

激光与光电子学进展

基于相位测量偏折法的类镜面缺陷检测

张凯龙¹, 钱莉^{1*}, 朱春雷²

¹上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620;

²苏州格拉尼视觉科技有限公司, 江苏 苏州 215000

摘要 针对传统机器视觉难以检测类镜面零件表面缺陷的问题, 结合相位测量偏折术原理, 将缺陷检测问题转换成基于绝对相位差提取突变区域的问题。首先, 采用灰度投影法得到图像待测曲面的坐标及尺寸, 分割出待测曲面区域。然后, 对待测曲面进行相位提取和相位展开, 用绝对相位分布图与参考面的绝对相位分布作差, 得到绝对相位差图。最后, 对相位差图进行频域处理, 以滤除周期性成分, 同时采用 Sobel 滤波器提取相位差图的突变区域, 得到表面缺陷。实验结果表明, 基于相位测量偏折术的缺陷检测方法能实现类镜面物体表面的缺陷检测, 检测精度可达到 0.180 mm。

关键词 测量与计量; 类镜面; 缺陷检测; 相位测量偏折术; 相位展开; 非线性误差

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0512004

Defect Detection in Mirror-Like Surface Based on Phase Measuring Deflectometry

Zhang Kailong¹, Qian Li^{1*}, Zhu Chunlei²

¹*School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;*

²*Suzhou Grani Vision Technology Co., Ltd, Suzhou, Jiangsu 215000, China*

Abstract In this paper, combined with the principle of phase measuring deflectometry, the problem of defect detection is converted to the problem of extracting abrupt areas using absolute phase difference to solve the problem that traditional machine vision is difficult to detect surface defects of mirror-like surface. First, the coordinates and dimensions of the surface to be measured are obtained by gray projection method, and the area of the surface to be measured is segmented. Then, phase extraction and phase unwrapping are performed on the measured surface and the absolute phase distribution map is used as a difference with the absolute phase distribution of the reference surface to obtain an absolute phase difference map. Finally, the phase difference map is processed in frequency domain to filter the periodic components, and the Sobel filter is used to extract the phase difference map's abrupt areas to obtain surface defects. The experimental results show that the defect detection method based on phase measuring deflectometry can detect surface defects of mirror-like objects with a 0.180 mm detection accuracy.

Key words measurement and metrology; mirror-like surface; defect detection; phase measuring deflectometry; phase unwrapping; nonlinear error

1 引言

随着现代工业的发展, 生产中加工制造精度不

断提高, 使制造业对物体表面缺陷的检测要求越来越高。工业生产中类镜面物体的检测大多依赖于人工目测或触摸等方式^[1], 效率不高, 且容易受到人

收稿日期: 2021-07-06; 修回日期: 2021-08-17; 录用日期: 2021-09-16

通讯作者: *ql0327@163.com

工不稳定因素的影响。现有检测方式中,三维(3D)接触式测量^[2]需要与被测物体直接接触,可能会划伤待测表面,不适合类镜面的缺陷检测;传统机器视觉技术常用暗域照明^[3]方式规避镜面反射造成的局部高光现象,对平面类镜面缺陷检测的效果较好。

近年来,结构光技术被广泛应用在表面缺陷检测^[4]和缺陷尺寸测量^[5]中,但均使用线结构光,检测速度较慢。基于面结构光的相位测量轮廓术(PMP)和相位测量偏折术(PMD)常用于三维面形测量中^[6]。其中,PMD以液晶(LCD)屏幕向待测表面投射正弦编码条纹图像,利用被待测表面调制过的变形条纹解算得到三维面形数据^[7-8],能检测被测件表面的局部微小缺陷,灵敏度较高,更适用于镜面物体的面形测量中。刘元坤等^[9]采用PMD对瓷砖等类镜面表面进行检测,Bothe等^[8]采用PMD对铝镜进行检测,均观察到了被测表面的微观形貌,验证了将PMD应用于类镜面物体缺陷检测的可行性。陈红丽^[10]利用调制度对玻璃面板进行了缺陷检测;曾小星^[11]基于结构光照明,利用鲁棒的主成分分析(RPCA)图像处理算法实现了液晶显示器偏光片缺陷的识别与提取;熊显名等^[12]分析了抛光曲面的光照模型,利用反射云纹图像产生的差异实现了缺陷的检测和定位;陶迁等^[13-14]结合相移图像和格雷码图像提取反射图像的相位,并提出了格雷码周期级数的校正方法,解决了相位展开过程中的周期错位问题,进一步实现了类镜表面的缺陷检测。

