

基于扇形条纹调制度的光滑平面缺陷检测

朱勇建, 潘敏玲, 朱立新, 秦国锋, 秦运柏

引用本文:

朱勇建, 潘敏玲, 朱立新, 等. 基于扇形条纹调制度的光滑平面缺陷检测[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2112–2121.

ZHU Yong-jian, PAN Min-ling, ZHU Li-xin, et al. Detection of mirror defects based on sector fringe reflection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2112–2121.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202810.2112>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电致发光缺陷检测仪的成像性能评估

Evaluation of imaging performance for electroluminescence defect detector

光学精密工程. 2017, 25(6): 1418–1424 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172506.1418>

基于光学傅里叶变换的周期性微结构缺陷检测

Detection of periodic microstructure defect based on optical Fourier transform

光学精密工程. 2017, 25(7): 1727–1737 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172507.1727>

塑料光学透镜的磁悬浮检测

Magnetic levitation detection for plastic optical lenses

光学精密工程. 2016, 24(4): 756–763 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162404.0756>

基于超声背散射信号递归分析的金属材料微缺陷识别

Micro defects detection in metallic materials based on recurrence analysis of ultrasonic backscattering signal

光学精密工程. 2019, 27(4): 932–944 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192704.0932>

航天密封圈曲面成像理论及其缺陷检测

Curved surface imaging theory and defect detection for sealing rings used in aerospace systems

光学精密工程. 2015, 23(11): 3051–3060 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152311.3051>

文章编号 1004-924X(2020)10-2112-10

基于扇形条纹调制度的光滑平面缺陷检测

朱勇建*, 潘敏玲, 朱立新, 秦国锋, 秦运柏
(广西师范大学 电子工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:在光滑表面缺陷检测过程中,调制度可以用来标记缺陷位置。为了提高缺陷检测的准确性,提出了一种基于扇形条纹的调制度检测方法,该方法对缺陷位置和方向有更高的灵敏度,适用于多种类型的缺陷检测。首先,由变形条纹解调得到调制度图,调制度的高低可判断是否存在缺陷,再基于调制度图产生新的质量图——调制度-相位梯度偏差质量图,由此可以识别出缺陷位置。8组对比实验表明,同一实验环境下,基于扇形条纹的调制度缺陷检测方法不仅能检测出单一走向的缺陷,对复合走向的缺陷检测效果也很好,能更完整地检测缺陷,同时检测缺陷的精确度达到了0.07 mm。与传统的机器视觉方法和水平/垂直/圆形条纹检测法相比,本文所提出的扇形调制度法具有更高的灵敏度和准确性。

关键词:光学检测;缺陷检测;条纹反射;扇形条纹;调制度

中图分类号:O439;TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20202810.2112

Detection of mirror defects based on sector fringe reflection

ZHU Yong-jian*, PAN Min-ling, ZHU Li-xin, QIN Guo-feng, QIN Yun-bai

(College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

* Corresponding author, E-mail: zhuyongjian_hn@126.com

Abstract: For detecting mirror plane defects, fringe modulation is generally regarded as an effective method. To improve the accuracy of defect detection, this paper proposes a sector fringe-based modulation testing method. The proposed method is more compatible with the defect direction and suitable for many types of defects. A new quality map is used based on deformed fringe modulation and phase gradient deviation to identify the locations of defects. Eight groups of experiments are conducted and compared. Results show that the modulation and phase gradient quality map can suppress the selectivity of defect directions and the testing accuracy of defects can reach a minimum size of 0.07 mm. Compared with the traditional machine vision method and horizontal/vertical/circular fringe-based methods, the proposed sector fringe modulation method offers state-of-the-art sensitivity and higher accuracy.

Key words: optical detection; defect detection; stripe reflection; sector fringe; modulation

收稿日期:2020-02-04;修订日期:2020-04-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51775230);广西自然科学基金资助项目(No. 2017GXNSFAA198313, No. 2018GXNSFAA294003);桂林市科学研究与技术开发计划项目(No. 20170104-2);广西高等学校千名中青年骨干教师培育计划资助项目

1 引言

在工业生产和产品维修领域,产品表面缺陷检测是一个重要的环节。随着当今社会对电子产品的需求和产品的质量要求逐渐提高,产品表面缺陷的快速定位及检测,一直是当代电子产品制造领域的一大难题。而机器视觉检测因其无接触、无破坏性、精度高等特点,成为产品缺陷中一种热门的检测方法^[1-2]。传统的机器视觉检测依赖于打光方式,运用不同的光源对待测物体进行实验可以获取到不同的检测效果。区兴华^[3]等对比了平行光和均匀散射光对消除强反射光的不同作用及对不同缺陷的显现力,采用均匀散射光作为光源克服了光亮金属表面的反光特性。

然而,面对光滑或类镜面物体,高反光是传统机器视觉的一大难题。为满足工业制造领域的测量需求,反射测量技术被广泛应用于金属镜面和喷漆表面的缺陷检测中^[4]。陈红丽^[5]和曾小星^[6]等使用横/竖条纹反射法对类镜面物体进行缺陷检测,实验结果能够完整地检测出类镜面物体的缺陷。郭凤霞^[7]和 Li Cao^[8]等分别采用拟合法和导数符号二值图像法提取条纹中心线,并对提取的条纹中心线进行自动缺陷检测分析,这种方法放大了缺陷特征,提高了缺陷检测精度。熊显名^[9]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和定位。赵文川^[10]等利用相移技术得到正交和垂直两个方向的对比度分布,通过对比度分布确定被测表面的疵病位置。

