

圆柱型高精精密零件表面缺陷检测及形貌分析

苏俊宏 刘胜利

西安工业大学光电学院, 陕西 西安 710032

摘要 针对圆柱型高精精密零件高曲率表面缺陷检测的问题,设计并实现了基于机器视觉的在线检测系统。检测时,为了解决金属件表面反光的问题,设计了专用的光源系统和照明方式。通过光学系统和机械旋转平台的配合,圆柱型零件在旋转的过程中被光学系统成像,从而可以采集到完整的圆柱面图像;经过快速的图像处理技术,可以检测到微米级的轴承表面缺陷;然后对表面缺陷进行形貌分析,确定缺陷的类型。检测结果表明系统具有效率高、精度高、易于使用等特点,可有效解决圆柱型高精精密零件表面缺陷在线检测的问题。

关键词 测量; 机器视觉; 圆柱面缺陷检测; 图像处理; 高精精密轴承

中图分类号 TP274+.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.041202

Measure System of Surface Flaw and Morphology Analysis of Cylindrical High Precision Parts

Su Junhong Liu Shengli

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710032, China

Abstract High precision bearing is a kind of cylindrical parts. A machine vision based online detection system is designed and implemented to meet the need of high curvature surface defects detection of cylindrical parts. During the measurement, a special light source and a lighting system are used to solve the problem of the reflections on the metal surface. Through the combination of optical systems and mechanical rotating platform, cylindrical parts are imaged by the optical system in the process of rotation, then a complete cylindrical surface image can be acquired. Micron surface defects and dimensions of bearing can be detected after using the fast image processing technique. Through the analysis on the morphology of surface defects, the type of defects can be determined. Experiments show that the proposed system has the features of high efficiency, high accuracy and ease of use. It can effectively meet the needs of high precision bearing detection and dimension online detection.

Key words measurement; machine vision; cylindrical surface defect detection; image processing; high precision bearing

OCIS codes 120.4630; 100.2960

1 引言

圆柱型高精精密零件广泛地应用在航天、军事等先进领域。高精精密轴承作为圆柱型零件的一种,应用广泛,且精度要求很高。对于微小轴承,其加工过程复杂,检测难度较大,并且在使用时对其表面光洁度都要较高^[1-2],高曲率的表面缺陷检测仍是一个难题,因此对高精精密轴承表面缺陷高精度的在线检测^[3]是迫切需要解决的问题。高精精密轴承一般为空心圆柱体,待测缺陷表面为整个圆柱面,要求检测出圆柱面上面积不小于 $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 的划痕、裂纹等缺陷,可以识别并且确定缺陷的类型。上海大学理学院利用 Gamma 技术对不同光照条件下带钢表面的缺陷检测进行了研究^[4];西安广播电视大学利用 X 射线对铝管表面的缺陷检测进行了研究^[5];日本基恩士通过“实时浓淡校正技术”对轴承钢珠表面缺陷实现了检测^[6],这些方法在金属面的检测中都有其优点,但是这些方法都是对特定金属面的检测,而对于高曲率金属面的检测,国内目前还没有一种特定的处理方法^[7-9]。针对轴承高曲率表面缺陷在工业环境下的检测需求^[10],本文将机器视觉的方法应用在轴承检测中,解决了金属件表面反光的问题,完成了表面缺陷高精度在线检测的任务^[11],并且根

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-11-22; 网络出版日期: 2014-03-11

基金项目: 陕西省科技厅工业攻关项目(2011K09-39)

作者简介: 苏俊宏(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: sujunhong@xatu.edu.cn

据缺陷形貌特征,确定了缺陷的类型。

2 实验原理及装置

检测系统主要由计算机、CCD 摄像机、照明系统、旋转平台等几个部分组成。采用型号为 AFT-VD500SM 的高分辨率工业数字相机;照明系统包括 LED 低角度环形光源和 LED 同轴光源;旋转平台由步进电机控制。检测系统中必须要保持 CCD 相机和被测件的相对位置不变,因此需要零件放置于旋转平台中心,并且用夹具固定,这就解决了在旋转过程中因为零件的移动而使拍摄的图像不在同一个物距的问题,从而避免了对检测系统的重复标定。