本文对光照反射模型进行了分析,并给出了类镜面物体的检测难点,基于PMD提出了一种针对曲面类镜面表面的缺陷检测方法。首先,利用计算机编码生成条纹图,经LCD屏幕投射至待测表面。然后,用CCD相机采集被待测表面调制后的图像,利用灰度投影法分割出待测零件所在的感兴趣区域。最后,进行相位提取和相位展开,利用频域下的高通滤波器去除非线性响应导致的波纹相位背景^[15],提取出可用的相位图及相位图中突变区域的边缘,获取缺陷位置。以汽车某零件为实验对象进行测试,验证了该方法的有效性。

2 缺陷检测的难点分析

类镜曲面物体具有镜面反射特性和曲面特性,对缺陷检测造成了一定困难。利用机器视觉系统进行缺陷检测时,提高采集图像中物体表面缺陷与

正常表面的对比度是缺陷检测的重要步骤,而类镜面的镜面反射特性导致的局部高光会减弱甚至覆盖表面的缺陷信息。

在计算机图形学中,根据物体表面特性对物体的光照反射模型有多种描述,Nayar反射模型^[16]描述了普遍的反射情况,如图1所示。其中, I_i 为入射光线, O 为入射光线与物体表面的交点, I_r 为对应的镜面反射光线, θ 为入射角与反射角(相等)。反射光可分为镜面尖峰成分、镜面叶瓣成分、漫反射成分。其中,漫反射成分的反射光光强在表面各个方向上相等;镜面叶瓣成分为分布在镜面反射光线附近的光线;镜面尖峰成分为集中在镜面反射光线方向上的光线。类镜面物体的表面反射光由上述三种成分的光线组合而成,以镜面尖峰成分和镜面叶瓣成分的光线为主。

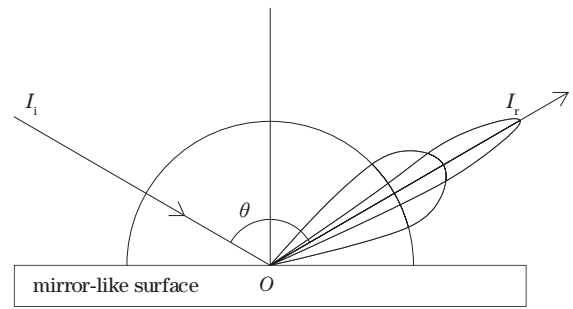


图1 Nayar反射模型的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Nayar reflection model

传统机器视觉的暗域照明方式对平面反射物体和曲面反射物体的检测原理分别如图2和图3所示。可以发现,对于平面反射物体,通过合理摆放光源、待测物体和相机的位置及角度,可以避免镜面尖峰成分和镜面波瓣成分的光直射进CCD相机,只采集表面的漫反射光,从而避免过饱和现象;对

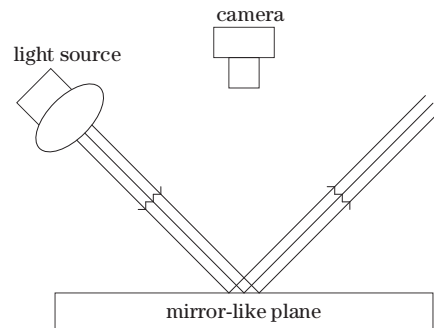


图2 类镜平面的暗域照明示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the dark-field illumination of mirror-like plane

