

基于反射云纹的抛光曲面表面缺陷检测研究

熊显名^{1,2*}, 石红强¹, 曾星宇¹

¹ 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林, 541004;

² 广西高校光电信息处理重点实验室, 广西 桂林, 541004

摘要 针对抛光曲面工件表面缺陷检测的问题,提出了一种基于反射云纹图像的缺陷检测方法。该方法利用云纹光经抛光曲面反射产生的差异,通过检测云纹图像的变化进行缺陷的检测与定位。分析了抛光曲面的光照模型,使用 SHEN-Castan 算法抑制云纹边缘阶梯效应,通过 Gabor 变换与最大熵分割进行缺陷提取,剔除伪缺陷后实现缺陷的检测与定位。实验结果与统计表明,设计的方法能检测出抛光曲面表面上具有形变特征的缺陷,对不同类型的表面缺陷均有 92% 以上的检出率。利用所提的检测方法,可以自主设置系统的检测分辨率,对不同类型的缺陷具有较高的适应性,极大地提高了系统的可拓展性、普适性与实用性,较好地解决了高反射抛光曲面工件表面形变缺陷检测的问题,具有较高的理论价值与经济价值。

关键词 机器视觉; 高反射曲面; 图像处理; Gabor 滤波器; 表面缺陷检测

中图分类号 TP391.4; TN911.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.141501

Surface Defect Detection on Polished Surface Based on Reflection Moiré

Xiong Xianming^{1,2*}, Shi Hongqiang¹, Zeng Xingyu¹

¹ School of Electrical Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

² Key Laboratory of Optoelectronics Information Processing for Guangxi Universities, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract This study proposed a defect detection method based on the reflection moiré images to efficiently detect defects on the polished surface of a workpiece. The proposed method located defects by detecting variations in the moiré image reflected by the polished surface. The illumination model of the polished surface was analyzed, and the SHEN-Castan algorithm was used to suppress the edge-step effect of the moiré. Defects were detected and located after performing defect extraction to remove false defect via Gabor transform and maximum entropy segmentation. Experimental results and statistics show that the proposed method can detect surface defects on different polished workpiece surfaces at a detection rate of $> 92\%$. The proposed method can be used to independently set the detection resolution ratio of a system, thereby increasing the system's adaptability to detect different types of defects and considerably improving its extensibility, universality, and practicability. Thus, the proposed method can efficiently detect defects on highly reflective polished workpiece surfaces and has great theoretical as well as economic value.

Key words machine vision; high reflection surface; image processing; Gabor filter; surface defect detection

OCIS codes 150.0155; 100.6950; 110.3010; 120.4630

1 引言

为实现“中国制造 2025”,机器视觉成为工厂自动化向智能化发展的关键性技术。随着工业产业升

级,产品质量要求日益提高,工件表面检测成为必不可少的一环,利用视觉进行工件表面缺陷检测逐渐成为制造业的重要研究课题。目前大部分精加工厂仍采用人工检测的方法对工件表面缺陷进行检测,

收稿日期: 2018-12-18; 修回日期: 2019-01-22; 录用日期: 2019-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(61565004)、桂林市科学研究与技术开发课题(20150133-3)

* E-mail: 5311128@qq.com

工人在对高反射曲面的表面缺陷进行检测时需要在强光下从不同的角度进行观察,不仅效率低,而且长期强光下作业对视力伤害也很大。视觉检测与人眼检测相比具有非接触式测量、严格的一致性、更小的空间分辨率、更高的时间分辨率以及更高的工作效率等特点^[1]。高反射曲面常见于打磨抛光工件、汽车车身、光学元件等场合,因此,研究一种利用机器视觉对高反射曲面工件表面缺陷进行检测的方法具有很高的经济价值。

陈松赞等^[2]设计了一种利用穹顶漫射光源进行高亮异形曲面缺陷检测的装置,该装置利用穹顶光源的漫反射光进行缺陷检测,但该方法只适用于缺陷较大的场合。刘元坤等^[3]利用薄膜晶体管向被测物投射结构光,通过对比标准面与待测面中条纹的相位偏移实现了对镜面物体的检测,该方法中标准面的选取对检测结果的影响比较大,只适用于静态平面待测物的检测。赵文川等^[4]提出一种基于相位偏折技术的光学表面疵病检测方法,利用水平和垂直两个方向上的正弦条纹,采用移相技术提取相位分布图,此方法需要采集多个相位的图像,操作复杂,且在非理想镜面下相位解析达不到理论精度。目前行业内对工件表面缺陷进行检测的方法各异,但是对于高反射曲面的缺陷目前尚没有一种在检测分辨率、可拓展性与普适性方面表现优异的方法。

本文在以实现高反射曲面缺陷检测为实际需求的背景下,以抛光曲面工件为研究对象,利用高反射曲面的镜面反射特性,提出了一种基于反射云纹的高反射曲面工件表面缺陷检测方法,并设计了基于本方法的图像采集装置,分析高反射曲面光照模型,针对采集的云纹图像设计了缺陷提取算法。实验结果表明本方法采集一次图像即可完成缺陷检测,对不同的缺陷有较好的普适性,并且实现了检测分辨率可调。

2 检测的原理及装置

2.1 高反射曲面反射模型

高反射曲面缺陷检测的部分难点在于图像采集系统的光源光路设计,需要根据物体表面的反射特性设计合适的照明系统^[5]。高反射曲面光照模型如图1所示,光束从入射角照射到高反射曲面表面,从不同的观察角度接收到不同成分的光。结合 Nayar 光照模型^[6]对高反射曲面的反射模型进行分析,其中 θ_i 为光源入射角, θ_o 和 θ_r 为观察角,反射物体的反射率为 ρ_s 。反射光主要由漫反射光、镜面叶瓣

