

文章编号 1004-924X(2014)07-1871-06

## 金属圆柱工件缺陷的光电检测

张 静<sup>1\*</sup>, 叶玉堂<sup>1</sup>, 谢 煜<sup>1</sup>, 刘 霖<sup>1</sup>, 常永鑫<sup>1,2</sup>

(1. 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054;

2. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要:**针对金属工件外观缺陷检测存在光学照明不均、检测缺陷种类繁多、检测系统识别率不高等问题,研究了检测金属圆柱工件缺陷的方法。分析了局部二元模式(LBP)与局部图像方差强度(LVAR)的基本原理,研究了两者在金属纹理表面缺陷检测中的具体实现方法。采用 LBP 反应局部图形空间纹理模式, LVAR 突出图像强度对比信息,然后用 LVAR 计算结果作为权重值来调整 LBP 的局部纹理提取和度量结果,实现了金属圆柱工件的自动缺陷检测。实验中采用步进电机控制工件旋转,配合线阵相机采集圆柱工件的展开图像。实验结果显示,这种方法有效克服了金属材质光照不均的缺点,对大量缺陷种类具有较高的鲁棒性,其检出率高达 95.1%,漏检率为 0%,满足了工业检测要求。

**关键词:**金属圆柱工件;缺陷检测;线阵 CCD;局部二元模式;局部图像方差

中图分类号: TG806; TP391 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20142207.1871

## Optoelectronic inspection of defects for metal cylindrical workpieces

ZHANG Jing<sup>1\*</sup>, YE Yu-tang<sup>1</sup>, XIE Yu<sup>1</sup>, LIU Lin<sup>1</sup>, CHANG Yong-xin<sup>1,2</sup>

(1. School of Opto-electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhangjing619@gmail.com

**Abstract:** To overcome the shortcomings of metal workpiece defect detection in optical uneven illumination, higher detection defect ranges and lower detection system recognition rate, a defect detection method was proposed. The basic principles of Local Binary Pattern (LBP) and Local Image Variance (LVAR) were analyzed, and their specific methods in the algorithm of metal cylindrical detection were discussed. The LBP was used to reflect local graphics texture pattern and the LVAR to outstand the contrast of image intensity. Then, the weight values calculated from LVAR were used to adjust the extraction and measurement of LBP local texture. Thus, the automatic detection of metal cylindrical workpieces was achieved. In the experiments, the rotation of workpieces was controlled by a stepper and the expanded images of cylindrical workpieces were captured by a linear CCD. The experimental results demonstrate that this method effectively overcome the shortcomings of metal uneven illumination and has high robustness to a large number of defect types. The detection rate has

收稿日期: 2013-12-15; 修订日期: 2014-01-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61205004); 粤港招标关键领域重点突破项目 (No. W0511159)

reached to 99.5% and missing rate to 0%, which meets industrial inspection requirements.

**Key words:** metal cylindrical work piece; defect detection; linear CCD; Local Binary Pattern (LBP); Local Variance (LVAR)

## 1 引言

金属圆柱工件是航空航天、汽车、造船和军事武器等众多行业必不可少的原材料,其外观质量是国内外市场竞争的重要指标之一。受铸件技术、加工工艺等因素的影响,金属圆柱工件通常会有压痕、孔洞、裂缝、夹灰、表面污渍、锈迹、擦伤、皱折等缺陷,严重降低了后续产品的性能。对金属圆柱工件采用人工目检的方式,检测效率低,缺乏科学性和规范性;而自动光学检测技术虽然可提高检测的智能化,但在检测结果中存在很多难点问题需要进一步研究和分析,如:光学照明不均、检测缺陷种类繁多、检测系统识别率不高等问题。

金属工件外观缺陷检测是光学自动检测中的难点,国内外很多学者进行了大量的研究但检测效果仍不理想。Zheng<sup>[1]</sup>等人利用形态学和遗传算法对金属工件表面缺陷进行了自动检测,检测系统对于孔洞和裂缝取得了良好的效果,但其他的微小划痕缺陷检测效果较差。F. Pernekopf 等<sup>[2-3]</sup>人利用计算机视觉对金属表面缺陷进行了检测,通过图像灰度的异常统计来判断缺陷的存在,由于没有考虑金属表面具有很高的反射率,使得误判率较高。文献<sup>[4]</sup>探讨了如何提高对带钢表面低对比度的细微缺陷检测,指出高准确性的缺陷检测是金属表面缺陷机器视觉检测技术的关键技术与难点。

