine vision

0 引 言

受加工过程中各种不确定因素的影响,轴承内外 套端面加工后依然可能会出现凹坑、划痕、锻废、大小 边等缺陷。上述这些缺陷一方面影响轴承外观,另一 方面轴承套端面作为后续加工的定位面,若缺陷严重,则可能影响轴承各零件的配合,从而降低轴承的耐用性能,给配套主机的正常使用埋下安全隐患。因此,存在这些缺陷的轴承套,在进入下一道工序前必须剔除掉^[1-2]。目前,国内轴承生产企业主要依赖人工目测完

收稿日期:2017-06-19

作者简介:骆腾斌(1994 –),男,福建仙游人,硕士研究生,主要从事数字图像处理、机电一体化技术的研究。E-mail:605833418@ qq. com **通信联系人:**陈 硕,男,教授,硕士生导师。E-mail:shuochen@ fzu. edu. cn

成上述缺陷检测与次品的剔除。然而,人工目测不仅 效率低下,还很容易出现误检和漏检,人为因素影响 大,稳定性和可靠性较差,因漏检造成的退换货现象时 有发生,给企业造成经济上的损失之余,也降低了客户 对其产品的信任度^[3]。鉴于此,轴承生产厂家急需自 动检测设备来替代人工检测,降低人力成本,实现对产 品质量的严格控制。

基于机器视觉的检测方法凭借其速度快、精度 高、稳定性好等特点而受到广泛关注。王恒迪等 人^[4]通过改进的 Otsu 阈值分割方法和边缘检测技 术,实现了对轴承内外套端面的检测;陶青平等人^[5] 针对目前应用单阈值图像检测产品缺陷方法的局限 性,而多阈值分割算法仅能检测高于目标灰度缺陷 的情况,提出了一种基于 Otsu 多次阈值的方法,完成 了轴承端面缺陷检测;陈廉清等人^[67]对轴承检测也 作了较多研究。然而,现有的轴承表面质量视觉检 测方法大都存在着检测效率有待提高等问题,因此 仍需进一步的改进。

针对当前人工检测及现有检测算法所存在的不 足,本文提出一种新的轴承套端面缺陷视觉检测方法, 以提高检测效率与准确率。

1 轴承套端面区域提取

本算法首先对所采集图像进行平滑处理以减 弱噪声的影响,然后利用自适应阈值的 canny 算子 完成边缘检测,从检测结果中提取出边缘轮廓,再 采用最小二乘法拟合圆,最后分割出轴承套端面圆 环区域。

1.1 图像平滑处理

经由图像采集系统得到的原始图像都包含有某种 程度的噪声,为了抑制这些噪声,减弱其对后期缺陷检 测的影响,则需对图像进行平滑处理。为适应不同检 测过程的需求,本文共涉及两种图像平滑处理方法:中 值滤波与均值滤波。

中值滤波为常用的非线性滤波方法,也是图像处 理技术中最常用的预处理技术^[8]。它无论是在消除 噪声还是保存边缘信息方面都有较好的效果。因此, 本文选用3×3的函数窗对原始图像进行中值滤波处 理,再将处理结果用于边缘检测。然而,中值滤波会导 致算法对划痕、麻点等细小缺陷出现漏检。根据合作 厂家提出的宁可误检不可漏检原则,本文采用原始图 像经由内核大小为3×3的均值滤波后的输出结果作 为后续缺陷检测的图像。 原图及应用两种滤波方法处理原图的效果如图 1



1.2 边缘检测

Canny 边缘检测算子是 John F. Canny 于 1986 年 开发出来的一个多级边缘检测算法^[9]。在众多的图 像边缘检测方法中, Canny 算子以其严格的边缘检测 评价标准得到了广泛应用, 被很多人推崇为当今最优 的边缘检测算法。

为了尽量精确地确定边缘的位置,本文采用 Canny 算子来完成边缘检测工作。然而传统 Canny 算子高低 阈值是人为确定的,这就造成了它难以应用于自动化检 测。针对这一问题,一种解决方案是运用最大类间差 (Otsu)法确定 Canny 算子的高阈值^[10-12](记为α),再用 该高阈值乘以一个比例因子作为其低阈值(记为β)。