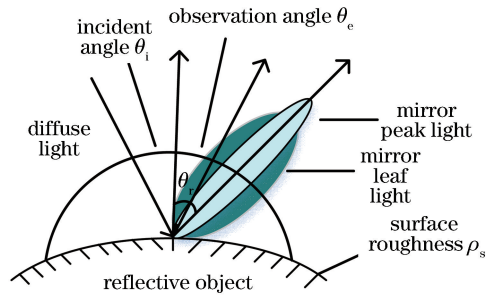


图1 高反射曲面光照模型

Fig. 1 Illumination model of high reflection surface

光、镜面尖峰光组成。漫反射是入射光与物体表面发生多次反射后形成的,其均匀分布于物体表面。镜面叶瓣光的光强分布符合高斯函数,受被检测物体表面反射率和观察角度的影响。镜面尖峰是脉冲函数,符合光的反射定律,需要在一定的角度下才能观察到,是图像采集时眩光产生的主要原因。在设计照明系统时需要使物体表面光照均匀,以提高缺陷与背景的对比度,便于算法设计。

2.2 检测原理及图像采集装置

缺陷检测系统的装置示意图如图2所示,由云纹面光源、CMOS相机、半透半反镜、计算机以及相关支架组成。由云纹面光源发出的云纹光,经过半透半反镜照射到待检测的高反射曲面工件表面,经被检测面反射后进入相机。当被检测面存在缺陷时,在缺陷处由于光线的反射角度与反射率发生了改变,采集的条纹图像在缺陷位置会发生条纹畸变与模糊,从而能够表征缺陷信息。与相位偏折技术不同的是,这里采用的面光源是宽度相等的明暗条纹,条纹的灰度分布是阶跃变化的,而不是通过正弦调制的^[7]。

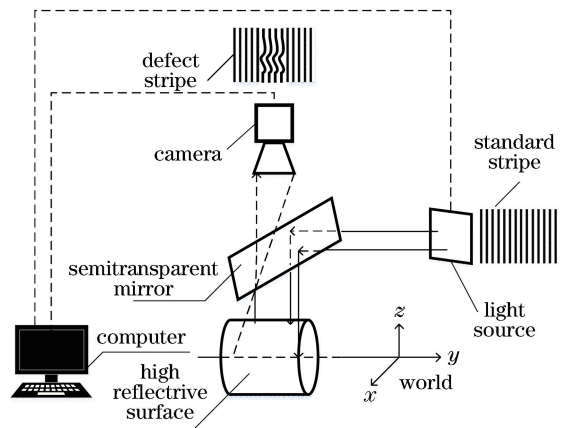


图2 缺陷检测装置示意图

Fig. 2 Schematic of defect detection device

在图2中,云纹图像沿世界坐标系的 y 轴分

布。图3为条纹方向光束偏折示意图。 S 为条纹方向的被检测高反射面, D 为缺陷位置,CMOS相机的光轴 T 与高反射面交于 o 点,以 o 点为原点,建立世界坐标系 $o-xyz$,云纹面光源的方向为 y 轴方向,标准高反射面的法线为 F ,当被检测曲面不存在缺陷时,光源上一点 M 发出的光束 I_s 经过 D 点反射后,映射到CMOS相机的 M'' 点, L 为云纹图像在被检测面的镜像, M' 为 M 镜像点。当被检测面存在缺陷时,假设由于缺陷造成的入射光线偏转角度为 α ,此时的反射面法线为 F' ,光束经过缺陷处反射,将发射偏折到达CMOS相机的 N 点。根据反射定律,反射光线的偏折角度为 2α ,标准无缺陷时被检测面上的反射光束 M 在存在缺陷时将被反射到 N 点,从而造成 M'' 到 N 的条纹图像发生畸变。

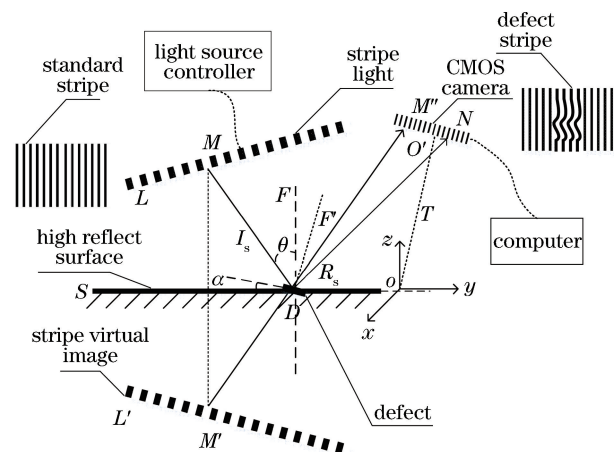


图3 条纹方向光束偏折示意图

Fig. 3 Schematic of deflection light in stripe direction

在上述检测装置中,云纹面光源通过计算机控制薄膜晶体管(TFT)液晶屏显示产生的云纹图像,液晶显示屏发出的光为漫反射光,因此采集的图像不会产生眩光。云纹图像通过MATLAB生成,生成的云纹图像可表示为

$$I_0(x, y) = a + bf(x) + \phi_0(x, y), \quad (1)$$

式中: $I_0(x, y)$ 为点 (x, y) 的光强; a 和 b 为正常数; $f(x)$ 为阶跃函数; $\phi_0(x, y)$ 为初始相位。

实验检测对象为经抛光处理后的圆柱形不锈钢工件,其曲率影响了单次有效检测面积,图4为有效检测面积示意图。设 S_s 为相机感光芯片尺寸, f 为镜头焦距, W_D 为工作距离, F_{OV} 为视场。其关系满足

