

基于 Hough 变换和清零法的缸套内面网纹角检测

刘丽, 穆平安, 张仁杰
(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 发动机缸套内面网纹角直接影响到发动机的性能, 为了高效准确地检测出内纹角, 舍弃残次品, 拟研究网纹夹角的检测方法。**方法** 采用邻域运算和自适应中值滤波对网纹图像进行图像增强, 达到去除噪声和保留细节的双重效果; 然后对其进行边缘分割处理, 得到边界分明的边缘图像; 再对其进行二值化, 以减少 Hough 变化所用时间; 最后提出一种基于 Hough 变换与清零法相结合的直线提取算法, 并根据提取的直线特征计算网纹角。**结果** 实验结果表明, 基于所提算法检测出来的夹角, 对比传统方法和国外通用的仪器, 平均检测误差降低为 0.43%。**结论** 所提算法具有夹角误差小、准确度高、用时少等优点, 能代替昂贵的进口仪器。所提算法在直线检测和包装条形码领域有较好的应用价值。

关键词: 自适应中值滤波; 二值化; Hough 变换; 网纹角; 清零法

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)03-0179-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.03.027

Detection of Crosshatch-angles for Cylinder Bore Based on Hough Transform and Zeroing Method

LIU Li, MU Ping-an, ZHANG Ren-jie

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to study the detection method of crosshatch-angle to detect the internal crosshatch-angle efficiently and accurately and discard defective products, as the internal crosshatch-angle of engine cylinder bore directly affects the performance of the engine. Neighborhood operation and adaptive median filtering were adopted to enhance the crosshatch image, so as to achieve the dual effects of removing noise and preserving details. Then, the edge segmentation of the image was carried out to obtain the well-defined edge image and then the image was binarized to reduce Hough change time. Finally, a line extraction algorithm based on Hough transform and zeroing method was proposed, and the crosshatch-angle was calculated according to the extracted line features. The experimental results showed that, based on the angle detected by the proposed algorithm, the average detection error was reduced to 0.43%, compared with the traditional method and overseas universal instruments. Featured by small angle error, high accuracy and less time consumption, the proposed algorithm can replace expensive imported instruments, and it has better application value in the field of line detection and packaging barcode.

KEY WORDS: adaptive median filtering; binarization; Hough transform; crosshatch-angles; zeroing method

发动机缸套是重要部件, 其缸套的内表面网纹角直接影响到发动机的装配性能和使用性能^[1-2], 所以网纹

角大小是衡量缸套性能的重要参数之一。叶宗茂^[3]提出了印模法及制作专门检具这 2 种测量方法, 前者测得

收稿日期: 2018-09-11

作者简介: 刘丽 (1995—), 女, 上海理工大学硕士生, 主攻信号与信息处理、图像处理。

通信作者: 穆平安 (1964—), 男, 硕士, 上海理工大学教授, 主要研究方向为信息获取处理、精密检测与智能检测。

数据不够准确,且会花费大量时间;后者价格相当昂贵,所以工业上迫切需要价格较低,精度合理且专门用于对缸套内表面网纹角的检测装置。

近年来,数字图像检测发展成一门备受瞩目的新兴交叉学科。数字图像检测融合了现代计算机视觉学科与数字图像处理学科的相关知识,在一定程度上有效地解决了成本高与精度低等问题。国内,商俊敏^[4]等运用该处理技术实现了在线轴承检测;张云辉^[5]等研究出了零件形位误差的检测系统;胡大辉^[6]提出了改进的 Sobel 算法,解决了污损条码识别率低的问题。国外,Bradley^[7]等研究出了机器视觉检测系统;Lahajnar^[8]等在深入机器视觉检测的基础上,研究出了半自动化校准的电路板检测系统;Shafeek^[9]等再一次扩展了图像在线检测系统应用领域,将数字图像处理技术应用于数控铣床加工领域;Kerr^[10]提出了数控机床的刀具磨损检测系统;Dhanasekar^[11]等也提出了基于数字图像的零部件粗糙程度的检测系统。