Canny 检测效果如图 2 所示。



该方法对图 1(b)的处理结果如图 2(a)所示;另一 种解决方案是运用迭代法确定阈值 $\alpha^{[13]}$,其对图1(b) 的处理结果如图 2(b)所示。以上两种方法虽检测到了 较丰富的边缘信息,但结果中也包含了许多误检的边 缘。考虑到边缘检测主要是服务于接下来的拟合圆操 作,而并不是用于检测缺陷,所以为了避免因边缘检测 产生误检,则 α 值不应过低,本算法选取图像的最大灰 度值作为 α 。对于 Canny 算子的高低阈值比,一般推荐 在 2:1~3:1 之间,本算法取 β =0.4 α 。通过对大量图像 进行测试,结果表明本文的阈值确定方法十分高效,而 且能使得基于该高低阈值的 Canny 算子具有较好的检 测效果,其对图 1(b)处理结果如图 2(c)所示。

1.3 端面圆环区域提取

轴承套圆心的定位及端面内、外圆半径的计算是

端面圆环区域提取的基础。Hough 变换、三点定圆法 及最小二乘法是常用的3种定位圆心的方法。

Hough 变换具有鲁棒性好^[14],对缺陷较大的圆也 能较准确定位圆心的优点,但其投票统计的累加过程 消耗大量的内存与时间。

由于随机提取3个边缘点坐标,三点定圆法是3 种方法中计算量最少的,但其定位精度也是最低的,无 法精确算得端面内外圆的实际圆心坐标和半径。

最小二乘法可以计算得到高精度的圆心和半径^[15],且计算量较少,占用的内存和消耗的时间也均较少。同时,因为最小二乘拟合的平方项对离群点 非常敏感,所以可以利用半径长度的先验知识与拟 合结果作比较,从而直接剔除轮廓存在较大缺陷的 轴承套。

综合考虑精度、计算复杂度和耗时,本研究采用最 小二乘法。

最小二乘法是一种数学优化技术,它通过最小化 误差的平方和找到一组数据的最佳函数匹配:设圆的 方程为 $x^2 + y^2 + ax + by + c = 0$,点集 (x_i, y_i) 是图像 中圆上的点, $i \in (1, 2, \dots, n)$ 。设圆心为 (x_0, y_0) ,半径 为 r_o 圆上点到圆心的距离平方 $d_i^2 = (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2$,为了减小计算量和复杂度,取其与半径平方的差 $\delta_i = d_i^2 - r^2 = x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c$ 作为目标误差。为 了使目标误差的平方和 $f(a, b, c) = \sum \delta_i^2$ 最小,需要 有 $\partial f/\partial a = \partial f/\partial b = \partial f/\partial c = 0$ 。经过计算可得:

$$a = \frac{BE - CD}{AD - B^2}, b = \frac{AE - BC}{B^2 - AD}$$
(1)

$$c = -\frac{\sum (x_i^2 + y_i^2) + a \sum x_i + b \sum y_i}{n}$$
(2)

其中:

$$\begin{cases} A = n \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i \\ B = n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i \\ C = n \sum x_i^3 + n \sum x_i y_i^2 - \sum (x_i^2 + y_i^2) \sum x_i \\ D = n \sum y_i^2 - \sum y_i \sum y_i \\ E = n \sum x_i^2 y_i + n \sum y_i^3 - \sum (x_i^2 + y_i^2) \sum y_i \end{cases}$$

所以, 拟合圆的圆心坐标为(-a/2, -b/2), 半径 为 $\sqrt{a^2 + b^2 - 4c/2}$ 。

据此,本算法便能简便地拟合出轴承端面的内、外 圆如图 3 所示。

继而本算法可提取出图1(c)中的轴承套端面圆 环区域,如图4所示。



2 缺陷检测

2.1 阈值分割

准确的阈值分割是缺陷检测的先决条件,而其最 大难点又在于门限阈值的合理选取。为适应各轴承套 间的差异,显然不能采用固定的门限阈值,故本研究只 考虑自适应阈值算法,如迭代法、Otsu 法^[16]。通过大量 测试,笔者最终决定采用 Otsu 法作为自适应阈值 算法。

Otsu 法是一种图像灰度自适应的阈值分割算法,由日本学者大津^[17]于 1979年提出。该算法通过计算不同阈值对应的类间方差,而类间方差最大意味着错分概率最小,从而求得分割图像的最佳阈值。

首先计算出图像的灰度直方图,其灰度级别记为 [i_{min}, i_{max}],然后对 $h(i) = n_i$ 进行归一化,并令 $p_i = n_i/N$,其中:N—图像中像素点的总个数, p_i —不同灰 度值在图像中的概率,于是有 $\sum p_i = 1$ 。