$$\frac{f}{W_D} = \frac{S_s}{F_{OV}}. \quad (2)$$

在圆柱形工件截面上, O 为圆心, R 为半径,单

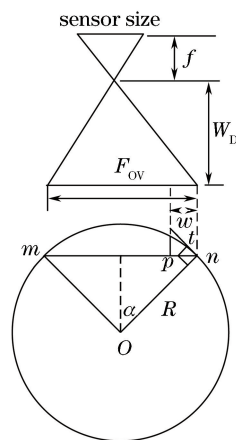


图4 有效检测面积示意图

Fig. 4 Schematic of effective detection area

次有效检测宽度为 m_n , w 为条纹宽度, t 为切线长度, $t = w / \cos \alpha$,当条纹投影到曲面时,近似认为 t 为曲面上的条纹宽度。受到相机景深、视场范围、光线散射等的影响,条纹图像边缘会变得模糊^[8]。通过实验可知,当投影切线长度 t 大于1.5倍光源条纹宽度 w 时,边缘测量数据会不准确,因此设定限制条件 $t < 3w/2$,即 $w / \cos \alpha < 3w/2$,可以求出 $\alpha < 48^\circ$,则单次有效检测宽度最大为 $2R \sin \alpha \approx 1.4R$ 。为了提高系统的稳定性,预留一定的容错空间,设定单次有效检测宽度 m_n 为 $1.2R$,则在旋转检测圆柱形工件时,可以推算每次旋转的角度为 $\alpha = \arcsin[m_n / (2R)]$ 。在本实验中,待检测圆柱形工件的半径 R 为60 mm,单次检测有效宽度为72 mm,对应的角度 α 约为 36° 。利用本实验装置采集的标准云纹图像如图5所示,图5(a)为云纹面光源的标准条纹图像,图5(b)为经过无缺陷标准检测面反射后采集的条纹图像,通过对采集图像中明暗条纹所占像素个数进行统计可知,在有效的检测范围内,条纹宽度基本相等。

3 实验图像采集结果及分析

3.1 图像采集结果

目前打磨抛光曲面工件表面缺陷的检测都是通过人工在强光下从不同角度观察完成检测标注的。在工厂利用所提方法采集了标准面以及含有几种主要缺陷的样本图像,不同类型的缺陷样片如图6所示。图6(a)为打磨抛光后的标准无缺陷工件表面,该表面均匀光滑、整洁美观;图6(b)为砂眼缺陷,由工件在压铸时存在气泡或者毛胚材料本身存在杂质所致;图6(c)为橘皮缺陷,由打磨过程中打磨工艺不稳定、机械臂扰动所致;图6(d)为砂带痕缺陷,

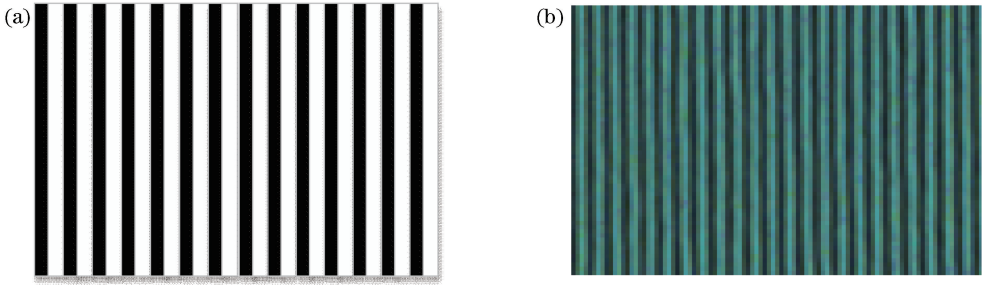


图 5 标准云纹图像。(a) MATLAB生成的条纹图像;(b)相机采集的云纹图像

Fig. 5 Images of standard stripe. (a) Stripe image generated by MATLAB; (b) moiré image taken by camera

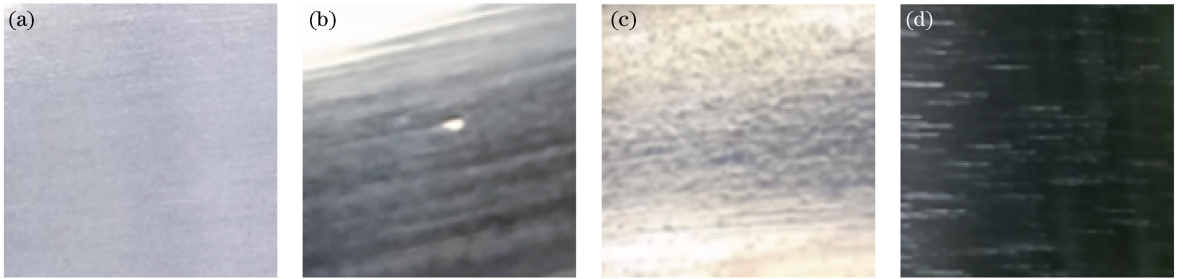


图 6 不同类型的缺陷样品。(a)标准表面;(b)砂眼;(c)橘皮;(d)砂带痕

Fig. 6 Different types of defect samples. (a) Standard surface; (b) sand hole; (c) orange skin; (d) belt marks

由打磨耗材(如砂轮)磨损所致。这些缺陷的存在不仅影响了产品的质量,还直接影响了产品外观。

上述样品的缺陷类型能覆盖 94% 的样本图像,不同的缺陷因为其反射特性差异,需要从不同的角

度打光才能采集到清晰的样本图像。利用所提的检测方法,不同类型的缺陷都能较好地显现出来,采集的不同缺陷在云纹图像上的表征效果如图 7 所示,为了方便观察,图中缺陷用圆圈标注。

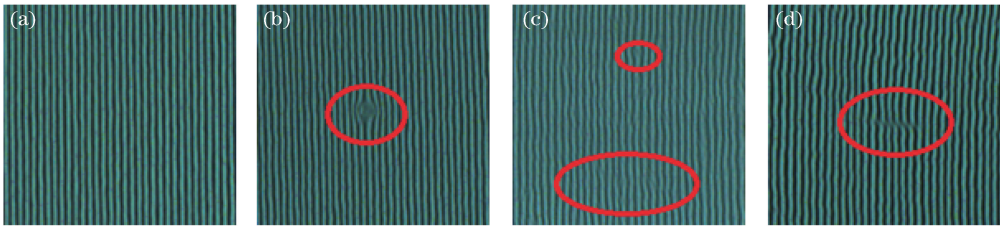


图 7 不同缺陷在云纹图像上的表征效果。(a)标准表面;(b)砂眼;(c)橘皮;(d)砂带痕

Fig. 7 Characterizations of different defects on moiré image. (a) Standard surface; (b) sand hole; (c) orange skin; (d) belt marks