随着社会的发展,人们对工业制造业提出了更为严苛的要求^[12],传统接触式测量方法的局限性太大,难以满足工业生产的实际需求,因此文中主要研究工业制造中的网纹角测量精度问题,并提出一种基于 Hough 变换与清零法的缸套内表面网纹角检测算法。使用 Matlab 软件对缸套内面网纹角图像进行各种算法处理,并确立出算法流程图,将网纹计算结果与精度较高的机器检测得到的结果进行比较分析。

1 网纹角检测算法流程

1.1 网纹角的参数分析

Pawlus^[13-14]研究了不同网纹夹角值对缸套性能的影响,网纹角是衡量缸套性能的重要参数之一,文中用 β 表示网纹角,见图 1。网纹角 β 也是影响缸套内表面油膜和机油耗的重要因素,若是 β 值过小,机器的储油能力就会降低,从而加剧活塞环损耗;若是 β 值过大,就会影响到油膜的均匀性,导致机油的过多损耗,这样会增加污染气体的排放量,对环境及人体造成不好的影响。JB/T 5082.7—2011^[15]规定缸套内面网纹夹角为 $125^\circ \pm 10^\circ$ 。

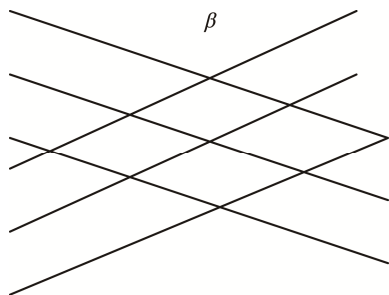


图1 网纹夹角 β
Fig.1 Crosshatch-angle β

1.2 算法流程

受光照、摄像机等多种因素的影响,网纹图像噪声较多,会使得网纹角检测的准确性降低。为了削弱这些外界因素对检测结果的影响,文中提出了一种联合 Hough 变换与清零法的网纹角度检测算法,算法流程见图 2。整个算法流程依次进行图像预处理、图像边缘检测、边缘图像二值化,利用改进的 Hough 变化提取直线等操作,最后根据提取的直线特征计算缸套内网纹夹角。如果精度达到要求,则结束测量,若没达到要求,则继续改变参数,直至测量结果符合精度要求。

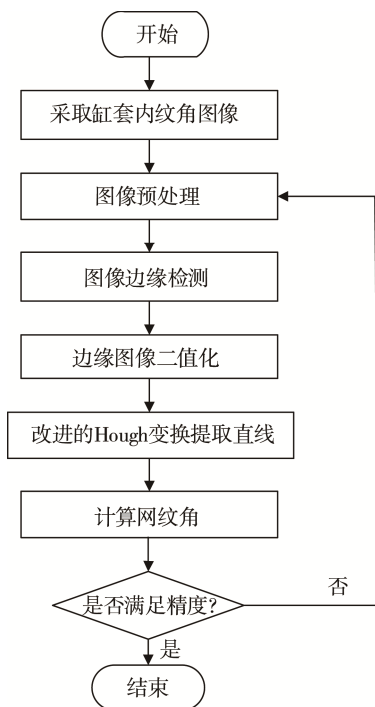


图2 算法流程
Fig.2 Algorithm flow

2 算法实现

2.1 图像预处理算法

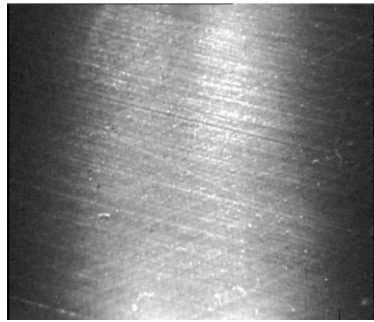
鉴于拍摄角度、光线、天气等因素会对网纹角图像的质量有一定的影响,为了提高网纹角检测的精度和速度,文中采用邻域运算及自适应中值滤波对网纹图像进行预处理。