本文围绕上述问题进行了深入的分析研究,考虑金属表面缺陷不确定性以及图像均匀性,深入研究了金属圆柱工件缺陷检测的方法,研究了局部二元模式(LBP)与局部图像方差强度(LVAR)的基本原理,提出采用局部图形空间纹理模式和图像强度对比度相结合的方式,将LVAR计算结果作为权重值来调整LBP的局部纹理提取和度量。通过线阵CCD采集到的金属圆柱工件展开图像进行实验,克服了由于工件本身金属材质造成的光照不均,提高了微小缺陷检测的准确性,降低了误判率,实现了金属圆柱工件的自动光学缺陷检测。

## 2 缺陷检测原理方法

### 2.1 LBP 的纹理缺陷检测算法

纹理被用来反映物体表面的固有特征,含有丰富的亮度、尺寸的颜色信息,容易被人感知。所以研究能反映物体纹理本质属性的描述方式和对图像纹理的分析是模式识别、机器视觉等领域的新方法。LBP定义在半径为 $R(R>0)$ 的圆环领域内, $P$ 个像素均匀分布在圆周上,该邻域中心像元的纹理记为 $T$ , $T$ 可以利用该领域 $P+1$ 个像素的关系式来定义<sup>[6-9]</sup>,定义的纹理算子不受图像灰度单调变化的影响,所以利用差值的符号进行计算:

$$T = t(s(g_0 - g_c), s(g_1 - g_c), \dots, s(g_{P-1} - g_c)),$$

$$s(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $g_c$ 为邻域中心像素的灰度值, $g_i(i=0, \dots, P-1)$ 是 $P$ 邻域像素的灰度值,设邻域中心坐标为 $(x_c, y_c)$ ,像素坐标表示为:

$$x_i = x_c + R \cos(2\pi p/P),$$

$$y_i = y_c + R \sin(2\pi p/P). \quad (2)$$

函数 $s(g_i - g_c)$ 乘以二项式因子 $2^i$ ,得到唯一表征局部图像空间特征的 $LBP_{P,R}$ 值:

$$LBP_{P,R} = \sum_{i=0}^{P-1} s(g_i - g_c) 2^i. \quad (3)$$

图1所示为不同 $(P, R)$ 参数圆对称邻域设置,根据检测精度和最小缺陷尺寸要求设置参数 $P, R$ ,LBP定义在圆环领域具有旋转不变性,圆周上的邻域点像素通过三线性插值获得。

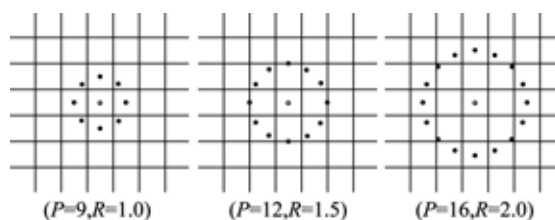


图1 不同 $(P, R)$ 参数圆对称邻域设置

Fig. 1 Circularly symmetric neighborhood setting of different  $(P, R)$  parameters

LBP 通过领域内的局部像素比较操作得到,减少了运算的复杂度。LBP 算法是一种无参数方法,在应用过程中不需要调整参数设置。由于 LBP 的空间结构模式不受灰度值变化的影响,因此对光照条件不敏感,将其应用到金属纹理检测具有一定的优势。

### 2.2 LVAR 的局部缺陷检测算法

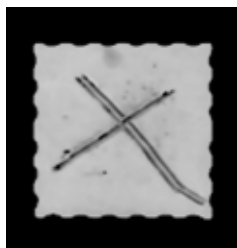
LVAR 是图像局部阈值概念的延伸,由于检测物体工艺或者其他客观原因造成图像不均匀,无法找到合适的单一阈值将目标区域和背景区域完整的分割,故引入了局部阈值检测概念,提出了整体与局部灰度特征相结合的方法。选取局部邻域为  $N \times N$  的窗口<sup>[10-11]</sup>,结合局部方差和标准差的特性,利用下式求取动态分割门限值:

$$\text{threshold} = \begin{cases} z_1 + v_1 (z_1 > z) \\ z_1 - v_1 (z_1 < z) \end{cases}, \quad (4)$$

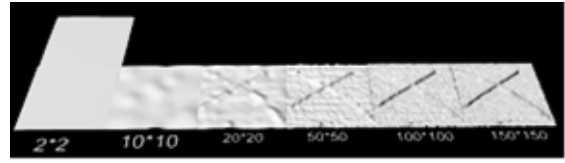
其中:threshold 为局部阈值,  $z_1$  和  $v_1$  分别为局部图像的标准差和均值,整幅图像的标准差和均值分别用  $z, v$  表示,当局部均值小于整体均值,将灰度值小于 threshold 的像素判断为缺陷。