3.2 缺陷特征分析

通过观察可以发现,受环境光、散射及相机噪声的影响,采集的条纹图像存在阶梯效应。图 8 为砂眼缺陷云纹图像,亮条纹的间距为 d_{width} ; 正方形区域是面积大小为 $w_x \times w_y$ 大小的缺陷, w_x 为缺陷宽度, w_y 为缺陷长度。

基于所提方法采集的图像,云纹图像纹理清晰,条纹互不干扰。缺陷存在时,云纹图像发生了弯曲或者偏折,从而能够对缺陷信息进行表征。在缺陷附近受光线散射的影响,缺陷位置的反射率 ρ_s 相对于无缺陷位置折射率 ρ_b 减小,缺陷处的图像

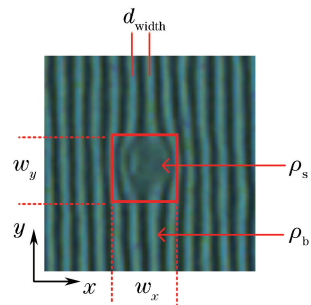


图 8 砂眼缺陷的云纹图像

Fig. 8 Stripe image of sand hole defect 变得模糊。

3.3 条纹间距对检测分辨率的影响

云纹图像中的明暗条纹可以作为一种参考对象。根据采样定理,条纹的间距会影响检测的分辨率。检测的分辨率 w_x 与云纹面光源的条纹间距需要满足

$$w_x > 2d_{\text{width}}。 \quad (3)$$

通过更改亮条纹的间距,可以在设备层面上设定系统检测的分辨率,从而适应不同场合的要求。图 9 为同一个缺陷在条纹间距分别为 0.25, 0.50, 2.00 mm 间距下采集的缺陷云纹图像。通过观察可以发现,在不同的检测分辨率下,相同的缺陷所占的条纹数目不同,条纹间距越小,缺陷所占的条纹数目越多,缺陷被细分的程度越高,系统检测的分辨率越高,分辨率可以根据(3)式设定,极大地提高了系统

的可拓展性。检测的最小分辨率与选取相机的最小分辨率和云纹光源的最小条纹间距有关。相机的最小分辨率要小于最小条纹间距才能采集到清晰的条纹图像。在本实验中选取了 1000 万像素的相机与镜头,相机最小分辨率为 0.05 mm。云纹面光源通过显示有云纹图像的显示器实现,因此条纹的最小宽度与显示器的点距相关,目前市面上 24 in(1 in=2.54 cm)的 4K 显示器点距为 0.12445 mm,故可设置最小条纹间距 $d_{\text{width}}=0.12445$ mm。相机的分辨率为 0.05 mm,满足条件,则根据(3)式可知,可检出的最小缺陷尺寸宽度为 2 倍的 d_{width} ,即 0.2489 mm。在本实验中显示器点距为 0.25 mm,故最小缺陷检测尺寸为 0.5 mm。

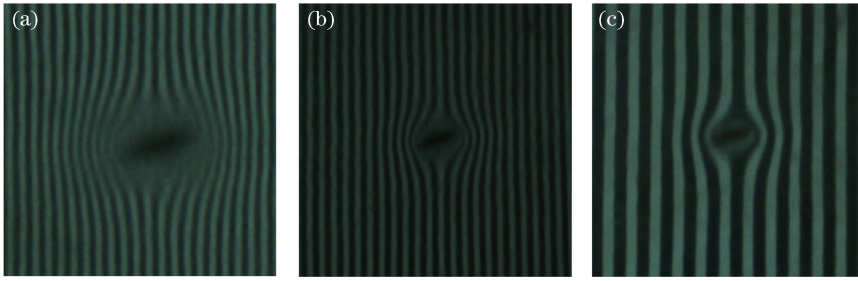


图 9 不同条纹间距下采集的缺陷云纹图像。(a) 0.25 mm 条纹间距;(b) 0.50 mm 条纹间距;(c) 2.00 mm 条纹间距
Fig. 9 Defect stripe images in different stripe distances. (a) Stripe spacing of 0.25 mm; (b) stripe spacing of 0.50 mm; (c) stripe spacing of 2.00 mm

3.4 云纹图像质量改善

对于标准的平面,理想条纹图像的条纹足够清晰,而实际采集的图像上,条纹的边缘灰度分布呈阶梯状,其原因是:1) 图像的采样不可能使得边缘刚好

落在像素边界内,可以认为边缘的实际位置位于明暗条纹中间,在图像采样后呈现出阶梯锯齿状;2) 由于缺陷处光的散射使得缺陷处图像变得模糊;3) 环境光对条纹图像的影响。图 10 为不同缺陷的灰度图。

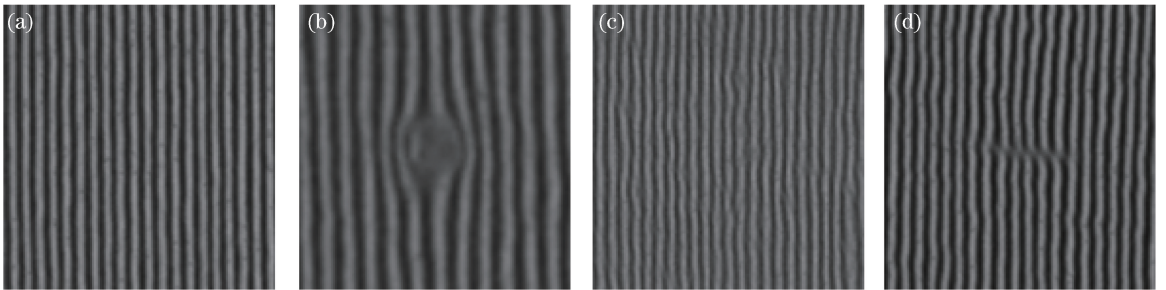


图 10 不同缺陷的灰度图。(a)标准表面;(b)砂眼;(c)橘皮;(d)砂带痕
Fig. 10 Gray distributions of different defects. (a) Standard surface; (b) sand hole; (c) orange skin; (d) belt marks