2.1.1 邻域运算

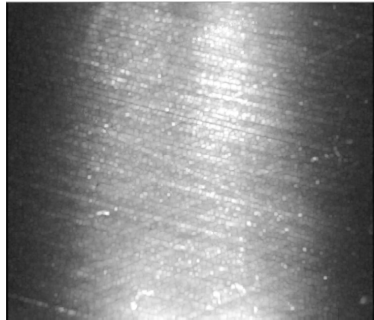
邻域运算是图像增强的一种方法,对网纹图像进行邻域运算,会为接下来的 Hough 变换减少很多计算量。故文中运用邻域运算去处理网纹图像,邻域运算还可以去除噪声,平滑掉不需要的细节。实验结果见图 3。

2.1.2 自适应中值滤波

在邻域运算处理的基础上,考虑到噪声的干扰,



a 原图像



b 处理后的图像

图 3 原图像处理前后对比

Fig.3 Comparison before and after the original image processing

一般会采用中值滤波方法,但是当噪声干扰较多,这种方法的噪声点去除不干净并且会造成图像边缘模糊,因此文中采用自适应中值滤波法。自适应中值滤波通过不断地改变窗口尺寸,对图像的不同像素点进

行差异化处理,使其能达到去除噪声和保护细节的双重效果。

文中的符号设定如下:对于一个中心在 (x, y) 处的子图像 $Z(x, y)$; Q_{xy} 为滤波器窗口所作用的范围; $Q_{\max}$ 为 Q_{xy} 所设定的最大窗口尺寸; $Z_{\min}$ 为子图像的最小的灰度值; $Z_{\max}$ 为子图像中最大的灰度值; Z_{med} 为子图像中所有灰度值的中值; Z_{xy} 为图像中第 y 行第 x 列个像素点的灰度值。自适应中值滤波的具体算法步骤如下所述。

1) 判断条件 $Z_{\min} < Z_{\text{med}} < Z_{\max}$ 是否满足,若满足跳转到步骤 2), 否则执行步骤 3)。

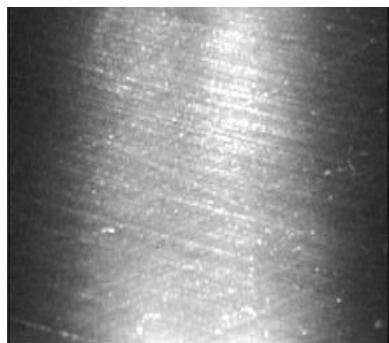
2) 判断条件 $Z_{\min} < Z_{xy} < Z_{\max}$ 是否满足,若满足则跳转到步骤 4), 否则执行步骤 5)。