传统的反射测量技术采用水平或者垂直条纹对待测物体进行调制,但这两种类型的条纹对同方向的缺陷更敏感,对缺陷检测的识别率并不高。孙颖^[11]等针对陶瓷球曲面特性设计了一种特殊形状条纹,再对获取到的变形条纹进行处理,最终定位特征点。宋宇航^[12]等使用圆环条纹对高反射曲面的钢球进行缺陷检测,该方法能够对待测物进行有效检测和判别,但该方法更适用于球面物体的缺陷检测。本文分析了光滑表面缺陷检测的难点,根据条纹反射检测原理提出了一种基于扇形调制度的光滑平面缺陷检测方法,通过求取扇形条纹的调制度分布大致确定待测物表面的缺陷,然后再通过调制度-相位梯度偏差质量图^[13]

精确识别出缺陷位置。该方法优于传统的缺陷检测方法,而且提高了检测精度。

2 缺陷检测原理

调制度的获取方式主要分为单幅条纹傅里叶变换法和相移条纹法。单幅条纹傅里叶变换法只需要获取一张条纹图,实验简单、速度较快,但是易造成频谱混叠和频谱泄露,获得的调制度精度较低,检测效果不够理想。相移条纹法使用多幅相移条纹计算调制度,稳定性和抗噪能力强,相比之下更适用于缺陷检测。

基于相移法的调制度测量系统的基本原理是结构光条纹投影到待测物体表面,经具有高度变化的镜平面表面反射后,正弦条纹会发生形变,通过相移技术测量待测镜平面表面的调制度,根据待测物表面的调制度变化及其分布,即可快速准确地确定表面缺陷的位置。若待测物体表面光滑,对应的调制度值应该是相同的,若表面存在缺陷,表面会存在轻微的高度变化,这种变化会使光线发生偏折和散射,造成相位分布的变化和图像对比度的改变,即调制度发生改变。检测原理如图1所示,将生成的条纹由显示屏反射到待测物,相机拍摄待测物体获取变形条纹,并传送到计算机内进行数据处理,通过对调制度的分析对比可快速地确定缺陷的位置及分布。

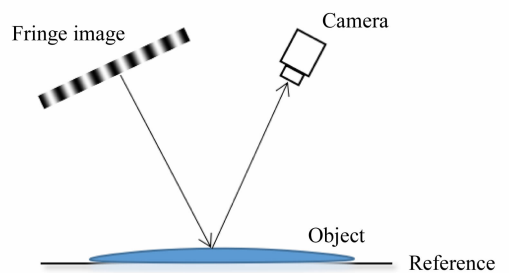


图1 条纹反射检测缺陷原理

Fig. 1 Principle for fringe-based reflection defect detection

较于普通横竖正弦条纹,本文选用的扇形条纹无需考虑两个方向条纹间的相互影响,解决了横竖条纹对缺陷分布垂直方向检测精度差等问题,并且扇形条纹避免了传统圆形条纹圆心和解调制度的影响,非常适用于镜面和类镜面的表面

缺陷检测。

扇形条纹与横纵条纹的最大的区别在于:扇形条纹在横纵两个方向都存在梯度变化(见图 2),能一次性获取两方向上的物体信息,从而使被测物体表面信息保存最大化,而横、纵条纹只在单一方向上有梯度变化,这个优点提升了条纹对缺陷方向的兼容性。

LCD 显示屏将正弦条纹投影到待测物体上,传统的投影条纹可表示为:

$$I_i = A(x, y) + B(x, y) * \cos(\theta + \varphi_i), \quad (1)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N$, I_i 为第 i 步移相时的合成光强, $A(x, y)$ 为背景光强, $B(x, y)$ 为条纹对比度, θ 为相位值, φ_i 为相移量。为了得到条纹调制度,一般需要至少投影 $L(L \geq 3)$ 次,总相移量为一个条纹周期,总共可得到 L 帧条纹图,由此求出每一个像素点的调制度。针对四步相移法,有

$$M(x, y) = \sqrt{\left[\sum_{m=0}^{L-1} I_i(x, y) \sin(2n\pi/L) \right]^2 + \left[\sum_{m=0}^{L-1} I_i(x, y) \cos(2n\pi/L) \right]^2}, \quad (2)$$

式中 I_i 为第 i 步相移时的光强。

结合式(1)和式(2)可以得到:

$$M(x, y) = \frac{1}{2}LB(x, y). \quad (3)$$

由此可见,条纹调制度 $M(x, y)$ 只与条纹对比度有关,且成正比关系,与背景光强无关。在调制度实际测量中,调制度就相当于条纹对比度,由于直接求对比度比较困难,因而引入调制度的概念。

扇形条纹的编码是利用不同半径的圆环横、纵坐标来选取黑白条纹。先确定圆心和圆心区域周围的条纹颜色,以半径为步长依次逐项地扩展为标准扇形正弦条纹。作为扩展条件的圆环半径如下:

$$R(x, y) = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}, \quad (4)$$

式中 R 为圆环直径, x 和 y 是圆环上对应的横纵坐标, x_0, y_0 是圆环的圆心坐标。所以半径为扩展条件得到的条纹是环形条纹,再截取中心角为 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 的圆环即可得到标准扇形正弦条纹。

标准扇形正弦条纹可表示为:

$$I_i = A(x, y) + B(x, y) * \cos(2\pi R(x, y) + \varphi_i), \quad (5)$$

式中 $2\pi R(x, y)$ 为相位值。由此可以得出调制度公式为:

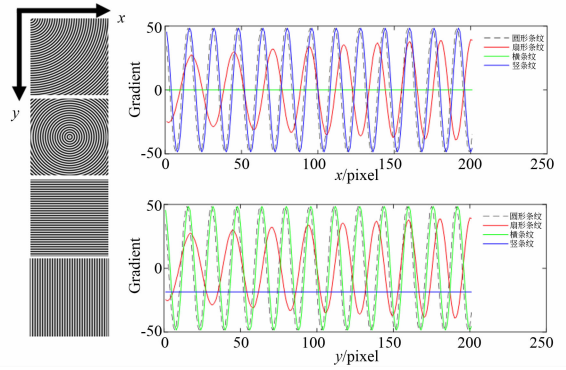


图 2 四种条纹在横纵两方向截波

Fig. 2 Four fringes cut in transverse and longitudinal directions

$$\varphi_1 = \pi/2, \varphi_2 = \pi, \varphi_3 = 3\pi/2, \varphi_4 = 2\pi.$$

正弦条纹上任意一点的调制度 $M(x, y)$ 定义为:

$$M = 2 \times \frac{\sqrt{(I_3 - I_1)^2 + (I_4 - I_2)^2}}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}, \quad (6)$$

式中 I_n 为第 n 次相机采集到的反射条纹图像光强。变形条纹的每一像素调制度越高,该处的条纹对比度越高,相位信息越可靠,说明该处存在缺陷的可能性越小。图 3 为扇形条纹调制度法得到的调制度图,图 4 为所测得缺陷某行(图 3 红线位置)的调制度分布。可以看出,当所测位置无缺陷时,该处调制度值较高,若所测位置存在缺陷,则该处调制度明显降低。因此,可以选用调制度作为检测缺陷的依据。

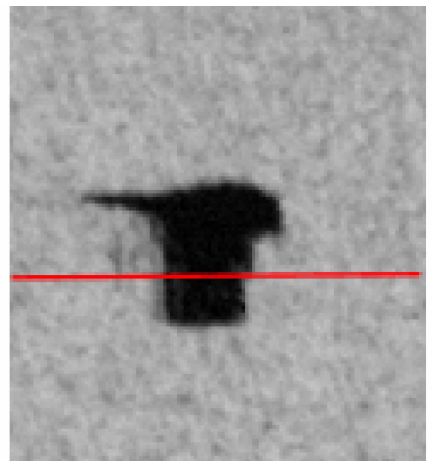


图 3 扇形条纹调制度法得到的缺陷调制度图

Fig. 3 Defect image via sector fringe-based modulation

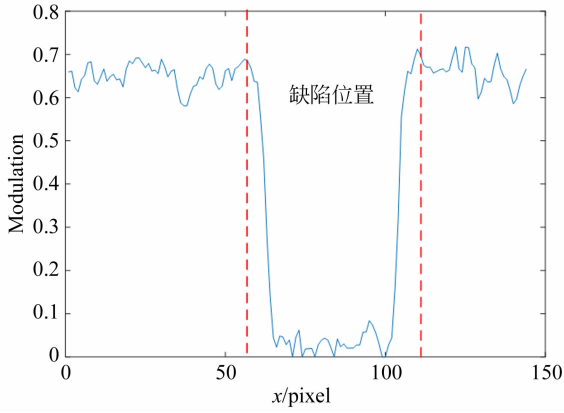


图 4 测得缺陷某行的调制度分布

Fig. 4 Modulation distribution of a row in defect image

3 调制度-相位梯度偏差质量图缺陷识别

本文基于调制度-相位梯度偏差质量图^[13]提出一种缺陷识别方法。相位导数偏差质量图的可靠度高,调制度梯度质量图能清晰地表示条纹图的数据质量,那么结合两者的调制度-相位梯度偏差质量图则能大大提高缺陷识别的准确度。

根据四步相移法求得包裹相位为:

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right). \quad (7)$$

相位导数偏差质量图可表示为:

$$q_{m,n} = \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j}^x - \bar{\Delta}_{m,n}^x)^2}}{k^2} + \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j}^y - \bar{\Delta}_{m,n}^y)^2}}{k^2}, \quad (8)$$

式中: k 为以点 (m, n) 为方形窗口的尺寸; $\Delta_{i,j}^x$ 和 $\Delta_{i,j}^y$ 为 x 方向和 y 方向的包裹相位梯度,可表示为:

$$\Delta_{i,j}^x = W\{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}\}, \quad (9)$$

$$\Delta_{i,j}^y = W\{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}\}, \quad (10)$$

其中: W 为包裹算子, $\varphi_{i,j}$ 为包裹相位; $\bar{\Delta}_{m,n}^x$ 和 $\bar{\Delta}_{m,n}^y$ 是以点 (m, n) 为中心的 $k \times k$ 窗口内包裹相位梯度的均值。

调制度梯度偏差质量图如式(11)所示:

$$\delta M_{m,n} = \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta M_{i,j}^x - \bar{\Delta M}_{m,n}^x)^2}}{k^2} + \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta M_{i,j}^y - \bar{\Delta M}_{m,n}^y)^2}}{k^2}, \quad (11)$$