为了消除上述因素带来的阶梯边缘效应,引入了 SHEN-Castan 算法^[9],利用平滑核进行卷积,然后搜索边缘像素,使用一种最小化(维度)优化。经过云纹质量改善后的灰度值分布如 11 所示。通过观察可以发现,改进后,图像边缘的灰度过渡变少了,使得条纹图像的对比度增加。

4 云纹图像缺陷检测算法

4.1 Gabor 数学理论

采用基于图像实部的 Gabor 变换和最大熵分割对缺陷进行提取。二维 Gabor 滤波函数 $g(x, y)$ 、脉冲响应函数 $h(x, y)$ 、傅里叶变换 $H(u, v)$ 可表示为

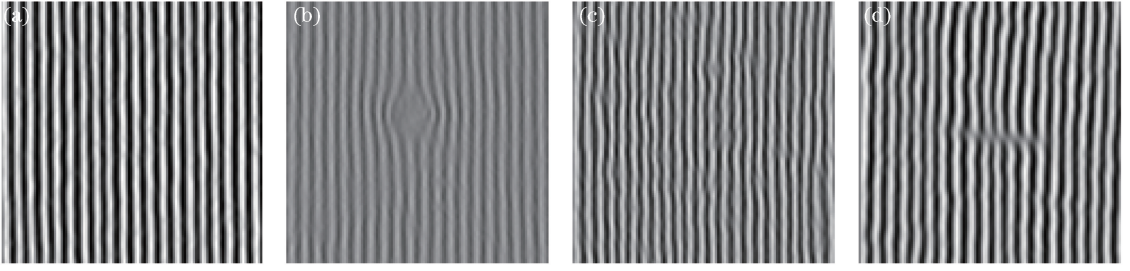


图 11 云纹质量改善后的灰度值分布。(a)标准表面;(b)砂眼;(c)橘皮;(d)砂带痕

Fig. 11 Gray distributions of improved fringe images. (a) Standard surface; (b) sand hole; (c) orange skin; (d) belt marks

$$\begin{cases} g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \\ h(x, y) = g(x, y) \cdot \exp(2\pi j f_0 x) \\ H(x, y) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(u - f_0)^2}{\sigma_u^2} + \frac{v^2}{\sigma_v^2}\right]\right\} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: (x, y) 为空间域二维坐标变量; (u, v) 为频域二维坐标变量; σ_u 为 u 方向的尺度参数; σ_v 为 v 方向的尺度参数; f_0 为复正弦函数的中心调制频率; 二维 Gabor 冲击响应函数 $h(x, y)$ 在空域上是一个高斯核函数调制的正弦平面波; σ_x, σ_y 为椭圆高斯函数在 x, y 坐标轴上的标准方差, 决定了滤波器在 x, y 轴上的收缩程度, 可表示为

$$\sigma_u = \frac{1}{2\pi\sigma_x}, \sigma_v = \frac{1}{2\pi\sigma_y}. \quad (5)$$

Gabor 函数可以分解为实部 $h_R(x, y)$ 和虚部 $h_I(x, y)$ 两个分量, 分别对图像 M 滤波可以得到

$$S(x, y) = \sqrt{(h_R * M)(x, y)^2 + (h_I * M)(x, y)^2}, \quad (6)$$

式中: $h_R * M$ 和 $h_I * M$ 分别表示用 Gabor 滤波器的实部和虚部对图像 M 进行卷积; $S(x, y)$ 为此 Gabor 滤波器提取的图像特征^[10-11]。

以 $h(x, y)$ 作为母小波函数, 对 $h(x, y)$ 进行适当的尺度变换和旋转, 可以得到一组自相似的 Gabor 小波, 这一过程可表示为

$$h_{mn}(x, y) = a^{-m} h(x', y'), \quad (7)$$

$$\begin{cases} x' = a^{-m} g(x \cos \theta + y \sin \theta) \\ y' = a^{-m} g(-x \sin \theta + y \cos \theta) \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $\theta = \frac{n\pi}{K}$ 为高斯核的旋转方向; a^{-m} 为尺度因子, $m, n \in \mathbf{Z}$ 为尺度序号和方向序号, $0 \leq m \leq Q-1, 0 \leq n \leq K-1$; Q, K 为尺度和方向的数目。

4.2 最大熵分割数学理论

最大熵分割是一种统计测量方法, 反映随机数据源中信息的数量。将有缺陷的条纹图像作为一种

随机信号处理, 图像的不确定性越大, 系统的信息熵就越大; 系统的确定性越高, 整个系统的信息熵就越小。对于窗口大小为 $H \times W$ 的图像, 其熵值定义为

$$H_f = - \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W P_{ij} \ln P_{ij}, \quad (9)$$

$$P_{ij} = \frac{f(i, j)}{\sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W f(i, j)}, \quad (10)$$

式中: H_f 为图像在窗口大小为 $H \times W$ 时的局部熵; P_{ij} 为点 (i, j) 处的概率分布; $f(i, j)$ 为点 (i, j) 处的灰度值; H, W 为图像窗口的长和宽。考虑到 (9) 式中有两次二维求和, 算法的时间和空间复杂度都很高, 根据泰勒级数展开对其进行化简, 优化后的近似公式为

$$H_f = - \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W P_{ij} (P_{ij-1}) = 1 - \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W P_{ij} \times P_{ij}. \quad (11)$$

利用所提出的算法对图像进行分割时, 可以自动选择最合适的阈值, 避免光照等环境扰动对结果造成影响。

4.3 缺陷检测算法及结果

根据云纹图案的特征, 缺陷检测算法流程图如图 12 所示, 按照算法的功能将算法分为图像预处理模块、图像特征增强模块、图像特征提取模块、伪缺陷剔除模块以及图像标注结果输出模块。采用本文设计的缺陷检测算法完成了实验验证, 证明了本文所提缺陷检测方法及其算法的有效性。