3) 增大窗口的尺寸,若增大后的尺寸 $Q_{xy} \leq Q_{\max}$, 则重复步骤 1), 否则执行步骤 5)。

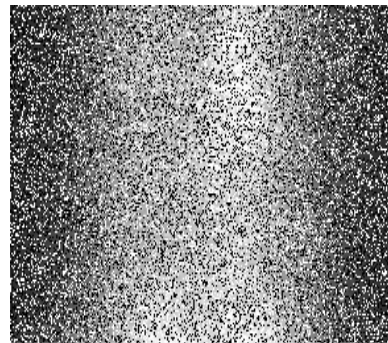
4) 输出 Z_{xy} 。

5) 输出 Z_{med} 。

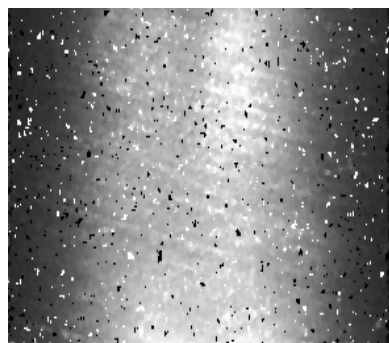
对图 3b 进行自适应中值滤波,得到处理图像见图 4, 将原图像与文中算法处理后的图像进行对比,看不出明显的分别。在图像中加入椒盐噪声模拟传输信道、外部光线等产生的噪声,然后将文中算法与 Matlab 工具箱中自带的自适应滤波算法对比。对比效果见图 4c, d, 图 4c 会模糊很多,这说明依然存在很多的噪声干扰。综上所述,可以发现自适应中值滤波对网纹图像的去噪效果更好,并且对图像的边缘进行了很好的保护,这样有利于后面的边缘检测、直线提取等操作。



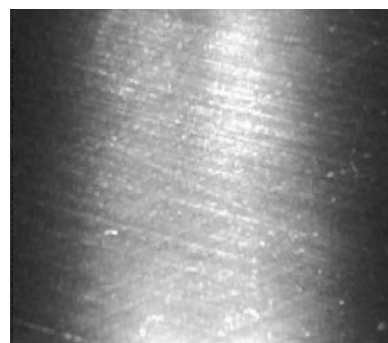
a 邻域运算后的图像



b 被噪声干扰的图像



c 自适应滤波后的图像



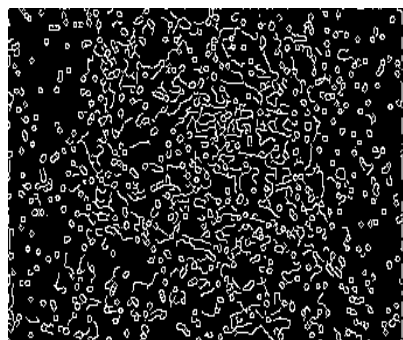
d 自适应中值滤波后的图像

图 4 滤波处理前后的对比图像

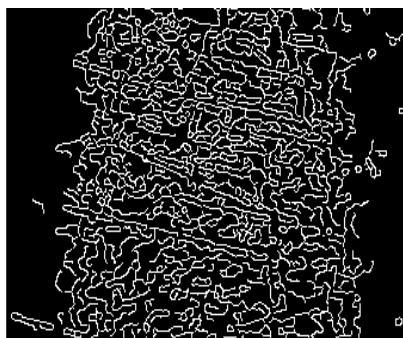
Fig.4 Contrast images before and after filtering

2.2 边缘分割算法

图像边缘是指图像灰度发生空间突变的像素集合,在进行直线提取之前,运用边缘检测算法对预处理后的图像进行边缘分割,即连接网纹图像灰度突变的像素,构成图像的不同边界^[16]。基于边缘分割的算子有 Sobel, Roberts, Prewitt 等,其中 Canny 算子具有滤波,增强,分割的多种功能,故文中利用 Canny 算子的边缘分割技术来提取原始图像边缘,效果见图 5。



a 自适应滤波图像



b 自适应中值滤波图像

图 5 边缘分割对比

Fig.5 Edge segmentation contrast

从图 5 中可以看出,基于 Canny 算子的边缘分割去噪效果较好,提取的边缘更清晰,不易丢失弱边缘。通过边缘分割提取了缸套内图像内的有效边界,利于后续直线提取的处理,减少了计算量并且提高了精度。

2.3 图像二值化

图像二值化是将图像像素点的灰度值设置为 0 或者 255,这样会减少网纹图像中的数据量,使待检测目标的轮廓更加清晰。为了减少 Hough 变换所需的时间及后续计算量,将边缘分割后的图像进行二值化处理,处理结果见图 6。

文中将灰度图像和二值图像 Hough 变换的耗时进行对比,对比结果见表 1。从表 1 中可以看出灰度图像做 Hough 变换需要的时间约是二值化图像的 3.6 倍,这表明了边缘图像二值化是有效的。