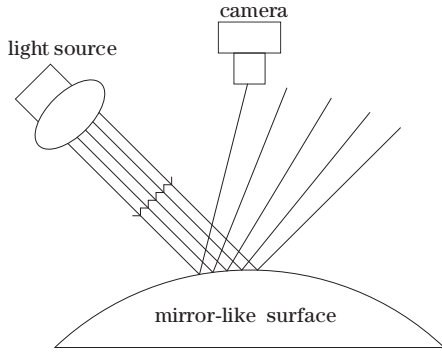


图 3 类镜曲面的暗域照明示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the dark-field illumination of mirror-like surface

于曲面物体的检测,由于其表面不同点处的法线方向不同,无法使所有镜面的反射光直射入相机,导致采集的图像中有局部高光区域,淹没了该区域的信息。

3 基于相位测量偏折术原理的缺陷检测方法

通过相机得到相位信息后,先用 4 步相移法和空间相位展开技术分别进行相位提取和展开,再利用灰度投影法定位并截取待测区域,最后用绝对相位差与缺陷的相关性检测缺陷。

3.1 相位测量偏折术的基本原理

与传统视觉检测尽量避免镜面反射光的直射不同,PMD 利用了镜面反射定律,其原理如图 4 所示。该系统主要由 LCD 屏幕、待测物体、CCD 相机组成。由 LCD 屏幕将正弦条纹图像投射至待测物体表面,光线遵循镜面反射定律反射进入 CCD 相机。LCD 显示器(E)中投射出的一束光线 I_E 到一个理想平面上,与平面相交于 A 点,入射角为 θ 。当该

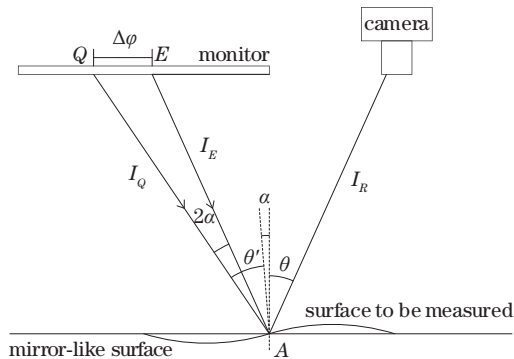


图 4 PMD 的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the PMD

平面为理想平面时,根据反射定律可知,入射光线 I_E 的反射光线以相同的角度 θ 射出,在 CCD 相机的像素 a 上成像,此时, a 点对应的相位值为 φ_E 。对待测镜面测量时,设镜面物体在 A 点相对于理想平面的倾斜角度为 α ,根据反射定律可知,入射光线 I_E 在镜面上反射光线的偏移角度为 2α 。由光路可逆原理可知,同一个反射至 CCD 相机像素 a 上成像的光线,其入射光线由 I_E 变为 I_Q ,像素 a 点的相位值变为 φ_Q 。

如果被测表面为理想的平面,光线平行投射时会平行反射进入相机,相机捕获的图像依然为严格的正弦条纹图;如果被测表面有缺陷,其表面高度和梯度会发生变化,同一条入射光线在缺陷处的反射光线相对于理想平面的反射光线会发生偏移,相机获取的条纹图会发生变形,通过变形条纹图像可以解算得到表面的相位信息。

3.1.1 相位提取

相机接收到的光线光强分布可表示为

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos [\varphi(x, y)], \quad (1)$$

式中, $I(x, y)$ 为相机像素 (x, y) 处接收到的光强分布,即图像的灰度值分布, $A(x, y)$ 为背景光强, $B(x, y)$ 为光强的振幅, $\varphi(x, y)$ 为绝对相位分布。常用的相位提取方法有傅里叶变换轮廓术和 N 步相移法。傅里叶变换轮廓术只需 1 张图像就能提取相位,计算速度快,但会因频谱混叠和频谱泄漏问题丢失细节信息; N 步相移法至少需要用 3 张图像计算相位,可以获得完整的相位信息,噪声的抑制效果好,但不适用于动态测量。本方法用 4 步相移法计算相位,先后向待测面投射 4 张初相位不同的条纹图,每张条纹图的相位变化量为 0.5π ,得到 4 张图的相位分布为

$$\begin{cases} I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos [\varphi(x, y)] \\ I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos [\varphi(x, y) + 0.5\pi] \\ I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos [\varphi(x, y) + \pi] \\ I_4(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos [\varphi(x, y) + 1.5\pi] \end{cases}, \quad (2)$$