圆柱面缺陷检测时,一幅图像不能拍摄到整个柱面,需要通过 CCD 相机和被测件相对位置的变化,采集多幅图像,从而得到完整的柱面图像。旋转平台带动被测件旋转 360° ,使圆柱表面依次在相机上成像,采集多幅图像,获得柱面待测图像,然后将图像信息传输到计算机中保存,针对每一幅图像进行相应的处理,最终完成整个柱面的检测。检测系统原理图如图 1 所示。

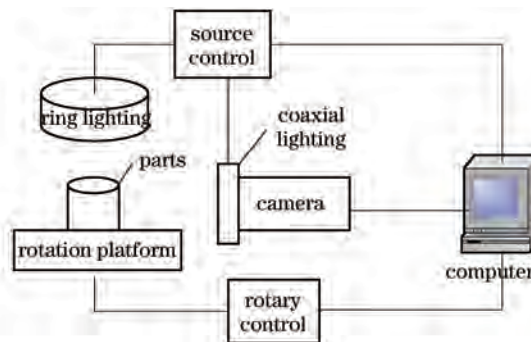


图 1 检测系统原理图

Fig.1 Principle diagram of the measuring system

3 缺陷检测

由于高精度轴承是金属件,表面比较光滑,尺寸也较小,圆柱面有很高的曲率,当光照射在零件表面时,只照亮了圆柱面的一部分,靠近这部分中间的面比较亮,然后亮度向两侧递减,所以采集到的图像光照不均匀,并且金属的光泽一般毫无规律且金属表面本身带有颗粒状的材质,因此金属表面的缺陷通常无法检测到。日本的基恩士对存在阴影渐变的图像,采用“实时浓淡校正技术”可以很好地找到瑕疵,这种技术主要是采用其公司研发的阴影校正滤波器对图像进行校正,但是这种技术成本较高,并且不适合应用在复杂的工业环境中。因此,在设计照明系统时,采用环形光照明和同轴光照明相配合的方法。经过实验分析,当光照度在 $70\sim 100\text{ lux}$ 之间时成像质量最好。在近距离显微成像时,所拍摄到的柱面可以近似看成一个平面,这样采集到的图像光照比较均匀,成像效果较好。缺陷检测时使用的是显微放大结构,摄像机和被测件位置固定不变,因此放大倍数也固定不变,避免了因为放大倍数变化,需要检测系统重复标定的问题。

3.1 缺陷识别

轴承表面缺陷分布具有随机性,形状大小不均匀,金属件的表面纹理分布无规律,在缺陷检测时容易产生干扰,所以单纯地使用边界分割的方法对噪声很敏感,且会提取很多虚假的目标缺陷,效果不是很理想。采用模板图像和原始图像相减的差值处理方法能够消除即使照明技术也无法消除的光泽不均匀的情况,从而实现之前无法完成的检测,可以对不同光照环境下得到的图像实施同一种处理方法,从而在不断变化的阴影图像中准确地提取目标缺陷。接下来再进行分割,提取缺陷。算法原理如图 2 所示。

由于轴承零件的倒角不需要检测,所以将倒角部分截去,截去后的原始图像如图 3 所示。对原始缺陷图像用大方块的模板进行均值滤波,模糊图像细节,得到模板图像,模板图像如图 4 所示。用 3×3 的小方块模板对原始图像进行中值滤波,去除噪声,得到去噪图像,去噪图像如图 5 所示。对模板图像和去噪图像进行减法运算,得到差值图像,对差值图像进行边缘检测,然后提取缺陷区域,如图 6 所示。与其他算法相比较,本算法最大优点在于简单、迅速,能够快速有效地消除光照不均匀以及噪声干扰的影响,因此对工业现场进

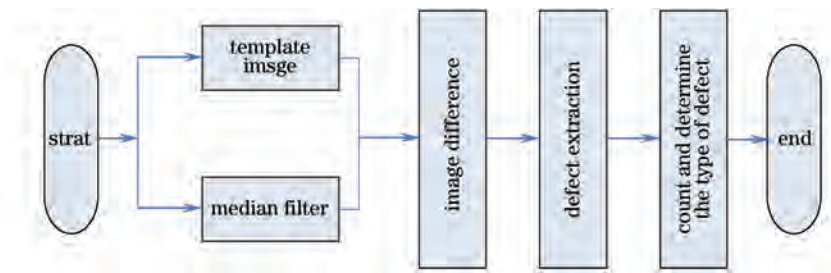


图2 算法原理示意图

Fig.2 Principle diagram of the algorithm

行图像采集的环境要求不高,特别适合于工业现场光照不均匀等比较复杂的环境条件下的在线检测。



图3 原始图像

Fig.3 Original image



图4 模板图像

Fig.4 Template image



图5 中值滤波后图像

Fig.5 Image after median filtering



图6 缺陷提取结果

Fig.6 Result of defect detection

3.2 缺陷形貌分析

目前国内的缺陷检测技术只能对缺陷进行定量的分析,而不能对缺陷的类型进行详细的分类。通过对表面形貌的分析可以得出缺陷的类型,根据缺陷类型的分析找出造成表面缺陷的原因,可以采取有效的措施,预防缺陷的产生,从而提高产品质量和生产效率。