图 6 二值图像

Fig.6 Binary image

表 1 Hough 变换时间对比

Tab.1 Time comparison of Hough transform

图像类型	θ	ρ	时间/s
灰度图像	1	0.5	1.354
二值图像	1	0.5	0.367
灰度图像	0.5	0.5	2.327
二值图像	0.5	0.5	0.562
灰度图像	0.1	1	13.834
二值图像	0.1	1	4.001
灰度图像	0.1	0.5	14.513
二值图像	0.1	0.5	3.848

2.4 直线提取算法

2.4.1 标准 Hough 变换直线提取算法

Hough 变换是一种把图像空间的直线问题转换成 Hough 变换参数空间点问题的直线检测方法。直角坐标系中的直线表示为:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

式中:参数 ρ 为图像空间的点到空间直线的长度; θ 为直线法线与 x 轴的夹角。直线上任意 $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$ 2 点可以用参数 ρ 及 θ 来对应参数空间 2 条参数曲线。

$$\rho = x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta \quad (2)$$

$$\rho = x_2 \cos \theta + y_2 \sin \theta \quad (3)$$

两参数曲线的交点 $C(\rho', \theta')$ 为直角坐标系中直线所对应的参数,映射关系见图 7。

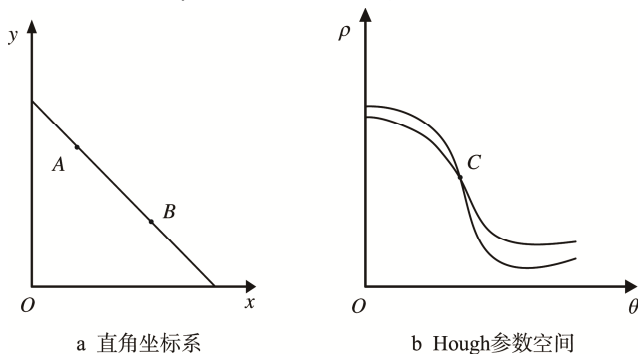


图 7 直角坐标系与 Hough 参数空间的映射关系

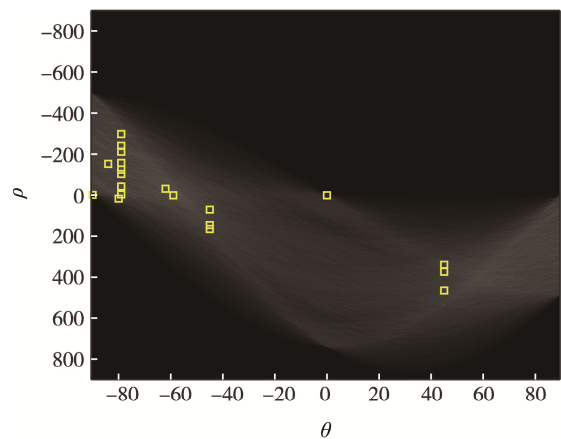
Fig.7 Mapping relationship between Cartesian coordinate system and Hough parameter space

将 Hough 参数空间离散成累加单元 Q ，并将其初始化为 0，然后令 θ 等于每一个允许的细分值，对图像中每一个非背景点 (x_k, y_k) ，得到与之对应的 ρ 。通过计算 θ_p 可以进一步得到 ρ_p ，每一次循环结束令累加单元 $Q(\theta_p, \rho_p)$ 自增 1。最终存储值最大的单元的坐标就代表了图像中直线的参数值 (θ_w, ρ_w) 。