图 2 所示为利用该算法模拟的缺陷效果图,图 2(a)为带缺陷的金属焊盘图像,图 2(b)为依据不同的窗口大小进行分割的模拟图像,从图中可以看到随着分割的区域增多,缺陷更容易区分开来,这种局部的分割方法更适用于强度对比较大的缺陷,图 2(c)为按照公式(4)利用  $150 \times 150$  窗口检测的缺陷图像,最终可以根据实际缺陷的大小来确定分割的最小模板数。

该算法能够使图像分割在保持整体最优的基础上最大限度地突出局部区域的强度对比度细节,具有抑制噪声的作用。仿真结果表明该算法具有阈值分割的高效性,但由于仅仅考虑了图像的强度信息,对一些细小的缺陷无法检出。



(a)带缺陷的焊盘  
(a) Defective pad



(b)窗口大小分割仿真图

(b) Simulation map of window size segmentation



(c)分割后检测到的缺陷图像

(c) Defective image after segmentation

图 2 LVAR 算法模拟仿真图像

Fig. 2 Simulation image by LVAR algorithm

### 2.3 LBP 与 LVAR 相结合的金属缺陷检测算法

通过前两节分析可得:LBP 领域中像素的灰度值大小顺序相同<sup>[12]</sup>,按式(1)~(3)就会得到同样的 LBP 值,算子仅突出图形空间纹理空间模式,图像重要的强度对比信息缺失。为结合空间结构和对比强度信息,更好地反映纹理信息的提取效果,需要在原有表现纹理模式的基础上加入纹理模式的强度信息。由于 LBP 算子不随灰度的变化而改变,具有旋转变换性,而图像的强度信息具有图像旋转不变性,两者特征相互独立,如果将二者运用在计算机视觉和模式识别中,可以提高检测结果。

改进的 LVAR 图像方差在圆形领域内定义为:

$$\begin{aligned} \text{LVAR}_{P,R} &= \frac{1}{P} \sum_{i=0}^{P-1} (g_i - \mu)^2, \\ \mu &= \frac{1}{P} \sum_{i=0}^{P-1} g_i. \end{aligned} \quad (5)$$

纹理特征可以利用 LVAR 方差的倒数作为权重值来调整 LBP,最终结果可以写为  $\text{LBP}_{P,R} / \text{LVAR}_{P,R}$ 。

## 3 实验结果与分析

为了验证理论分析的正确性,采用直径为 9 mm,全长为 19.5 mm 的圆柱形金属工件进行

了实验验证,如图 4 所示。为保证照明的均匀性,采用左右 2 个条形光源照明,入射角大于  $45^\circ$ ,使中间产生一定部分的重叠,如图 5(a)所示。旋转机械结构如图 5(b)所示,包括伺服电机、主动轮、被动轮、不完全齿轮机构等。通过分辨率  $10 \mu\text{m}/\text{pixel}$  线阵相机(NED SUFI 74)配合高度量光源、旋转机构等,采集到金属圆柱工件清晰的表面展开图。

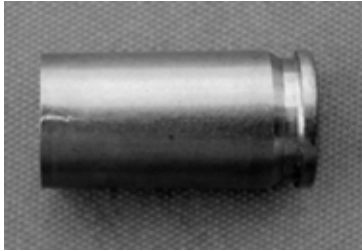
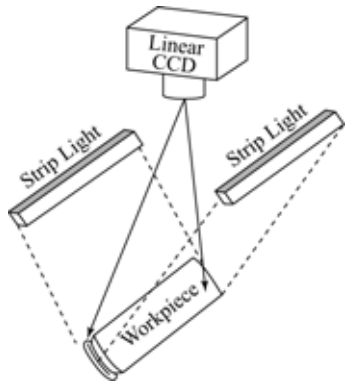
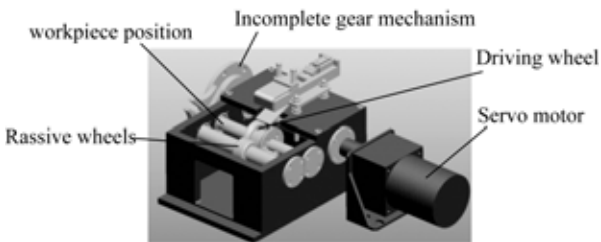