为了简化算法设计, 提高系统的检测效率, 对采集的图像进行旋转变换。由于缺少参照物, 无法对图像的倾斜角度直接进行计算, 因此提取纹图像中的条纹中心线作为参考标准。采用 zhang 骨架^[12]提取条纹中心线, 并进行 hough 直线拟合, 通过计算间接得到直线的旋转角度 θ 。以图像中心直线的作为原点, 反向旋转角度 θ , 使云纹图像转正。图 13 为旋转变换并取感兴趣区域 (ROI) 后的云纹图像。

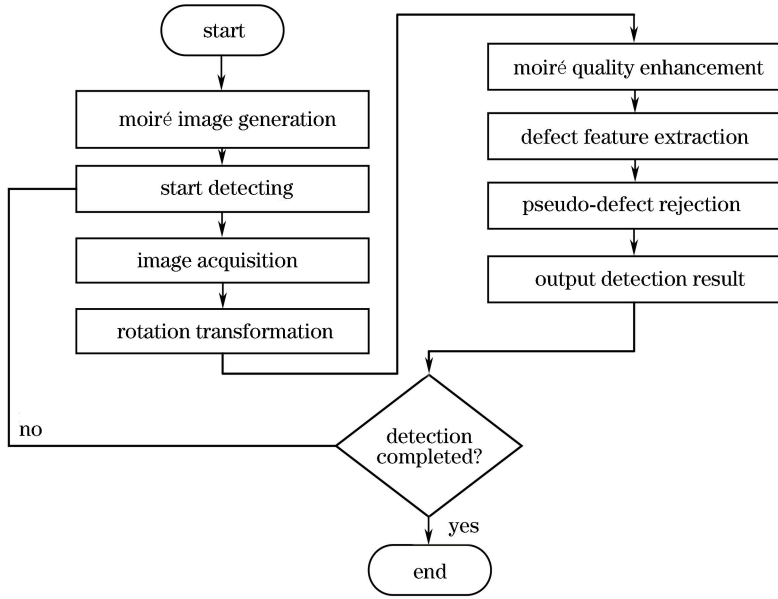


图 12 缺陷检测算法流程图

Fig. 12 Diagram of defect detection algorithm

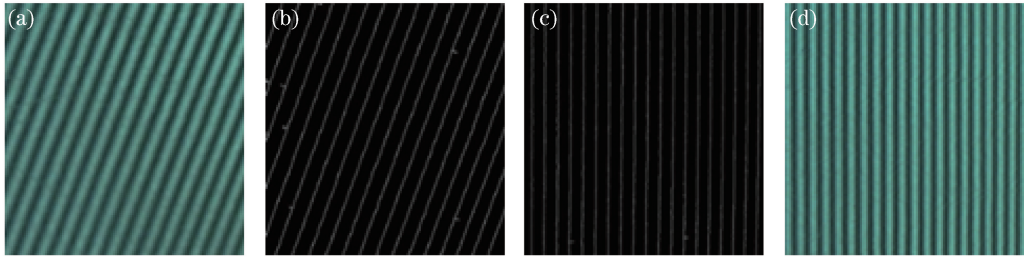


图 13 图像预处理模块。(a)原始图片;(b)细化图片;(c)校正后的细化图像;(d)校正后的图像

Fig. 13 Image preprocessing module. (a) Original image; (b) image centerline; (c) corrected image centerline; (d) corrected image

对图像进行旋转变换并设定 ROI 后,条纹在不同的缺陷处表现出了不同形态的变化。对标准图像及缺陷图像在缺陷位置的灰度纹理进行分析,可以发现其梯度信息存在明显的变化。拷贝两份云纹图像,一份进行梯度变换,另一份进行频域高斯变换。

高斯函数的傅里叶变换仍然是高斯函数,但是其标准差已经发生改变,频域标准差越大,高斯函数越宽。在空域上,高斯函数表示为

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (12)$$

式中: σ 为高斯函数的标准差。

对图像进行快速傅里叶变换(FFT)后,图像已经转换到频域,此时的高斯函数在频域上可表示为

$$H(u, v) = \exp\left[-\frac{u^2 + v^2}{2\sigma^2}\right] = \exp\left[-\frac{D(u, v)^2}{2D_0^2}\right], \quad (13)$$

式中: d_0 为截止频率; $D(u, v)$ 为图像频域点 (u, v) 的值, $D(u, v) = u^2 + v^2$ 。当 $D(u, v)$ 越大时,高斯函数 $H(u, v)$ 距离中心越近,即距离频率空间 $(0, 0)$ 越远时,频率越高。通过对图像进行卷积运算,滤除高频信号,保留低频信号。对应频域变换过程可表示为

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v), \quad (14)$$

式中: $F(u, v)$ 为原始图像的频域坐标值。由于背景条纹图像的条纹灰度是 255 与 0, 变化剧烈, 因此通过此操作, 可以使背景条纹图像变模糊。对上述两份图像进行差分运算, 可以得到如图 13 中 (b) 和 (c) 的变换结果, 由图可见, 经过上述算法处理后, 缺陷信息得到明显增强。

在获取到缺陷信息增强的图像后, 利用实验调试法, 得到 Gabor 滤波器的最佳参数。抛光打磨过程中, 磨轮的方向都是水平方向, 因此在图像采集

时,将云纹方向设置为竖直方向,如图 2 所示。在使用 Gabor 滤波器时,经过实验对比,取垂直方向的滤波参数,并且只采用 Gabor 变换实部,观察处理后的图像可以发现,使用基于实部变换的 Gabor 变换后,缺陷处的纹理信息变得更加突出。在经过 Gabor 变换后,引入了最大熵分割。图 14~16 为算法对砂眼、砂带痕、橘皮缺陷的处理结果。