简化(2)式中的 (x, y) , 计算得到的相位为

$$\varphi = \arctan \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right). \quad (3)$$

3.1.2 相位展开

相位是由反正切函数计算得到的,即 φ 会被包裹在 $(-\pi, \pi)$ 中,要想获得绝对相位,需要进行相位展开。常用的相位展开技术可分为空间相位展开

法和时间相位展开法。时间相位展开法需要获取多组空间频率不同的条纹图像,在条纹的时间序列上进行展开,以避免表面不连续导致的误差传播,但该方法需要拍摄并处理多组条纹,对拍摄速度和计算机性能的要求较高。实验中检测的曲面没有不连续区域,因此使用空间相位展开法。空间相位展开法通过对比逐像素与相邻像素的包裹相位进行计算,可表示为

$$\varphi_a^u = \varphi_a^w + 2\pi \times \text{round}\left(\frac{\varphi_b^u - \varphi_a^w}{2\pi}\right), \quad (4)$$

式中, φ_a^u 为待展开点 a 的相位展开结果, φ_a^w 为点 a 的包裹相位, φ_b^u 为已展开相位点 b 的展开相位, $\text{round}()$ 为四舍五入取整函数。

3.1.3 绝对相位差与缺陷的关系

假设正弦条纹的周期为 T , 则存在

$$l_{EQ} = \frac{(\varphi_E - \varphi_Q)T}{2\pi} = \frac{\Delta\varphi T}{2\pi}, \quad (5)$$

式中, l_{EQ} 为线段 EQ 的距离, φ_E 和 φ_Q 分别为点 E 和点 Q 的绝对相位, $\Delta\varphi$ 为两点之间的绝对相位差。在 $\triangle AEQ$ 中, 测量距离 l_{AQ} 一般远大于梯度导致的相移距离 l_{EQ} , 将显示屏到待测点的距离记为 d , 则存在

$$\tan(2\alpha) = \frac{l_{EQ}}{l_{AQ}} = \frac{\Delta\varphi T}{2\pi d}. \quad (6)$$

当倾斜角很小时, $\tan(2\alpha) = 2\tan\alpha$, (6) 式可简化为

$$\tan\alpha = \frac{\Delta\varphi T}{4\pi d}. \quad (7)$$

由(7)式可以发现, 由条纹获得的绝对相位差 $\Delta\varphi$ 与待测表面梯度直接相关, 因表面缺陷造成的梯度变化同样会表现在绝对相位信息中, 表面缺陷位置梯度变化的位置相位也会产生类似的变化。因此, 可通过条纹反射得到绝对相位分布图, 再根据缺陷在相位分布图中产生的突变检测缺陷。

3.2 待测区域的定位与截取

为了保持条纹图的稳定可靠, 相机视野一般略大于被测表面, 一方面引入了背景图像的干扰, 另一方面也增加了相位提取和展开的工作量。为了进行快速稳定的检测, 基于灰度投影法实现待测区域的定位与截取。图 5 为 CCD 相机获取的 1 张待测图像, 可以发现, 零件的类镜面部分反射了屏幕的条纹, 其灰度值相对于黑色粗糙的背景更高。对待测面不同初始相位投影得到的图像求平均, 将被测表面上的条纹转换为均匀的高灰度值区域, 如图 6 所示。