模式识别技术是研究计算机自动化的一门科学,主要有统计模式识别法、模糊模式识别法、结构模式识别法、神经网络模式识别法等。运用神经网络模式识别技术,对分类器进行大量的学习和训练,并对神经网络参数进行进一步的优化和选择,获得了多种表面缺陷都适应的分类方法。缺陷特征参数的选择主要依赖于对缺陷特征进行分析的结果。根据常见的表面缺陷的不同几何形态特征,以圆形度为判断标准对缺陷进行分类。缺陷目标的圆形度是在缺陷区域面积和边界周长的基础上表征缺陷形状复杂程度的特征量。该参数表示了缺陷形状与圆的相似程度,对常见表面缺陷特征进行识别比较有效,因此可根据圆形度取值的差异对不同的缺陷进行分类。

提取缺陷后,计算出缺陷的面积、周长和圆形度来确定缺陷的大小及类型。用圆形度在缺陷区域面积和周长的基础上计算缺陷形状复杂程度。对于某一缺陷区域,如果用 F 来表示圆形度, A 表示区域面积, B 表示区域周长,则圆形度计算公式为

$$F = \frac{B^2}{4\pi A}$$

对缺陷表面形貌进行分析,磕碰后的瑕疵的形状比较接近圆形,所以圆形度接近1,瑕疵三维形貌如图7(a)所示。裂纹呈线形,比较纤细,圆形度最大,圆形度大于7,裂痕三维形貌如图7(b)所示。划痕形状和裂痕比较相似,不过它比裂痕宽且浅,圆形度一般大于3且小于7,划痕三维形貌如图7(c)所示。通过对缺陷数据的分析可以得出缺陷的类型,圆形度范围如表1所示。

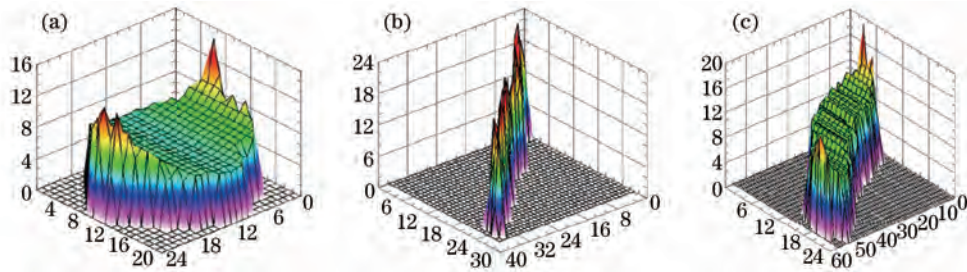


图7 缺陷三维形貌。(a) 瑕疵;(b) 裂纹;(c) 划痕

Fig.7 Three-dimensional morphology of different defect types. (a) Defects; (b) cracks; (c) scratches

表1 不同缺陷类型的圆形度范围

Table 1 Circular degree for different defect types

| Defect type | Defects | Scratches | Cracks |
|-----------------|---------|-----------|--------|
| Circular degree | 0~3 | 3~7 | >7 |

3.3 缺陷检测实验

为了验证缺陷检测系统的准确率及可行性,选取5个轴承被测件。首先,通过对缺陷数量的识别来确定检测系统的准确率。在显微镜下观察柱面缺陷并且计数;然后通过上述检测系统识别,对识别结果计数,将检测结果和显微镜下的结果进行比较,表2为缺陷准确率实验结果。

表2 缺陷准确率实验结果

Table 2 Experimental result for accuracy rate of defect detection

| Parts | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------|---|---|---|---|---|
| Detection system | 2 | 4 | 5 | 3 | 8 |
| Microscopic counting | 2 | 4 | 5 | 3 | 8 |