在实际生产中,工厂内会存在一些灰尘。对处理后的缺陷信息进行对比后发现,灰尘的特征在处理后的所占的像素面积非常小。利用面积特征对缺陷

进行初步去伪。由于缺陷在表面造成了形变,因此缺陷周围的梯度比灰尘的梯度大。据此,在云纹图像上对缺陷的梯度信息进行计算,结合面积特征与梯度特征,进行伪缺陷剔除,并获取了缺陷的轮廓与坐标,在原图上进行标注并输出缺陷信息,控制执行机构进行相应的缺陷工件剔除。

图 14~16 中,(a)为采集的云纹图像,(b)为预处理后的 ROI 灰度图,(c)为缺陷特征增强后的结果图,(d)为经过图像特征提取后的图像,(e)为形态学处理后的图像,(f)为识别结果。通过观察对比,可以发现

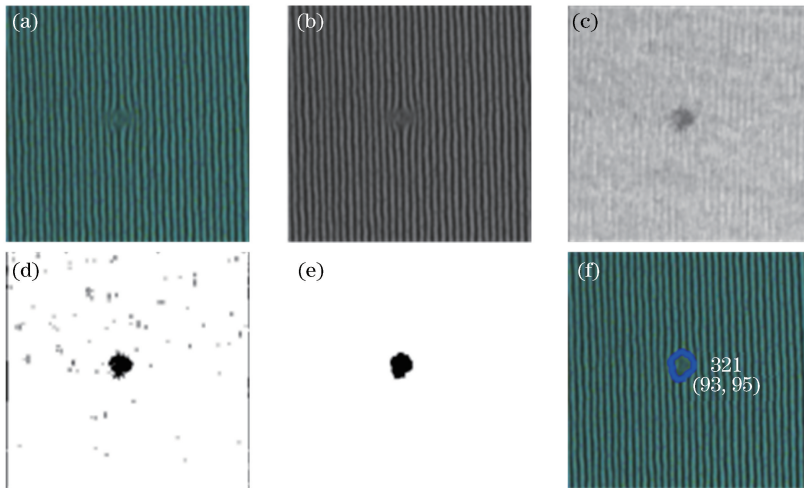


图 14 算法对砂眼缺陷的处理结果。(a)原始图像;(b) ROI 灰度图像;(c)缺陷增强后的图像;(d)缺陷特征提取后的图像;(e)形态学处理后的图像;(f)识别结果

Fig. 14 Processing results of sand hole defect by algorithm. (a) Original image; (b) ROI grayscale image; (c) image after defect enhancement; (d) image after defect feature extraction; (e) morphologically processed image; (f) identification result

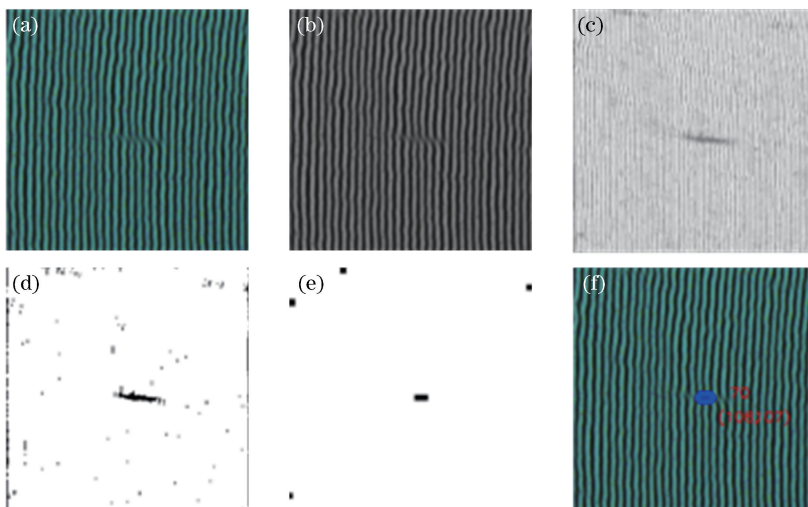


图 15 算法对砂带痕缺陷的处理结果。(a)原始图像;(b) ROI 灰度图像;(c)缺陷增强后的图像;(d)缺陷特征提取后的图像;(e)形态学处理后的图像;(f)识别结果

Fig. 15 Processing results of belt mark defect by algorithm. (a) Original image; (b) ROI grayscale image; (c) image after defect enhancement; (d) image after defect feature extraction; (e) morphologically processed image; (f) identification result

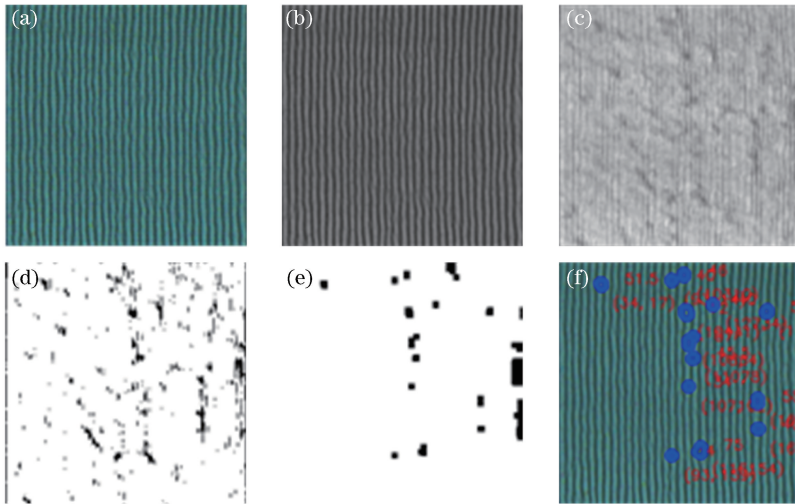


图 16 算法对橘皮缺陷的处理结果。(a)原始图像;(b) ROI 灰度图像;(c)缺陷增强后的图像;
(d)缺陷特征提取后的图像;(e)形态学处理后的图像;(f)识别结果

Fig. 16 Processing results of orange skin defect by algorithm. (a) Original image; (b) ROI grayscale image; (c) image after defect enhancement; (d) image after defect feature extraction; (e) morphologically processed image; (f) identification results

