

基于相位偏折的类镜面物体表面缺陷检测

姜硕, 杨凌辉, 任永杰, 郑继贵*

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 针对现代制造业中类镜面物体表面缺陷检测的问题,研究了基于相位测量偏折术的自动检测方法。采用相移结合格雷码编码法提取反射图像相位,通过判断局部相位异常识别缺陷。分析相位提取错误导致误检现象的原因,提出一种折叠相位周期级数校正的方法。该方法能解决相位展开过程中的周期错位问题,保证相位的准确提取,避免误检问题。实验结果表明,基于相位偏折原理的检测方法能够实现对类镜面物体表面缺陷的准确、可靠检测。

关键词 测量; 类镜面缺陷; 相位测量偏折术; 格雷码; 相位展开

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.031201

Defect Detection in Mirror-Like Object Surface Based on Phase Deflection

Jiang Shuo, Yang Linghui, Ren Yongjie, Zhu Jigui*

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University,
Tianjin 300072, China

Abstract To detect defects on mirror-like object surfaces in the modern manufacturing industry, an automatic detection method based on phase measuring deflectometry is proposed. The phase of the reflected image is extracted by combining the phase shift and Gray code, and defects are identified by an analysis of local phase irregularities. In addition, the phase extraction error that leads to false detection is analyzed. A wrapped phase period index correction algorithm is proposed to prevent period misalignment during the phase unwrapping. Therefore, accurate phase extraction can be assured through the phase unwrapping algorithm, and false detection is avoided. Experimental results indicate that the proposed method can accurately and reliably detect mirror-like surface defects.

Key words measurement; mirror-like surface defect; phase measuring deflectometry; Gray-code; phase unwrapping

OCIS codes 120.1880; 120.5700; 050.5080; 110.5086

1 引言

现代制造业对类镜面物体表面缺陷检测的需求日益突出,如汽车、航空工业中产品的涂装质量检测问题。涂装质量直接影响防锈蚀性、外观及顾客满意度等,涂装后对产品表面坑包、缩孔、桔皮、流挂、污渍、划伤等缺陷检测,是进入后续工艺前保证产品质量的一个重要环节。类镜面物体表面具有镜面反

射特性,导致适用于漫反射物体表面检测的常规光学检测手段(如条纹投影法)无法适用。目前,类镜面物体(如涂装后车身表面)的缺陷检测主要依赖于人工检测手段,通过人眼从不同角度观察和利用触摸的方式实现检测^[1-2]。此类方法要求工人经验丰富、责任心强、注意力高度集中,劳动强度大,极易产生视觉疲劳。据统计,人工检测方法只能达到 70%~80% 的缺陷识别率,存在漏检率高、效率低、检测

收稿日期: 2019-06-03; 修回日期: 2019-07-05; 录用日期: 2019-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(51705360, 51721003)、天津市自然科学基金(18JCYBJC19400)

* E-mail: jiguizhu_tju@163.com

结果主观性强、人工成本高等弊端。

为克服人工检测方法存在的弊端,近年来出现了利用相位测量偏折术(PMD)^[3-6]进行镜面/类镜面物体表面缺陷检测的方法。相位测量偏折术(亦称作条纹反射法)向镜面/类镜面物体表面投射相位编码的条纹图像,利用反射图像相位对被测表面微小变化敏感的特点,通过解算反射图像的相位,实现缺陷检测,具有较高的检测灵敏度。其中,反射图像的相位提取是PMD需要解决的关键问题,如何快速可靠地获取反射图像相位成为PMD的重点和难点。主要原因有两方面:一方面,实际应用要求检测方法具有较高的检测速度,必须在规定时间内完成检测;另一方面,类镜面物体表面通常不是理想的镜面,反射图像离焦、表面缺陷处相位质量差及相位缺失等因素,均会影响反射图像的相位提取精度。因此,相位提取是相位偏折方法中需要解决的重要问题。

目前相位提取方法种类繁多,每种算法均有各自的优缺点和适用场景。相位提取包括折叠相位提取和折叠相位展开两个环节^[7]。PMD中常用的折叠相位提取方法包括傅里叶变换法^[8-9]和多步相移法^[10-11]。傅里叶变换法只需单帧图像,但存在相位信息丢失的问题,稳定性较差。相比而言,多步相移法利用多幅相移条纹图像计算折叠相位,可获得完整的相位信息,稳定性和抗噪声能力强,更适合用于缺陷检测。电子科技大学易京亚^[12]、吴雨祥^[13]和李明阳^[14]在手机壳、硅晶片、光学反射镜表面质量检测中都采用多步相移法获取反射图像的折叠相位。PMD常用的折叠相位展开方法可分为空间相位展开^[15-16]和时间相位展开^[17-18]。空间相位展开算法利用相邻像素间相位的连续性进行相位展开,无需额外的编码图像。易京亚^[12]在结构较为简单的手机壳外表面质量检测中采用了空间相位展开方法,李明阳^[14]在太阳能电池硅晶片表面质量检测中也采用了空间相位展开方法。但空间相位展开在相位质量差和相位缺失处易造成噪声的传播和累积,且算法不适合并行运算,限制了数据处理速度。时间相位展开中每个像素之间的相位展开过程相互独立,从而避免了误差传播,能够对复杂、高跃变面形进行准确的相位展开。易京亚^[12]在结构较为复杂的手机壳内表面的质量检测中采用了逆指数时间相位展开方法,但此方法需采集多组不同频率的相移图,所需图像数目过多,检测时间较长。