其次,对缺陷大小及类型进行检测。用缺陷的面积、周长来确定缺陷的大小,通过圆形度来确定缺陷的类型,在5个被测件中任意选取五幅缺陷图像进行检测,标定系数为0.005941 mm/pixel,表3为缺陷检测数据。

表3 缺陷检测数据

Table 3 Defect detection data

| Parts | Perimeter /pixel | Area /pixel ² | True size /mm ² | Circular degree | Defect type |
|-------|------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------|-------------|
| 1 | 153 | 1983 | 11.70 | 0.9369 | Defects |
| 2 | 144 | 930 | 5.53 | 1.7696 | Defects |
| 3 | 146 | 1282 | 7.62 | 1.3238 | Defects |
| 4 | 432 | 3352 | 19.91 | 4.4327 | Scratches |
| 5 | 141 | 1510 | 8.97 | 1.0482 | Defects |

检测结果表明,被测件表面缺陷及识别率可以达到100%,不仅可以通过周长和面积来衡量缺陷的大小,而且可以通过模式识别来确定缺陷的类型。缺陷检测系统有很高的检测精度及识别率,检测方法有效可行。

4 结 论

实验证明,本文的检测系统能够有效抑制光照不均匀以及噪声对微小缺陷检测的影响,并且可以准确识别零件表面宽度不小于20 μm,以及最小几何尺寸不小于20 μm×20 μm的的划伤、裂纹等缺陷,表面缺陷检测有很高的识别率及精度,并且可以根据缺陷特征对不同的缺陷进行分类。检测系统可有效解决精密轴承表面缺陷在线检测的问题,可以提高检测效率和精度并降低检验成本。该检测系统也可以应用于其他类似的高精密金属零件的在线检测。

参 考 文 献

- 1 D Martin, D M Guinea, M C Garcia-Alegre. Multi-modal defect detection of residual oxide scale on a cold stainless steel strip[J]. *Mach Vis Appl*, 2010, 21(3): 653-666.
- 2 T H Sun, C C Tseng, M S Chen. Electric contacts inspection using machine vision[J]. *Image Vis Comput*, 2010, 28(1): 890-901.
- 3 Cui Jiwen, Tan Jiubin. Circle contour measurement technique based on randomized Hough transform using gradient information[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 23(z4): 419-423.
崔继文, 谭久彬. 基于梯度信息的随机 Hough 变换圆轮廓测量技术[J]. *红外与激光工程*, 2006, 23(z4): 419-423.
- 4 Wang Zhenyu. Research on steel plate surface defects detection method based on machine vision[J]. *Computer and Modernization*, 2013, 35(7): 130-134.
王震宇. 基于机器视觉钢板表面缺陷检测技术研究[J]. *计算机与现代化*, 2013, 35(7): 130-134.
- 5 Wang Jingna. A machine vision based defect detection system for aluminum tube[J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2013, 6(1): 62-64.
王靖娜. 一种基于机器视觉的铝管缺陷检测系统[J]. *光学与光电技术*, 2013, 6(1): 62-64.
- 6 Chen Qingyun. Keyence Product Manuals [M]. Shanghai: Keyence International Trading (Shanghai) Co. LTD, 2013. 628-633.
陈青云. 基恩士视觉产品手册[M]. 上海: 基恩士国际贸易(上海)有限公司, 2013. 628-633.
- 7 S Deng, W W Cai, Q Y Xu. Defect detection of bearing surfaces based on machine vision technique[C]. *International Conference on Computer Application and System Modeling*, 2010, 548-554.
- 8 Fang Yan, Yang Xichen. Research on key techniques of defect detection for laser remanufacturing[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0403001.
方 艳, 杨洗陈. 激光再制造中缺陷识别关键技术研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0403001.
- 9 Fang Yan, Yang Xichen, Lei Jianbo. Research on shallow spot detection based on laser remanufacturing robot[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1203005.
方 艳, 杨洗陈, 雷剑波. 基于激光再制造机器人的表面浅斑缺陷识别研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1203005.
- 10 Zhang Ning, Chang Lei, Xu Xiping. Research on the technology of three-dimensional reconstruction based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 051001.
张 宁, 常 雷, 徐熙平. 基于机器视觉的三维重建技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 051001.
- 11 Hou Junjie, Wei Xinguo, Sun Junhua. Calibration method for binocular vision based on matching synthetic images of concentric circles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0315003.
侯俊捷, 魏新国, 孙军华. 基于同心圆合成图像匹配的双目视觉标定[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0315003.