所提算法能较好地实现云纹图像下的缺陷检测。

通过采集样本进行重复实验并统计结果,得到了本文方法对几种典型缺陷的检测效果,如图 17 所示。在工厂缺陷检测的环境中,抛光工件的缺陷类

型与位置都是随机的,常规的算法只能针对一种或几种缺陷进行检测。通过观察可知,所提的检测方法针对高反射面上具有形变特征的缺陷均有良好的检测效果。

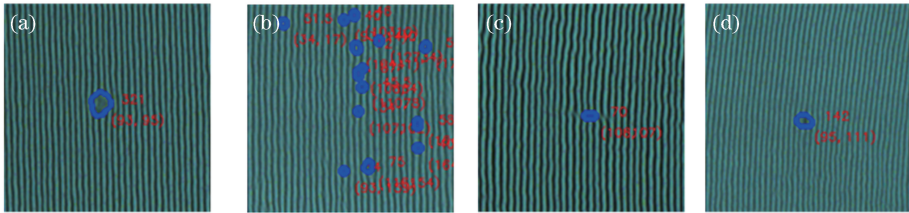


图 17 缺陷检测与标注结果。(a)砂眼;(b)橘皮;(c)砂带痕;(d)凹坑

Fig. 17 Defect detection and labeling results. (a) Sand hole; (b) orange skin; (c) belt mark; (d) pit

利用所提高反射曲面工件检测装置,采集大量样品进行实验,对实验结果进行统计,得到了不同缺陷检测识别统计结果,如表 1 所示,其中第 2 列为待检测工件个数,第 3 列为正确检测出的工件个数。将所提检测方法与人工检测的结果进行对比可见,所提方法对携带不同缺陷工件的检出率达到 92%

以上,不需要针对不同的缺陷设计不同的算法,能够满足客户需求。

表 1 不同缺陷的检测识别统计结果

5 结 论

Table 1 Different defect detection results and identifying statistical results

Defect type	Samples number	Detection number	Detection rate / %
Belt mark	128	121	94.5
Sand hole	132	126	95.5
Orange skin	113	105	92.9
Standard artifacts	108	107	99.1
Total	481	459	95.4

利用云纹面光源经高反射曲面反射差异设计了一种针对打磨抛光等具有高反射特性工件的表面缺陷检测方法,实验结果表明,该方法能克服高反射曲面图像采集的难点,对砂眼、砂带痕、橘皮等具有形变特征的缺陷有较好的检测效果。通过设置条纹间距可以实现分辨率可调,增加了系统的可拓展性。与相位偏折技术^[4]相比,所提方法只需要采集一次样本图像,即可完成缺陷检测,减小了计算量,提高了设备的检测效率。本方法适用于具有高反射特性工件表面中具有形变特征的缺陷检测,而脏污等非形变特征不属于缺陷,因此不在讨论范围。

本文采用传统的图像算法来实现缺陷检测,下一步将尝试使用深度学习来解决工业缺陷检测问题,通过样本训练,避免人工特征提取,使检测结果更加精准,避免环境光干扰带来的误差。通过实验统计,所提方法对不同的形变缺陷均有较好的适应性与拓展性,有效地解决了工业高反射曲面工件缺陷检测的难点,具有较高的理论价值与经济价值。

参 考 文 献

- [1] Berthold K P H. Robot vision[M]. Wang L, Jiang X Y, Transl. Beijing: China Youth Publishing Group, 2014: 1-14.
伯特霍尔德·霍恩. 机器视觉[M]. 王亮, 蒋欣兰, 译. 北京: 中国青年出版社, 2014: 1-14.
- [2] Chen S Y. A research of defect visual inspection system for specular and irregular surfaces [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 1-8.
陈松赞. 高亮异型曲面表面缺陷检测系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 1-8.
- [3] Liu Y K, Su X Y, Wu Q Y. Three-dimensional shape measurement for specular surface based on fringe reflection[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 1636-1640.
刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于条纹反射的类镜面三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1636-1640.
- [4] Zhao W C, Zhong X Y, Liu B. The surface flaws inspection of optical components based on the fringe reflection[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(9): 0912007.
赵文川, 钟显云, 刘彬. 基于条纹反射的光学表面疵病检测法[J]. 光子学报, 2014, 43(9): 0912007.
- [5] Hao Y, Zhao X, Wen Q H, *et al.* Roller missing detection in deep groove ball bearings based on machine vision [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 021502.
郝勇, 赵翔, 温钦华, 等. 基于机器视觉的深沟球轴承滚珠遗漏检测[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 021502.
- [6] Nayar S K, Ikeuchi K, Kanade T. Determining shape and reflectance of hybrid surfaces by photometric sampling [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(4): 418-431.
- [7] Liu D, Yan T L, Wang D D, *et al.* Review of fringe-projection profilometry and phase measuring deflectometry [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(9): 0917001.
刘东, 严天亮, 王道档, 等. 条纹投影与相位偏折测量技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 0917001.
- [8] Liu Q X, Wang F, Wang Y C. Design of long depth of field array optical components defect detection system [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0322002.
刘钦晓, 王方, 王渊承. 长景深阵列光学组件缺陷检测系统设计[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0322002.
- [9] Shen J, Castan S. An optimal linear operator for step edge detection [J]. CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1992, 54(2): 112-133.
- [10] Wang Q C, Jing J F, Zhang L, *et al.* Denim defect detection based on optimal Gabor filter [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 071501.
王清晨, 景军锋, 张蕾, 等. 基于最优 Gabor 滤波器的牛仔布缺陷检测[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 071501.
- [11] Zhang G, Ma Z M. An approach of using Gabor wavelets for texture feature extraction [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(2): 247-254.
张刚, 马宗民. 一种采用 Gabor 小波的纹理特征提取方法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(2): 247-254.
- [12] Zhang T Y, Suen C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns [J]. Communications of the ACM, 1984, 27(3): 236-239.