式中: $\bar{\Delta M}_{m,n}^x$ 和 $\bar{\Delta M}_{m,n}^y$ 是以点 (m, n) 为中心的 $k \times k$ 窗口内调制度梯度的均值; $\Delta M_{i,j}^x$ 和 $\Delta M_{i,j}^y$ 为 x 方向和 y 方向的包裹相位梯度,可表示为:

$$\Delta M_{i,j}^x = M_{i+1,j} - M_{i,j}, \quad (12)$$

$$\Delta M_{i,j}^y = M_{i,j+1} - M_{i,j}. \quad (13)$$

而调制度-相位梯度偏差质量图可表示为:

$$M_{m,n} = q_{m,n} \times \delta M_{m,n}. \quad (14)$$

在检测缺陷时,若待测平面无缺陷则为质量好的点,标记为 1,在图片显示为白色;若待测平面有缺陷则为质量差的点,标记为 0,在图片显示为黑色。

4 实验与结果

本文先后采用传统检测方法、调制度法检测同一块 Dell 面板缺陷,通过不同的检测算法进行有效性实验对比。实验中采用面光源对 Dell 面板进行打光,使用 500 万像素的 CMOS 相机获取缺陷图。图 5 为传统检测法的检测效果,图 6 为扇形条纹调制度法检测效果。传统检测法是利用光照和缺陷显现力的关系,相机在不同的光照

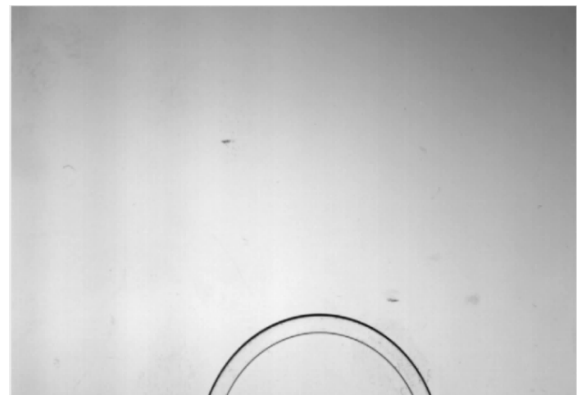


图 5 普通机器视觉检测法的缺陷检测效果图

Fig. 5 Defect image captured by general machine vision inspection

下能获得同一缺陷的不同效果,这种方法的随机性比较大,不适用于光滑面的检测。对比可以看出,传统检测法检测光滑面板缺陷有很大的局限性。

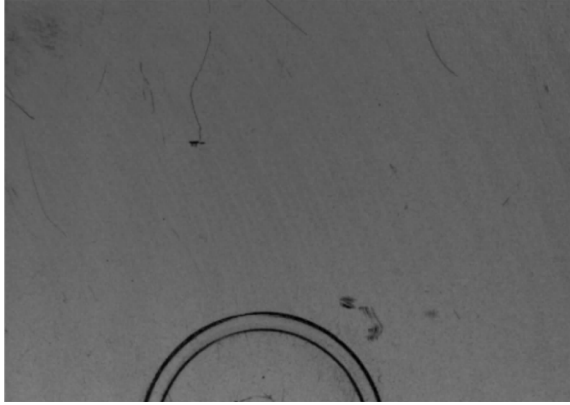


图 6 扇形条纹调制度的缺陷检测效果

Fig. 6 Defect image captured by sector fringe-based modulation

调制度检测法又分别通过投射标准横条纹、竖条纹、圆形条纹和扇形条纹进行同等实验环境下的对比,检验不同算法的实际效果。系统设置如图 7 所示,采用 $1\,900 \times 600$ 的 LCD 显示屏投影扇形条纹,采集装置为大恒图像生成的 500 万像素的 CMOS 相机,被测物体为 Dell 笔记本电脑背面板。实验将 Dell 面板上的缺陷标记为 1~8 号,将缺陷走向大致分为横向和竖向。

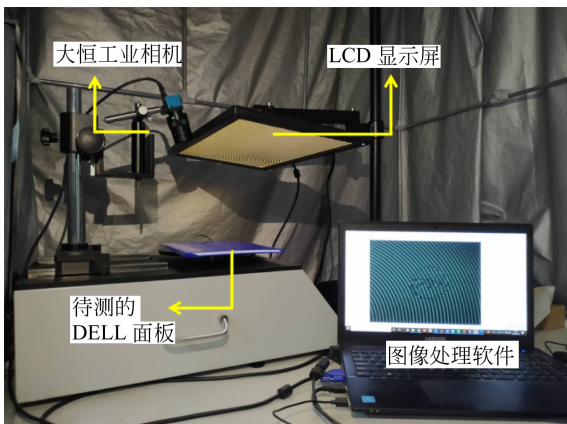


图 7 条纹调制度检测实验装置

Fig. 7 Experimental equipment for fringe-based modulation detection

圆形条纹越往圆心位置条纹密度越大,在圆心处密度过大不满足采样定理,容易产生信号失真,从而掩盖圆心附近的缺陷信息。如图 8(a)所示,高亮部分为圆心位置。图 9 为图 8(a)直线对应的圆心位置的单行调制度分布,可以看出,圆形条纹圆心位置调制度变化较大,因此,使用圆形条纹进行检测时,缺陷位置离圆心越近,调制度越不均匀,检测结果越不可靠。而横、竖、扇形 3 种条纹的调制度分布较为均匀,不存在此问题,如图 8(b)所示。