图 4 实物图像  
Fig. 4 Target image



(a)光源设计  
(a) Light source design



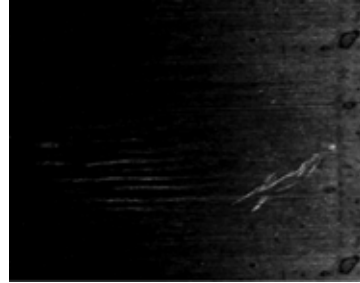
(b)机械结构  
(b) Mechanical structure

图 5 机械结构设计

Fig. 5 Light source and mechanical structure design

图 6(a)为用线阵 CCD 采集到的存在缺陷的金属圆柱工件展开图像,6(b)为利用局部图像方差结合阈值的方法处理后的图片,6(c)为用 LBP 处理后的图像,6(d)为采用 LBP 和 LVAR 相结合的金属圆柱工件缺陷检测的结果图像,从结果

图像分析可以知,图 6(b)仅对强度对比较大的划痕缺陷检出效果较好,图 6(c) LBP 对于表面污渍检出效果较好,由于没有强度信息,很多在图形



(a)原始图像  
(a) Original image



(b) LVAR 输出缺陷检测图像  
(b) Defective image by LVAR



(c) LBP 输出缺陷检测图像  
(c) Defective image by LBP



(d)本文算法处理后的缺陷检测图像  
(d) Defective image by our algorithm

图 6 细微划痕缺陷图像处理效果对比

Fig. 6 Comparison of various algorithm effects in minor scratches image

模式内变化的噪声点被检出。图 6(d)方法结合  
了两种算法的优点,图上细微的划痕缺陷和表面  
污渍匀能一次检出并且降低了噪声点的数目。图  
7 验证了不同缺陷处理后的效果图像。由于原图  
存在的光照不均、缺陷细微、缺陷种类繁多等特  
点,需要结合纹理和强度信息共同将缺陷检出,提  
高对缺陷识别的漏检率和正确率。

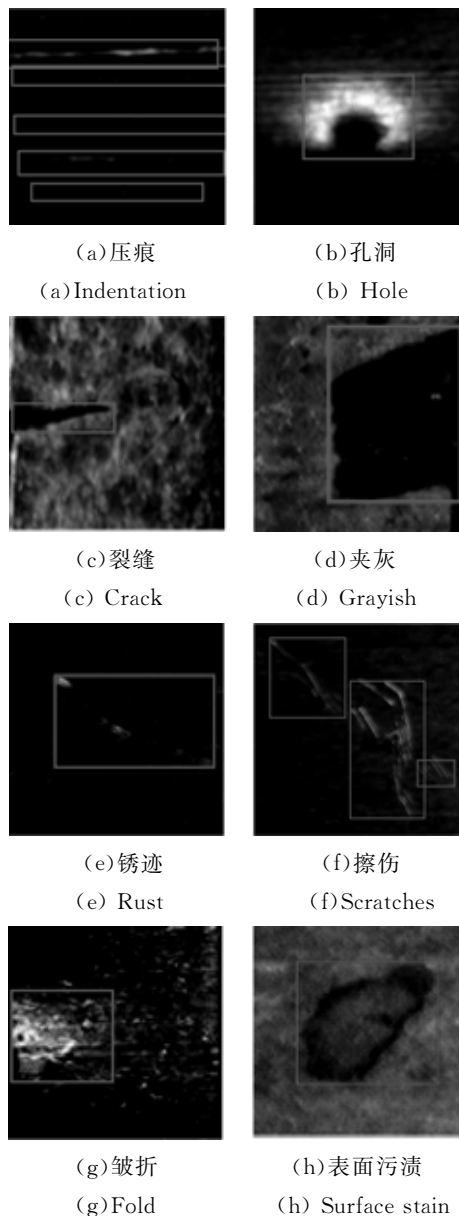


图 7 不同类型缺陷检测效果  
Fig. 7 Detection results of different defects

通过系统实际检测效率及缺陷检测的漏判数  
和正确率来衡量自动光学检测系统的性能。选取  
不同种类的缺陷工件作为实验样本,检测样品的

缺陷均已做标记,缺陷结果如表 1 所示,Error  
number 指误判的缺陷个数,即在检测结果中将无  
缺陷的区域判断为有缺陷的区域个数;Missing  
number 指漏判的缺陷个数,即在检测结果中将  
有缺陷的区域判断为无缺陷的区域个数。从表 1  
检测结果统计分析数据可知:通过对本文 LBP 和  
LVAR 相结合的方法进行验证,缺陷的漏检率为  
0,总体误判率低于 10%,实际检测平均时间为每  
个工件 1.13 s,满足工业生产线实时检测的需求。