2.4.2 基于 hough 变换与清零法相结合直线提取算法

为了提高 Hough 变换的检测速度和精度，文中对标准的 Hough 变换进行了改进，将其与清零法结合对二值图像进行处理，改进算法的基本实现流程如下所述。

1) Hough 变换。根据 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ 将图像空



a 特征点提取

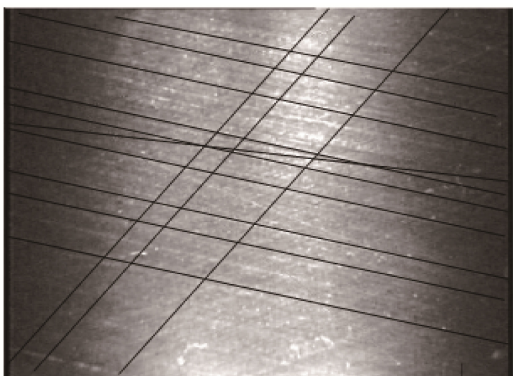
间中的边缘像素点进行 Hough 变换以获得参数空间矩阵 $[h, \rho, \theta]$ 。其中， $-\sqrt{w^2 + h_e^2} \leq \rho \leq \sqrt{w^2 + h_e^2}$ ， $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ， w 为变换域的宽， h_e 为变换域的高。

2) 峰值检测与清零法结合。对积累矩阵进行操作：寻找最大值点，记录坐标和最大值；将最大值点清零；将其小邻域范围内的所有点的值清零；依次重复以上 3 步直至所有符合要求的坐标点被记录。

3) 设定恰当的阈值，防止过连接及伪直线等问题的产生。

4) 合并、拟合直线。运用最小二乘法拟合直线，校正霍夫变换提取直线的精度。

图像直线提取结果见图 8。



b 改进的Hough变换直线提取

图 8 改进的 Hough 变换
Fig.8 Improved Hough transform

3 夹角计算

根据以上实验步骤获得表 2 中的实验数据，由每条线段端点 P_1, P_2 的坐标以及 θ 计算出线段长度，然后根据公式计算出缸套内面网纹角。式 (4) 中， α 为两直线之间的夹角， L_i, L_j 为两线段的长度， θ 为 Hough 变换求得的直线夹角， n 为线段的条数 (文中为 10)。

$$\alpha = \frac{2|\theta_i - \theta_j|}{L_i \times L_j} \tag{4}$$

$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_k \tag{5}$$

为了验证所提出的算法的有效性，文中采用标准 Hough 变换算法作为对比算法，各算法检测结果见图 8。图 8a 是采用标准 Hough 变换算法检测的结果，夹角为 $\beta=130.72^\circ$ ，对比进口仪器 (仪器型号：Opto 043-102104-V4 Cylinder Inspector 2D) 检测出来的夹角为 128.99° ^[17]，此方法的检测误差为 1.8%。图 8b 是基于文中算法的网纹角检测的仿真结果 $\beta=129.55^\circ$ ，即网

表 2 文中算法的实验数据
Tab.2 Experimental data of the proposed algorithm

序号	P_1	P_2	θ	ρ
1	[120,145]	[698,251]	-79	-110
2	[135,190]	[636,283]	-79	-148
3	[119,86]	[624,186]	-79	-64
4	[120,30]	[688,125]	-78	-2
5	[86,233]	[628,339]	-79	-201
6	[91,216]	[654,492]	-44	112
7	[145,480]	[612,14]	45	423
8	[41,283]	[661,415]	-78	-268
9	[202,15]	[656,497]	-46	153
10	[201,482]	[672,12]	45	473

纹角为 129.55° ，对比进口仪器检测的角度，文中算法的检测误差为 0.43%。该结果是结合大约 10 个具有代表性的交点求得的均值，因此该结果具有可信性。以上结果表明文中算法检测出来的夹角误差更小，准确度更高，具有较高的可信度。