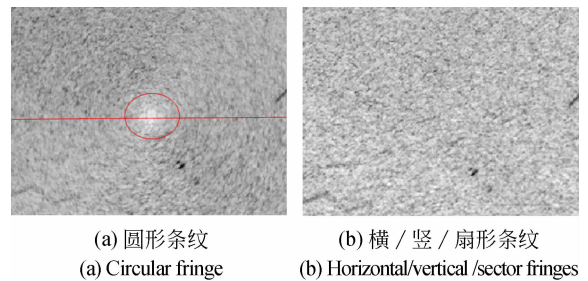


图 8 不同条纹的调制度效果

Fig. 8 Modulation effect with different fringes

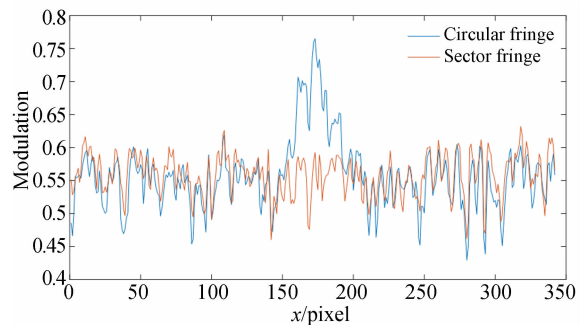


图 9 圆心处调制度的变化情况

Fig. 9 Modulation variation at center of circle

将 4 种条纹对同一缺陷进行实验。图 10 和图 11 为 1 号和 2 号缺陷的调制度检测效果。1 号和 2 号缺陷走向主要为竖。由图 10 可看出,竖条纹比横条纹更能清晰地标识出竖缺陷。但对图中点缺陷(圆圈位置)的检测,横条纹却比竖条纹的检测效果更好。而扇形条纹和圆形条纹能够兼容两种条纹的优点完整地 1 号缺陷中的两部分缺陷检测出来。检测 2 号缺陷时(见图 11),横条纹和圆形条纹能完整地将缺陷检测出来,但是效果依然没有竖条纹和扇形条纹的明显。

同理,当检测缺陷走向为横向的 3 号和 4 号缺陷时(见图 12 和图 13),横条纹检测效果比竖条纹检测效果更好,扇形条纹和横条纹检测同种缺陷效果一致或者更好。实验得出,横、竖条纹对