将图 6 在行方向与列方向分别投影并求取平均



图 5 待测图像

Fig. 5 Image to be measured



图 6 4 张相移图像的平均灰度图

Fig. 6 Average gray scale of 4 phase-shifted images

值, 得到每行的灰度平均值 X_r 与每列的灰度值平均值 Y_c , 灰度投影可表示为

$$\begin{cases} X_r = \frac{1}{w} \sum_{c=1}^w f(c, r) \\ Y_c = \frac{1}{h} \sum_{r=1}^h f(c, r) \end{cases}, \quad (8)$$

式中, w 和 h 分别为图像的宽度和高度, c 和 r 为图像的列索引和行索引, $f(c, r)$ 为图像指定坐标 (c, r) 的像素灰度值。所有的行投影平均值和列投影平均值均可表示为一条曲线。图 6 经过灰度投影后得到的行列平均值曲线如图 7 所示, 可以发现, 在垂直列投影曲线上, 从第 1597 列开始, 列灰度平均值发生突变, 第 1630 列至 2190 列的灰度平均值明显高于其他列。曲线大幅减小和增大区间对应于灰度变化的边缘所在列。为了获取边缘列, 计算行列平均值曲线的一阶微分, 即

$$\begin{cases} \Delta X_r = X_r - X_{r-1} \\ \Delta Y_c = Y_c - Y_{c-1} \end{cases}. \quad (9)$$

图 6 的灰度平均值微分曲线如图 8 所示, 由微分突变列可以得到待测曲面所在列区域。水

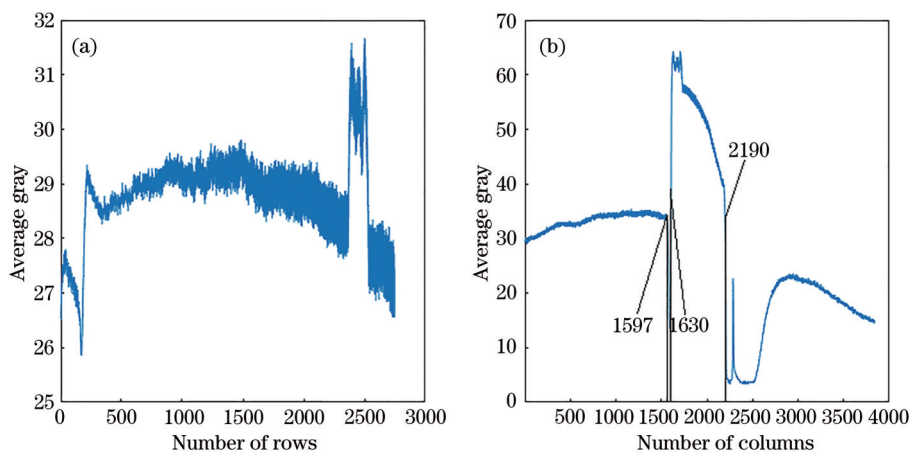


图 7 灰度投影的平均值曲线。(a)水平投影曲线;(b)垂直投影曲线

Fig. 7 Average curve of gray projection. (a) Horizontal projection curve; (b) vertical projection curve