表 1 PCB 光电图像系统实际检测缺陷分析  
Tab. 1 Detection analysis of PCB photoelectric  
imaging systems

Defective type	Defective number	Error number	Missing number	Correct rate/%
Indentation	200	10	0	95.1
Hole	290	41	0	85.9
Crack	230	20	0	91.3
Grayish	270	31	0	88.5
Rust	190	10	0	94.7
Scratch	80	10	0	87.5
Fold	90	9	0	90.0
Surface stain	300	0	0	100

## 4 结 论

金属工件表面存在的漫反射现象导致图像光  
照不均匀以及工件缺陷种类较多,因此对检测精  
度要求较高,目前,很难找到一种自适应的阈值方  
法或者用一种方法把多种缺陷一次性检测出来。  
本文通过线阵 CCD 获取金属圆柱工件展开图像,  
研究了将 LBP 与 LVAR 相结合的工件缺陷检测  
方法,即用图像方差强度作为权重值来调整 LBP  
的局部纹理提取和度量结果,既考虑了 LBP 纹理  
的空间结构模式,又兼顾了纹理的强度对比度模  
式特性,最终准确提取了金属圆柱光电图像缺陷  
特征,确定了缺陷的大小、位置、范围以及严重程  
度等,实现了工件生产质量的自动智能检测,对金  
属工件在线智能检测研究具有一定的科学和指导  
意义。

## 参考文献:

- [1] ZHENG H, KONG L X, NAHAVANDI S. Automatic inspection of metallic surface defects using genetic algorithms [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 125-126: 427-433.
- [2] PERNEKOPF F, PAUL O L. Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surface [J]. *NDT&E International*, 2003, 36(8): 609-617.
- [3] LEE S, CHANG L M, SKIBNIEWSKI M. Automated recognition of surface defects using digital color image processing [J]. *Automation in Construction*, 2006, 15(4): 540-449.
- [4] 黄杰贤, 李迪, 叶峰, 等. 挠性印制电路板焊盘表面缺陷的检测 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(11): 2443-2553.  
HUANG J X, LI D, YE F, *et al.*. Detection of surface deflection of solder on flexible printed circuit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2443-2553. (in Chinese)
- [5] FERNANDEZ C, PLATERO C, CAMPOY P, *et al.*. Vision system for online surface inspection in aluminium casting process [C]. *IEEE Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation and Automation*, 1993: 1854-1859.
- [6] 吴平川, 路同浚, 王炎. 机器视觉与钢板表面缺陷的无损检测 [J]. *无损检测*, 2000, 22(1): 13-16.  
WU P CH, LU T J, WANG Y. Machine vision technology and non-destructive detection of the surface defects in strip steel [J]. *Non-Destructive Detection*, 2000, 22(1): 13-16. (in Chinese)
- [7] PIETIKAINEN M, HADID A, ZHAO G, *et al.*. *Computer Vision Using Local Binary Patterns* [M]. Germany: Springer, 2011: 13-47.
- [8] FELZENSZWALB P, HUTTENLOCHER. Efficient graph-based image segmentation [J]. *Int. Computer Vision*, 2004, 59(2): 167-181.
- [9] TAN X, TRIGGS B. Enhanced local texture feature sets for face recognition under difficult lighting conditions [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(6): 1635-1650.
- [10] JING ZH, YUTANG Y, YU X, *et al.*. High density print circuit board line width measurement algorithm based on statistical process control theory [J]. *Optik*, 2013, 9(1): 62-66.
- [11] NAKIB A, OULHADJ H, SIARRY P. Image histogram thresholding based on multiobjective optimization [J]. *Signal Processing*, 2007, 87(II): 2516-2534.
- [12] LORIS N, ALESSANDRA L, SHERYL B. Survey on LBP based texture descriptors for image classification [J]. *Expert System with Applications*, 2012, 39(3): 3934-3641.

## 作者简介:



张 静(1984—),女,河南洛阳人,博士研究生,主要从事基于视觉的光学设备及仪器研发、图像处理算法研究。E-mail: zhangjing619@gmail.com

## 导师简介:



叶玉堂(1946—),男,重庆开县人,教授,博士生导师,1970年于北京大学获学士学位,1981年于电子科技大学获硕士学位。主要从事光电测量与控制,单片光电集成电路及光电对抗方面的研究。E-mail: tyte@uestc.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)