缺陷的检测具有选择性。具体表现在横形条纹对横向缺陷的检测结果更为明显,竖形条纹对竖向条纹的检测结果更为明显,而扇形条纹则对横、竖向缺陷的检测结果都比较理想。

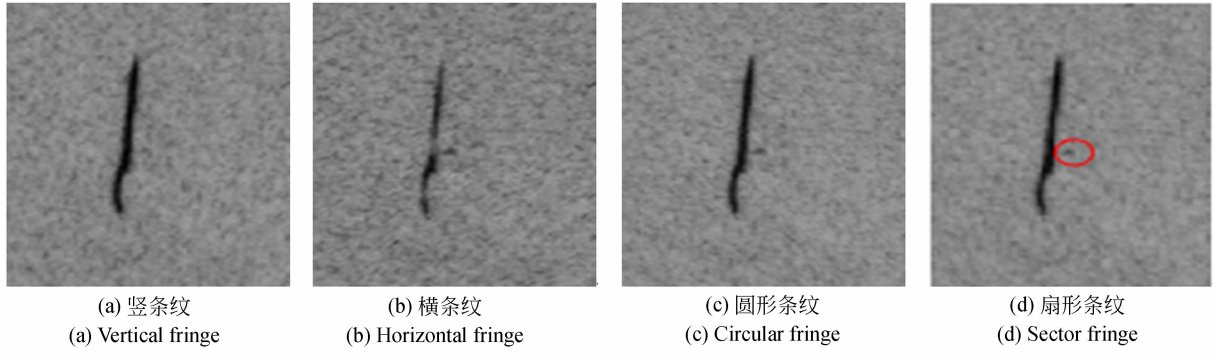


图 10 1 号缺陷的调制度检测效果
Fig. 10 Modulation map of defect No. 1

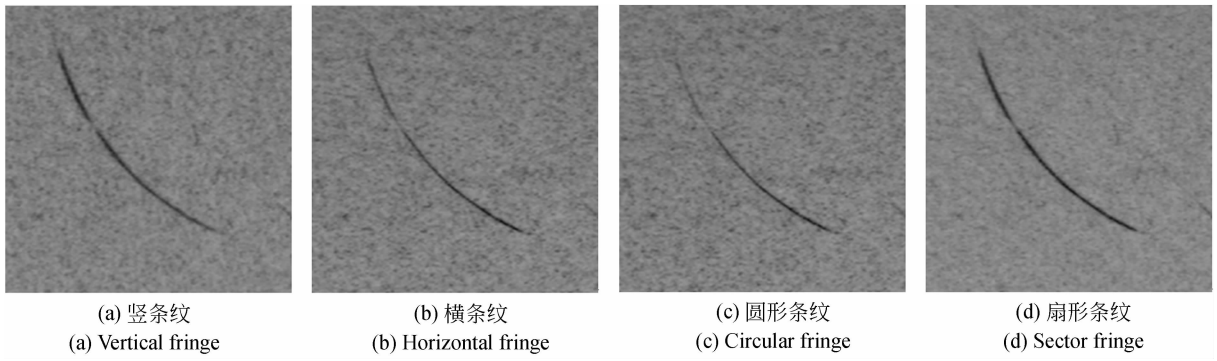


图 11 2 号缺陷的调制度检测效果
Fig. 11 Modulation map of defect No. 2

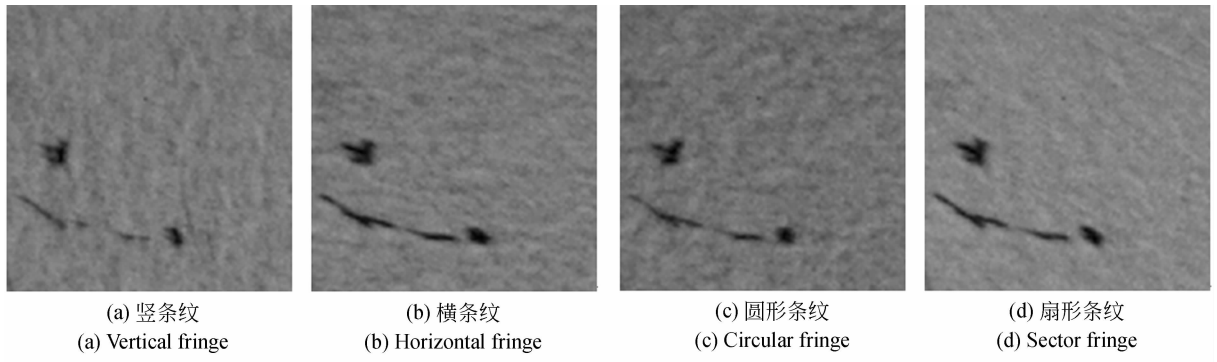


图 12 3 号缺陷的调制度检测效果
Fig. 12 Modulation map of defect No. 3

由图 10~图 13 可以得出:圆形条纹和扇形条纹都不受缺陷方向限制,但圆形条纹的检测效

果和离圆心的距离有关,检测效果不稳定,扇形条纹则不需要考虑这一点。

在缺陷较为复杂时,扇形条纹调制度法的检测效果更好。在 5~8 号缺陷的对比实验中(如图 14~图 17),横、竖条纹对走向较为复杂的缺陷容易发生漏检,即便是比较明显的缺陷,横竖条纹检测时也会对相反方向的缺陷不敏感。圆心条纹受