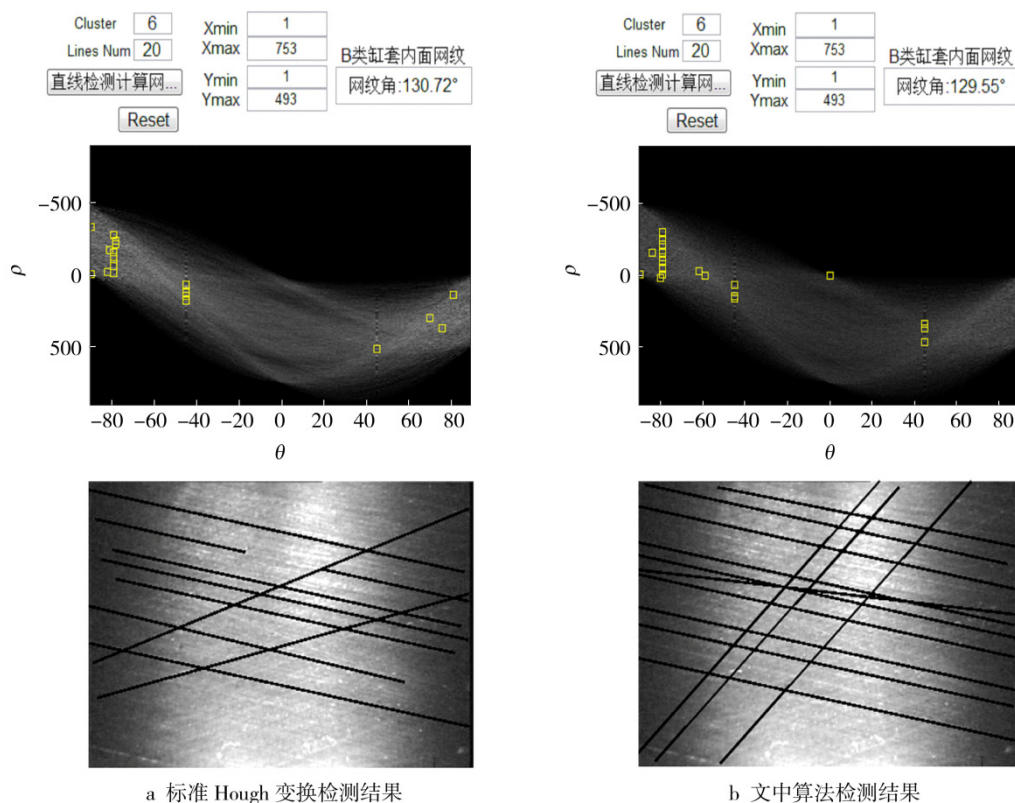


图9 网纹夹角检测
Fig.9 Detection of crosshatch-angles

4 结语

文中主要研究了工业制造业中的网纹角检测问题,并提出了一种基于 Hough 变换与清零法的缸套内面网纹角检测算法。在图像预处理阶段,选取了邻域运算及自适应中值滤波 2 种图像增强的方法,去除了噪声且保留了细节;利用边缘分割算法提取有效边界;将边缘图像二值化,大大减小了后续 Hough 变换所需的时间,再通过改进的 Hough 变换提取了直线特征,实现了网纹角高效准确的自动检测。仿真结果表明,相比传统的 Huough 变换检测算法,文中算法的网纹角检测误差更小,可控制在 1% 以下。由此可见,该研究所提出的图像检测系统具有良好的实用性,经验证是可行的,能够为工业图像检测提供自动化支持,同时对包装件质量检测及条形码检测有一定的参考作用。

参考文献:

- [1] 李军, 张静静, 权文辉. 发动机气缸套支承肩断裂原因分析[J]. 内燃机与配件, 2018(14): 160—161.
LI Jun, ZHANG Jing-jing, QUAN Wen-hui. Analysis of the Causes of the Fracture of the Engine Cylinder Liner[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018(14): 160—161.
- [2] 宋天翔. 发动机缸孔平台网纹质量控制浅析[J]. 汽车实用技术, 2016(7): 201—204.
SONG Tian-xiang. The Quality Control of Engine Cylinder Hole Platform[J]. Automobile Applied Technology, 2016(7): 201—204.
- [3] 叶宗茂. 发动机缸孔珩磨网纹角的测量[J]. 汽车工艺与材料, 2002(12): 41—42.
YE Zong-mao. Measurement of Honing Mesh Angle of Engine Cylinder Bore[J]. Automobile Technology & Material, 2002(12): 41—42.
- [4] 商俊敏, 雷良育, 周晓军, 等. 基于机器视觉的在线轴承检测系统[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004(8): 54—55.
SHANG Jun-min, LEI Liang-yu, ZHOU Xiao-jun, et al. The On-line Bearing Inspection System Based on Machine Vision[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2004(6): 54—55.
- [5] 张云辉, 谭庆昌, 王树山, 等. 一种基于数字图像的圆度测量方法[J]. 工程与试验, 2008(3): 10—13.
ZHANG Yun-hui, TAN Qing-chang, WANG Shu-shan, et al. A Method of Measuring Roundness Based on Digital Image Process[J]. Engineering & Test, 2008(3): 10—13.
- [6] 胡大辉. 边缘检测算法在污损条码识别中的应用研究[J]. 包装工程, 2013, 34(3): 104—108.
HU Da-hui. Application Research of Edge Detection

- Algorithm in Defected Barcode Recognition[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3): 104—108.
- [7] BRADLEY C, WONG Y S. Surface Texture Indicators of Tool Wear-A Machine Vision Approach[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(6): 435—443.
- [8] LAHAJNAR F, BERNARD R, PERNUŠ F, et al. Machine Vision System for Inspecting Electric Plates[J]. Computers in Industry, 2002, 47(1): 113—122.
- [9] SHAFEEK H I, GADELMAWLA E S, SHAFY A A, et al. Assessment of Welding Defects for Gas Pipeline Radiographs Using Computer Vision[J]. NDT and E International, 2003, 37(4): 291—299.
- [10] KERR D, PENGILLEY J, GARWOOD R. Assessment and Visualisation of Machine Tool Wear Using Computer Vision[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(7/8): 781—791.
- [11] DHANASEKAR B, RAMAMOORTHY B. Restoration of Blurred Images for Surface Roughness Evaluation Using Machine Vision[J]. Tribology International, 2009, 43(1): 268—276.
- [12] 杨剑. 大尺寸视觉测量精度的理论和实验研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
YANG Jian. Research on the Accuracy Theory and Experiment of Large-scale Vision Measurement[D]. Beijing: Beijing University of Posts And Telecommunications, 2010.
- [13] GRABON W, PAWLUS P, WOS S, et al. Effects of Honed Cylinder Liner Surface Texture on Tribological Properties of Piston Ring-liner Assembly in Short Time Tests[J]. Tribology International, 2016, 113: 137—148.
- [14] GRABON W, KOSZELA W, PAWLUS P, et al. Improving Tribological Behaviour of Piston Ring-cylinder Liner Frictional Pair by Liner Surface Texturing[J]. Tribology International, 2013, 61: 102—108.
- [15] 刘久万, 王明泉, 张加中. 解读新标准 JB/T 5082.7—2011(《内燃机气缸套平台珩磨网纹技术规范及检测方法》)[J]. 内燃机与配件, 2013(7): 38—39.
LIU Jiu-wan, WANG Ming-quan, ZHANG Jia-zhong. Interpretation of the New Standard JB/T 5082.7—2011 (the Platform Honing Honing Technology for Cylinder Sleeve of Internal Combustion CEngine Specifications and Test Methods)[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2013(7): 38—39.
- [16] 李燕. 数字图像处理的关键技术研究[J]. 中国有线电视, 2018(1): 44—47.
LI Yan. Research on the Key Technologies of Digital Image Processing[J]. China Digital Cable TV, 2018(1): 44—47.
- [17] 刘乔楠, 张仁杰, 李倩倩. 基于改进的 Hough 变换缸套内面网纹夹角检测[J]. 包装工程, 2017, 38(15): 14—20.
LIU Qiao-nan, ZHANG Ren-jie, LI Qian-qian. Detection of Crosshatch-angles of Cylinder Liner Based on Improved Hough Transform[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(15): 14—20.