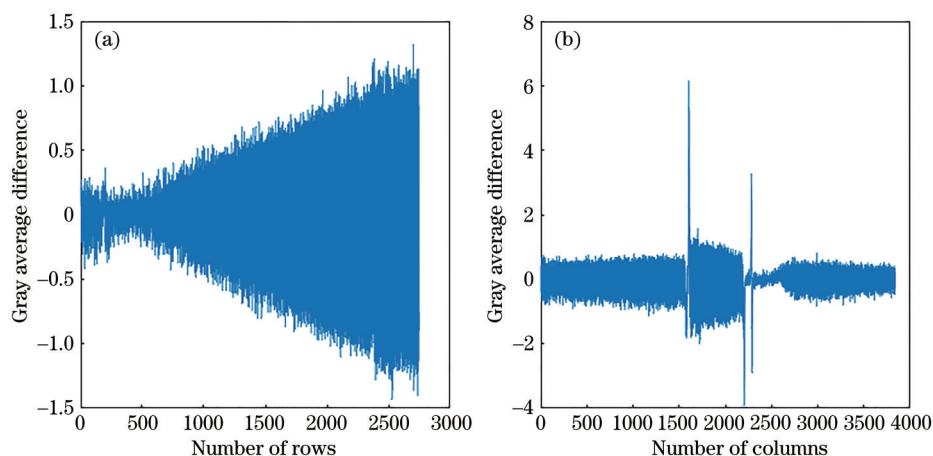


图 8 灰度投影的平均值微分曲线。(a)水平投影曲线;(b)垂直投影曲线

Fig. 8 Average differential curve of the gray projection. (a) Horizontal projection curve; (b) vertical projection curve

平方向投影微分的曲线变化没有列投影曲线变化明显,原因是水平方向上待测曲面的占比较小,受背景噪声的影响较大。因此,先通过垂直投影微分曲线获取待测曲面所在的列区域,再对截取的部分列灰度数据进行行投影,从而减小行方向上背景噪声的影响。

通过灰度投影法可得到待测曲面所在区域的最小外接矩形,如图 9 所示。可以发现,被测零件所在位置被完整地包含在矩形范围内。

3.3 缺陷的检测

通过灰度投影法截取得到待测区域后,先利用(3)式进行相位提取得到包裹相位,然后利用(4)式对包裹相位进行相位展开,从而得到待测曲面的绝对相位。缺陷一般可以理解为表面上梯度剧烈变化的区域,由上述分析可知,梯度与相位差直接相关。理论上的相位差是待测面与理想平面的相位

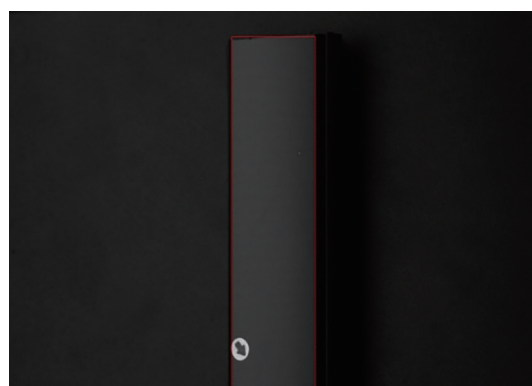


图 9 待测区域的截取结果

Fig. 9 Interception results of the area to be measured

差,因此,用参考平面镜作为理想平面,用与待测曲面相同的系统参数拍摄反射条纹图,求解其绝对相位作为理想平面的相位数据。

将待测曲面的绝对相位与参考镜的绝对相位

作差,得到绝对相位差。相位差数据转换的灰度图像如图 10 所示(图像过长,为了方便显示,将其顺时针旋转了 90°)。可以发现,显示器的非线性误差导致投射出的正弦图产生畸变,相位差图中存在周期性波纹,对缺陷检测产生了一定影响。



图 10 绝对相位差图

Fig. 10 Absolute phase difference diagram

为了减少波纹对缺陷检测的影响,需对绝对相位差数据进行处理,以减少其中周期性的波纹成分。将图 10 转换到频域中,经过频域滤波后再转换到时域,以过滤大部分波纹成分,频域处理后的图像如图 11 所示。对图 11 进行平滑处理,以减弱图中的噪声,再用 Sobel 算子提取突变区域并对其进行形态学处理,去掉部分噪声导致的杂点、填充部分缺陷之间的孔洞,形态学处理的结果如图 12 所示。