现假设阈值将图像中的像素点分为了背景 C_0 与前景 C_1 两类, C_0 表示具有级别[i_{min} , T] 的像素, C_1 表示具有级别[$T + 1, i_{max}$] 的像素,则这两类出现的概率分别为:

$$\omega_{0} = \sum_{i=i_{\min}}^{T} p_{i} = \omega(T), \omega_{1} = \sum_{i=T+1}^{i_{\max}} p_{i} = 1 - \omega(T)$$
(3)

类 C_0 的灰度均值为:

$$\mu_0 = \sum_{i=i_{\min}}^{T} i \frac{p_i}{\omega_0} = \frac{\mu(T)}{\omega(T)}$$
(4)

类 C_1 的灰度均值为:

$$\mu_{1} = \sum_{i=T+1}^{i_{\max}} i \frac{p_{i}}{\omega_{1}} = \frac{\mu - \mu(T)}{1 - \omega(T)}$$
(5)

又因为 $\mu(T)$ 与 μ 分别为:

$$\mu(T) = \sum_{i=i_{\min}}^{T} i p_i, \mu = \mu(i_{\max}) = \sum_{i=i_{\min}}^{i=i_{\max}} i p_i \quad (6)$$

所以有:

 $\omega_0 + \omega_1 = 1, \omega_0 \mu_0 + \omega_1 \mu_1 = \mu$ (7)故而,类间方差为:

$$\sigma^2 = \omega_0 (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu)^2$$
 (8)
上式计算量较大,可将其简化为:

 $\sigma^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2$ (9)要使类间方差 σ 最大,则应该取,

$$T = \underset{i_{\min} \leq T \leq i_{\max}}{\operatorname{Argmax}} (\sigma^2) = \underset{i_{\min} \leq T \leq i_{\max}}{\operatorname{Argmax}} (\omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2)$$

为减少计算量,缩短程序的运行时间,应将阈值T 的取值范围限制在[i_{\min}, i_{\max}]区间。

研究运用 Otsu 法计算图 1(c) 及图 4 得到的阈值 T分别对图4进行分割操作,并将灰度值小于T的像素 点置为"255"(白色),其余像素点置为"0"(黑色),其 结果如图5所示。





(b) 基于圆环区域, T=41

(10)

(a) 基于全图, T=23

图 5 OTSU 阈值分割结果

同理,本研究以迭代法得到的阈值 T 对图 4 进行 分割的结果如图6所示。



(a) 基于全图, T=24



(b) 基于圆环区域, T=49 图 6 迭代法阈值分割结果

由图5的分割结果可以看出,Otsu 算法得到的全

图最佳阈值未能有效地分割出缺陷,如图5(a)所示, 存在漏检的风险;而基于圆环区域的阈值则能得到很 好的分割效果,如图 5(b) 所示。图 6(a) 表明,迭代法 基于全图得到的阈值虽能分割出缺陷,但分割得不完 整,所以同样存在漏检的可能;图 6(b)则说明迭代法 基于圆环区域得到的阈值可能导致算法出现误检。

因此,本算法采用 Otsu 法基于圆环区域得到的阈 值可以完成缺陷分割。

2.2 缺陷检测与判别

对于端面大小边缺陷,其主要特点是内、外圆不同 心,且圆环区域内可能并无其它缺陷,即无法通过阈值 分割完成缺陷判别,故本文直接于完成拟合圆之后便 予以剔除。该缺陷的判别是通过计算两拟合圆圆心间 的欧氏距离 d₀,再将其与给定阈值 D₀比较来完成的, 若d_p > D_p则判定为存在大小边缺陷,否则便继续通过 阈值分割进行其余缺陷判别。根据合作厂家的检测标 准,圆环区域的最大与最小宽度的差值应不超过 1 mm(对应到图像上约为10个像素),即内、外圆圆心 偏移量应不超过 0.5 mm,因此取阈值 D_n 为 5 个像素, 即 $D_n = 5_{\circ}$

基于本文算法,若端面合格,分割结果中将只有两 个圆:若端面存在缺陷,则分割结果中除了两个圆之外 还包含缺陷区域,如图5(b)所示。

因此.为避免误判,实际用于分割的图像是缩进了 2个像素的圆环区域,分割结果如图7所示。



图 7 缩进圆环区域分割结果

为判别轴承套端面是否存在缺陷,本文基于八邻 域标记算法提取出分割结果中的连通域,若连通域面 积S(像素数)大于给定的阈值(最小缺陷面积),则判 定存在缺陷。

实验结果与分析 3

为了评估本文提出的检测方法的性能,笔者共采 集200 幅轴承套图像作为测试样本,其中合格轴承套 图像100幅,其余为包含各缺陷类型的轴承套图像。 原始图像宽度为640×480像素,文中的所有插图均为