圆心影响,也会发生漏检的情况。

如图 15(c)所示,缺陷处于圆形条纹圆心附近,周围调制度受圆心影响,调制度分布不均匀(圆圈部分较亮),检测效果明显弱于扇形条纹。

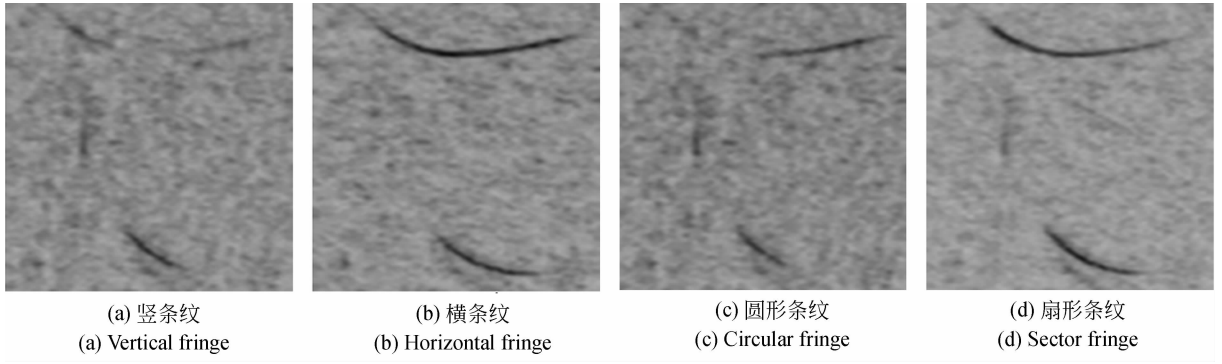


图 13 4 号缺陷的调制度检测效果

Fig. 13 Modulation map of defect No. 4

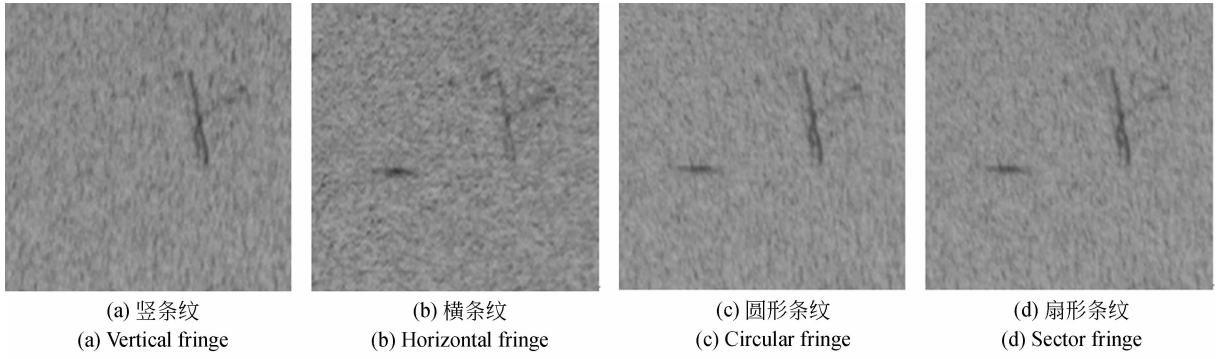


图 14 5 号缺陷的调制度检测效果

Fig. 14 Modulation map of defect No. 5

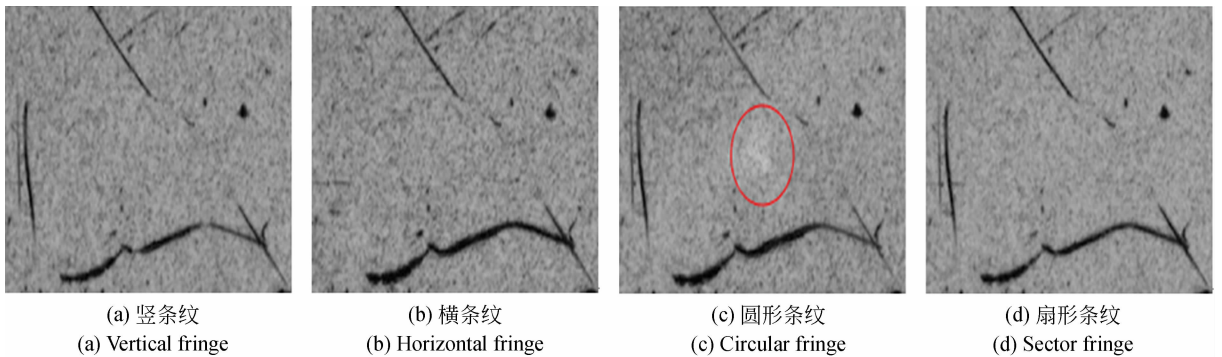


图 15 6 号缺陷的调制度检测效果

Fig. 15 Modulation map of defect No. 6

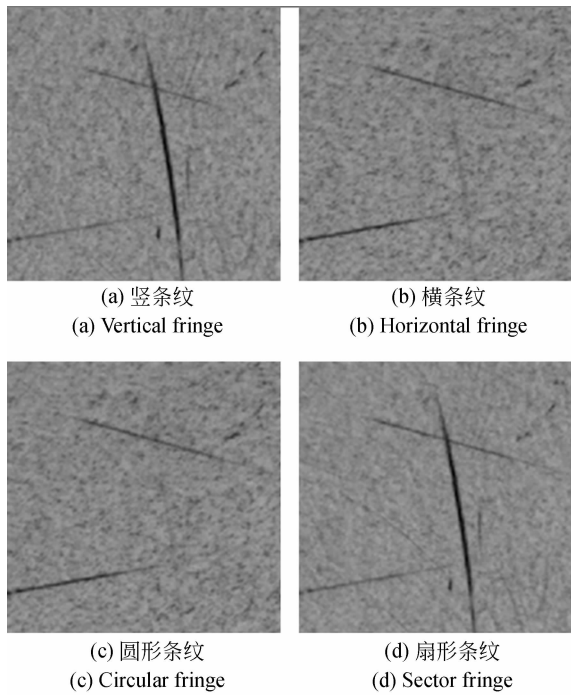


图 16 7 号缺陷的调制度检测效果
Fig. 16 Modulation map of defect No. 7

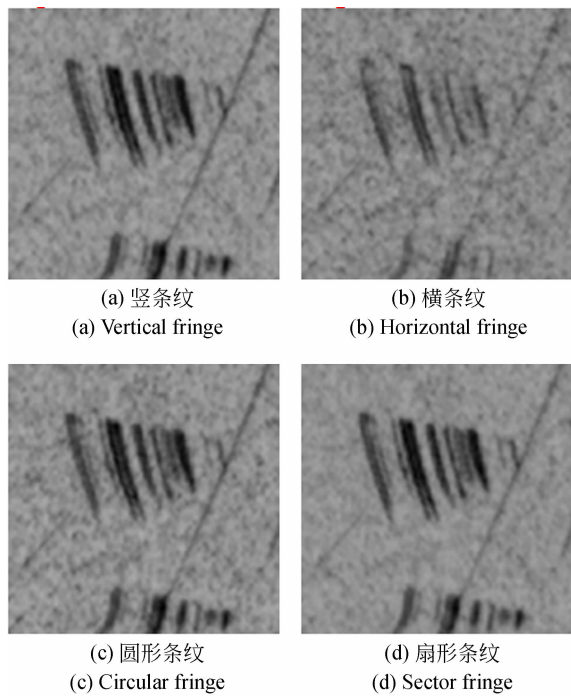


图 17 8 号缺陷的调制度检测效果
Fig. 17 Modulation map of defect No. 8

综上所述,扇形条纹发生漏检的概率比横、竖、圆形条纹的低。针对 Dell 面板上的 8 种缺陷,扇形条纹调制度法能够全部检测出来,且效果

优于传统的检测方法。

最后通过调制度-相位梯度偏差质量图识别缺陷位置,结果如图 18 所示。标定缺陷的实际物理尺寸,8 种缺陷的最小尺寸数据如表 1 所示。结果表明,扇形条纹调制度检测法可检测到最小尺寸为 0.07 mm 的缺陷,且检测效率远远高于另外 3 种方法。

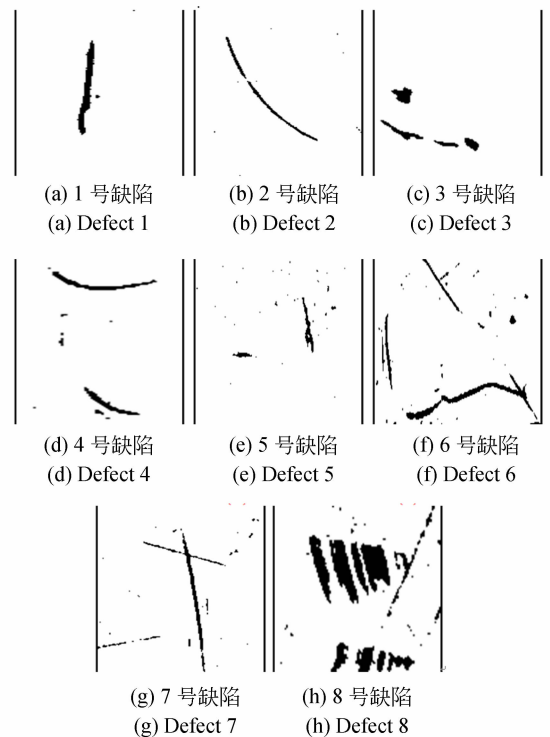


图 18 调制度-相位梯度偏差质量图的缺陷识别效果
Fig. 18 Modulation-phase gradient deviation quality images for defect detection