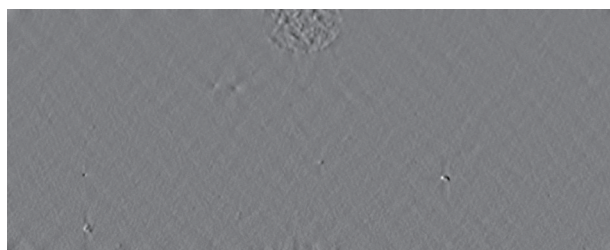


图 11 频域处理的结果

Fig. 11 Result of the frequency domain processing



图 12 缺陷区域

Fig. 12 Defect area

4 实验结果及分析

以图 13 中的汽车导水槽零件为检测对象进行研究,分别用传统打光方式以及结构光进行成像,结果



图 13 待测零件

Fig. 13 Parts to be measured

如图 14 所示。可以发现,传统打光方式由于镜面反

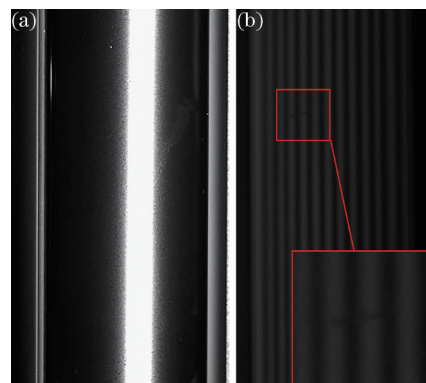


图 14 不同方式的成像结果。(a)传统方式;(b)正弦结构光
Fig. 14 Imaging results of different methods. (a) Traditional way; (b) sine structured light

射的存在,物体表面部分区域会发生过曝,淹没了其中的缺陷;其他区域则由于黑色表面的存在,灰度值普遍较低,很难凸显出其中的缺陷。而用显示器显示的正弦结构光作为光源采集图像时,可以采集到待测曲面的全场图像,在其渐变的灰度中能明显看到一条划痕,且通过后处理能提取出该划痕区域。

为了验证本方法的有效性,搭建了实验装置进行实验,系统装置如图 15 所示。该装置由 LCD 屏幕(分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$,单像素尺寸为 0.282 mm^2 ,最高亮度为 250 nits)、显示器支架、工业 CCD 相机(分辨率为 $3840 \text{ pixel} \times 2748 \text{ pixel}$,镜头焦

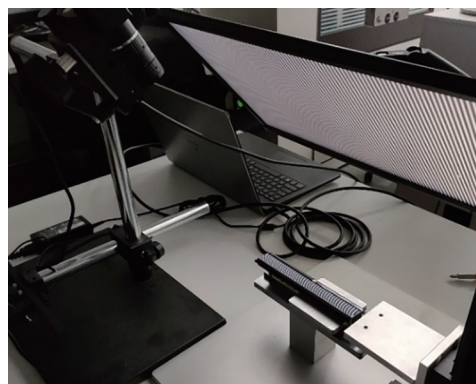


图 15 检测装置的实物图

Fig. 15 Physical image of the detection device

距为 16 mm)、相机支架和待测零件组成。屏幕与待测零件表面的距离约为 300 mm,相机与待测零件表面的距离约为 300 mm。由计算机生成周期为 30 pixel,尺寸为 1920 pixel \times 1080 pixel 的条纹图像,先后 4 次投放 8 张相移图像(间隔为 0.5 s),从开始投放第 1 张图像到提取出缺陷的耗时为 9.2 s。

最终共检测到 7 处缺陷区域,检测到的最小缺陷

直径为 5 pixel,相机的单像素精度为 0.036 mm,计算得到最小能检测到的缺陷尺寸为 0.180 mm。为了验证本方法对各种缺陷的适用性,对表面凸点、凹坑、划痕、毛发、污点、灰尘等缺陷类型进行了检测,结果如图 16 所示。其中,框选的区域即为缺陷区域。可以发现,本方法能检测到多种类镜面缺陷。