截取而来,且大小均为360×360个像素。

算法测试结果如表1所示。

	检测数	正确判别数	正确率/(%)
合格轴承套	100	97	97
缺陷轴承套	100	99	99
总计	200	196	98

分析实验结果发现,实验中误检、漏检现象的出现 主要是由于图像采集过程中受噪声干扰导致缺陷面积 S处于临界值的轴承被误判所引起的。针对以上情 况,可通过改善照明条件和优化算法以提高鲁棒性。

该实验在 Window7 系统、Visual Studio2010 平台 上进行,电脑配置 Intel(R) Pentium(R)处理器, 3.00 GHz主频,4G 内存。本算法通过 C++语言编程 实现,其对于每幅图像的检测时间均不超过50 ms,且 最少耗时仅为31 ms,完全能满足工业实时性要求。

结束语 4

本文提出了一种基于机器视觉技术的轴承套端面 检测方法,通过图像的灰度直方图快速地得到了 Canny 算子的高低阈值,实现了阈值自适应,并取得了较 好的边缘检测效果;再结合基于最小二乘法的圆拟合 算法完成了轴承端面区域提取,接着利用 Otsu 算法对 圆环区域进行了阈值分割,最后根据连通域的特征与 大小完成了缺陷判别。

实际测试结果显示:该方法具有检测正确率高、速 度快、重复性好等优点。下一阶段,笔者将应用其搭建 一套工业在线检测系统。

参考文献(References):

- 陈文达,白瑞林,吉 峰,等.基于机器视觉的轴承防尘盖 [1] 表面缺陷检测[J]. 计算机工程与应用, 2014(6): 250-254.
- [2] 李妍妍,樊连庆,张 毅.一种基于机器人控制软件的构 件缺陷管理方案[J]. 兵工自动化, 2017, 36(5): 88-91.
- [3] 陈 龙,侯普华,王 进,等.轴承表面缺陷类型识别算法

[J]. 计算机应用研究, 2015(5): 1549-1553.

- [4] 王恒迪,李 莎,杨建玺,等.轴承端面缺陷的视觉检测方 法[J]. 轴承,2016(3):60-63.
- [5] 陶青平,吴锡生.快速检测轴承表面缺陷方法的研究[J]. 微电子学与计算机,2011,28(10):98-100,104.
- [6] 陈廉清,崔 治,王龙山.基于差影和模板匹配的微小轴 承表面缺陷检测[J]. 中国机械工程,2006,17(10):1019-1022.
- 陈廉清,袁红彬,王龙山. SUSAN 算子在微小轴承表面缺 [7] 陷图像分割中的应用[J]. 光学技术,2007(2):305-307.
- [8] 冈萨雷斯. 数字圈像处理[M].3版. 北京:电子工业出版 社,2011
- [9] 钮圣虓,王 盛,杨晶晶,等.完全基于边缘信息的快速图 像分割算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2012,24 (11):1410-1419.
- [10] 张志强,宋海生.应用 Otsu 改进 Canny 算子的图像边缘 检测方法[J]. 计算机与数字工程, 2014, 43(1): 122-128,141.
- [11] 梁光明,孙即祥,马 琦,等. Otsu 算法在 Canny 算子中 的应用[J]. 国防科技大学学报,2003,25(5):36-39.
- MEI Fang, YUE Guang-xue, YU Qing-cang. The study on [12] an application of otsu method in canny operator [J]. Proceedings of the International Symposlim on Information **Processing**, 2009, 2(4):109-112.
- [13] 王小俊,刘旭敏,关 永. 基于改进 Canny 算子的图像边 缘检测算法 [J]. 计算机工程, 2012, 38 (14): 196-198, 202.
- 周勇亮,金 燕,何 萍,等. 随机 Hough 变换圆检测累 [14] 计加速算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2014. 26(4):574-580.
- [15] 霍建亮,曾 翎,王德胜,等.基于最小二乘法改进的随 机圆检测算法[J].光电工程,2011,38(5):145-150.
- 陈宁宁.几种图像阈值分割算法的实现与比较[J].电脑 [16] 知识与技术,2011,7(13):3109-3111.
- OHTUS N. A threshold selection method from gray-level [17] histograms [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics. 1979,9(1):62-66.

「编辑:李 辉]

本文引用格式:

LUO Teng-bin, CHEN Shuo, ZHAO Zi-vang, et al. Defect detection algorithm for bearing end face based on machine vision technology [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,35(2):148-152.

骆腾斌,陈 硕,赵紫阳,等.基于机器视觉算法的轴承套端面缺陷检测研究[J].机电工程,2017,35(2):148-152.