表 1 Dell 面板的缺陷检测结果

Tab. 1 Detection results of Dell panel defect

缺陷 No.	最小缺陷尺寸 /mm	竖条纹	横条纹	圆形条纹	扇形条纹
		(Yes/No)	(Yes/No)	(Yes/No)	(Yes/No)
No. 1	0.10	N	N	Y	Y
No. 2	0.07	Y	Y	N	Y
No. 3	0.09	N	Y	N	Y
No. 4	0.08	N	Y	N	Y
No. 5	0.07	N	N	Y	Y
No. 6	0.10	N	N	N	Y
No. 7	0.07	Y	N	N	Y
No. 8	0.13	Y	N	Y	Y

5 结 论

本文提出了一种基于扇形条纹的光滑表面缺陷检测方法。该方法通过分析表面缺陷引起的调制度的微观变化来检测物体表面缺陷,将调制度灰度图和包裹相位图结合,运用调制度-相位梯度偏差质量图进行缺陷识别。经 8 组对比实验证

明,扇形条纹能完整地识别出 8 组缺陷。相较于传统机器视觉检测法和横、竖、圆形条纹检测法,扇形条纹检测法有更高的灵敏度,完美地抑制住条纹对缺陷的选择性,测量精度达到 0.07 mm,精度和应用性得到提升。实验结果表明,这种检测方法放大了缺陷效应,具有较高的准确性和精度,为镜面和类镜面表面缺陷检测提供了技术支持。

参考文献:

- [1] 王武,叶明,陆永华. 基于机器视觉的手机壳表面划痕缺陷检测[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(1): 160-163, 189.
WANG W, YE M, LU Y H. Surface defect detection of mobile phone shell based on machine vision [J]. *Machine Building & Automation*, 2019, 48(1): 160-163, 189. (in Chinese)
- [2] 彭向前. 产品表面缺陷在线检测方法研究及系统实现[D]. 武汉:华中科技大学, 2008.
PENG X Q. *Study on Methodology of Product Surface Defects Online Detection and System Implementation*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [3] 曲兴华,何莹,韩峰,等. 强反射复杂表面随机缺陷检测照明系统分析[J]. 光学学报, 2003, 23(5): 547-551.
QU X H, HE Y, HAN F, *et al.*. Illumination system for detecting random defects on strongly reflective and complex surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(5): 547-551. (in Chinese)
- [4] 邵山川,陶小平,王孝坤. 基于条纹反射的超精密车削反射镜的在位面形检测[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 299-307.
SHAO SH CH, TAO X P, WANG X K. On-machine surface shape measurement of reflective mirrors by ultra-precision turning based on fringe reflection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 299-307. (in Chinese)
- [5] 陈红丽. 基于结构光的玻璃面板缺陷检测方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018.
CHEN H L. *Research on Defect Detection Method of Glass Panel Based on Structured Light* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [6] 曾小星. 基于结构光的偏光片外观缺陷检测技术研究[D]. 深圳:深圳大学, 2016.
ZENG X X. *Research on Defect Detection Technology of Polymeric polarizer Based on Structured Light* [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016. (in Chinese)
- [7] 郭凤霞,乌云,李滨,等. 冷冲压阀片表面压痕精确检测方法[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815013.
GUO F X, WU Y, LI B, *et al.*. Accurate detection method for surface indentation of cold stamping valve [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815013. (in Chinese)
- [8] CAO L, ZHONG S, ZHANG Q, *et al.*. Surface micro defect detection of tapered rollers based on laser diffraction sensor[J]. *Sensor Networks and Data Communication*, 2015, 4(2): 1000129.
- [9] 熊显名,石红强,曾星宇. 基于反射光纹的抛光曲面表面缺陷检测研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 141501.
XIONG X M, SHI H Q, ZENG X Y. Surface defect detection on polished surface based on reflection Moiré [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(14): 141501. (in Chinese)
- [10] 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): 167-171.
ZHAO W CH, ZHONG X Y, LIU B. The surface flaws inspection of optical components based on the fringe reflection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(9): 167-171. (in Chinese)
- [11] 孙颖,付鲁华,王仲. 基于条纹反射的陶瓷球表面缺陷快速检测算法[J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2020, 11(1): 28-37.
SUN Y, FU L H, WANG ZH. A fast detection algorithm for ceramic ball surface defects based on fringe reflection[J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2020, 11(1): 28-37. (in Chinese)
- [12] 宋宇航,王仲,付鲁华,等. 一种高反射曲面表面

缺陷的反射条纹检测方法[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(8): 1250-1254.

SONG Y H, WANG ZH, FU L H, *et al.*. Detection of surface defect on highly reflective curved surface using reflective fringe pattern[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2017, 36(8): 1250-1254. (in Chinese)

[13] 朱勇建, 刘立人, 栾竹, 等. 相位解包裹算法中基于调制度的新质量图[J]. 中国激光, 2006, 33(5): 667-672.

ZHU Y J, LIU L R, LUAN Z, *et al.*. New quality map based on modulation for phase unwrapping algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(5): 667-672. (in Chinese)

作者简介:



朱勇建(1979—),男,江西瑞昌人,博士,教授,2000年、2003年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2007年于中科院上海光机所获得博士学位,主要从事视觉检测和三维测量技术方面的研究。E-mail: zhuyongjian_hn@126.com



潘敏玲(1996—),女,广西贵港人,硕士研究生,2018年于忻州师范学院获得学士学位,主要从事图像处理和三维测量技术方面的研究。E-mail: 15077769642@163.com