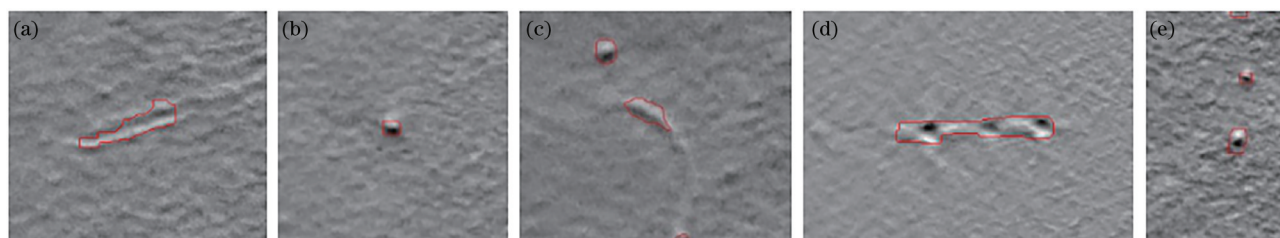


图 16 多种缺陷的检测结果。(a)划痕;(b)污点;(c)毛发;(d)刮伤;(e)凸点

Fig. 16 Detection results of multiple defects. (a) Scratch; (b) smudge; (c) hair; (d) bruise; (e) bump

5 结 论

提出了一种基于相位测量偏折术的类镜面缺陷检测方法。该方法将相位测量偏折术的思想应用于传统视觉不适用的类镜面检测项目中,通过缺陷对镜面反射光线的偏折引起的相位突变检测类镜面物体表面缺陷。采用灰度投影法实现对待测表面的定位与截取,减少计算量。采用高通滤波器滤除非线性误差产生的相位波纹,减少相位波纹对检测相位突变的影响。对汽车零件的检测结果表明,本方法可检测的最小缺陷尺寸为 0.180 mm,基本满足类镜表面缺陷检测的需求。

参 考 文 献

- [1] Kong F, Zhang C, Feng R H, et al. Automatic inspection system for car body paint defect[J]. *Modern Paint & Finishing*, 2017, 20(3): 57-61.
孔飞, 张川, 冯日华, 等. 汽车车身漆膜缺陷自动检测系统[J]. *现代涂料与涂装*, 2017, 20(3): 57-61.
- [2] Li B K. Development and application of the roughness measuring instrument of stylus and three-dimensional[J]. *Lubrication Engineering*, 2006, 31(4): 140-142.
李伯奎. 触针式三维粗糙度测量仪的开发及应用[J]. *润滑与密封*, 2006, 31(4): 140-142.
- [3] Su G Y, Qu X H, Zhang F M. Experiments on metal surface characteristics' effect on differential visual measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0115001.
苏国营, 曲兴华, 张福民. 金属表面特性对差动式视觉测量的影响实验[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0115001.
- [4] Han J J, Zhou J P, Xue R L, et al. Surface morphology reconstruction and quality evaluation of pipeline weld based on line structured light[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 1402010.
韩家杰, 周建平, 薛瑞雷, 等. 线结构光管道焊缝表面形貌重建与质量评估[J]. *中国激光*, 2021, 48(14): 1402010.
- [5] Xian K Q, Pang J Z, Hu J. Surface crack size detection in nuclear fuel rods based on line structured light[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(22): 221013.
咸凯强, 庞静珠, 胡俊. 基于线结构光的核燃料棒表面裂缝尺寸测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(22): 221013.
- [6] 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.
- [7] Knauer M C, Kaminski J, Hausler G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5457: 366-376.
- [8] Bothe T, Li W S, von Kopylow C, et al. High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5457: 411-422.

- [9] 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.
- [10] 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.
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.
- [11] Zeng X X. Research on inspection technology of polarizer appearance defect based on structured light [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016.
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.
- [12] 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.
熊显名, 石红强, 曾星宇. 基于反射云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.
- [13] Tao Q, Zhou Z F, Wu M H, et al. Detection of reflective surface defects based on phase measuring deflectometry[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(12): 1315-1322.
陶迁, 周志峰, 吴明晖, 等. 基于相位测量偏折术的反射表面缺陷检测[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(12): 1315-1322.
- [14] Jiang S, Yang L H, Ren Y J, et al. Defect detection in mirror-like object surface based on phase deflection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 031201.
姜硕, 杨凌辉, 任永杰, 等. 基于相位偏折的类镜面物体表面缺陷检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 031201.
- [15] Lü F, Xing S, Guo H W. Self-correction of projector nonlinearity in phase-shifting fringe projection profilometry[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(25): 7204-7216.
- [16] 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.