为实现快速可靠的类镜面物体表面缺陷检测,

本文研究了基于相位测量偏折原理的检测方法。为保证相位提取稳定性并减少相位提取所需图像数目,采用相移结合格雷码编码的方法进行相位提取,重点解决折叠相位展开过程中的周期错位问题。文章主要内容如下:首先,阐明PMD类镜面缺陷检测原理;然后,研究利用相移结合格雷码编码的反射图像相位提取方法,分析并解决周期错位造成相位提取错误的问题;最后,通过喷涂表面缺陷检测实验验证本文方法的有效性。

2 相位偏折类镜面缺陷检测原理

考虑到类镜面物体本质上仍然具有镜面反射特性,下文使用镜面进行检测原理和方法的论述。利用PMD进行镜面物体表面缺陷检测的原理如图1所示,LCD显示屏发出的光线经镜面物体表面反射后被相机捕获,相机采集显示屏反射后所成的虚像。根据镜面反射特性,被测镜面缺陷处反射的屏幕光线将发生偏折,如图1虚线所示,导致反射图像缺陷处发生局部变形。通过判断反射图像的局部变形即可实现镜面缺陷检测。

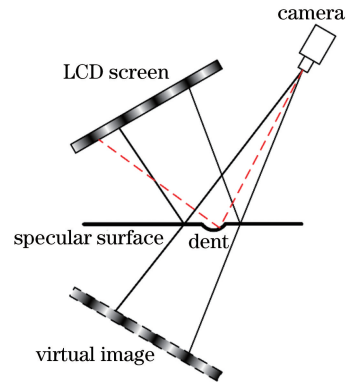


图1 基于PMD的镜面缺陷检测原理图

Fig. 1 Schematic of mirror surface defect detection based on PMD

为便于计算机自动识别缺陷所在位置,PMD缺陷检测系统向被测物表面投射包含相位信息的条纹图像,通过检测反射图像的相位异常实现缺陷检测。PMD缺陷检测系统如图2所示,包括LCD显示屏、相机和计算机。显示屏、相机和被测物表面之间的位置关系满足镜面反射定律。LCD显示屏显示相位编码的条纹图像,相机拍摄经被测镜面物体表面调制后的反射条纹图像,并传输到计算机进行相位提取。根据PMD缺陷检测原理可知,镜面物体表面微小缺陷将会导致反射条纹图像局部相位异常(通常表现为相位突变),通过检测相位异常即可实

现镜面物体表面缺陷检测。

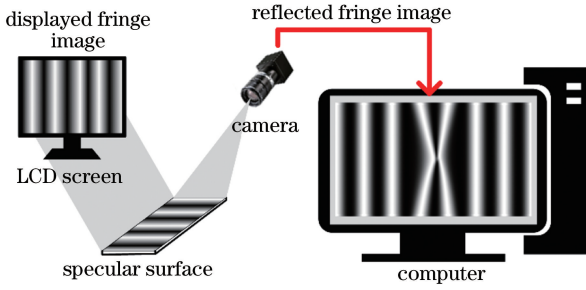


图2 基于PMD的镜面缺陷检测系统

Fig. 2 Mirror surface defect detection system based on PMD

为了实现缺陷检测,需要从反射图像相位信息中提取缺陷导致的相位异常区域。相对于非缺陷区域,反射图像缺陷区域的相位突变可归类为高频信号。因此,对反射图像的相位进行高通滤波即可实现缺陷检测。空域高通滤波算法处理速度快,滤波效果明显,特征突出,在图像处理(锐化、边缘处理等)领域得到广泛应用。空域滤波通过滤波模板(卷积核)与图像进行卷积来实现滤波。本文利用高斯函数的二阶导数构造卷积核对反射图像相位进行高通滤波,二维高斯函数表达式为

$$G(x_w, y_w) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x_w^2 + y_w^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

其二阶偏导数为

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x_w \partial y_w} = \frac{x_w y_w}{2\pi\sigma^6} \exp\left(-\frac{x_w^2 + y_w^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

式中: σ 为高斯分布的标准差; (x_w, y_w) 对应卷积核窗口的坐标。

利用(2)式构造卷积核,并与反射图像相位进行卷积运算,数学表达式为

$$h(x, y) = \phi(x, y) \otimes \left[\frac{x_w y_w}{2\pi\sigma^6} \exp\left(-\frac{x_w^2 + y_w^2}{2\sigma^2}\right) \right], \quad (3)$$

式中: (x, y) 为反射图像像素坐标; $\phi(x, y)$ 为反射图像中 (x, y) 点的绝对相位; \otimes 表示图像的卷积运算。反射图像缺陷区域存在相位突变,其相位卷积结果 $h(x, y)$ 较非缺陷区域得到显著增强,通过阈值分割即可实现缺陷检测。

由上述PMD缺陷检测原理可知,反射图像相位解算错误会对缺陷检测造成干扰,导致缺陷漏检和误检。因此,准确可靠地获取反射图像的相位是实现镜面物体表面缺陷检测的重要前提。

3 相位提取方法

为快速可靠地提取反射图像相位,采用相移结

合格雷码编码的相位提取方法。首先采用相移法获取折叠相位,然后利用格雷码编码法获取折叠相位的周期级数,以实现折叠相位展开。

3.1 折叠相位提取

LCD显示屏投射 $N(N \geq 3)$ 幅具有不同初始相位的条纹图,相机采集经镜面物体表面调制后的 N 幅反射条纹图像,图3(a)为四步相移的序列图像。 N 步相移中第 n 幅图像光强表达式为

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cdot \cos\left[\phi(x, y) + \frac{2(n-1)\pi}{N}\right], \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

式中: (x, y) 为图像像素坐标; $A(x, y)$ 为背景光强分布; $B(x, y)$ 为调制度分布。根据最小二乘原理求得反射条纹相位为

$$\Phi(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin \frac{2(n-1)\pi}{N}}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos \frac{2(n-1)\pi}{N}}. \quad (5)$$

由于反正切函数的值域截断问题, $\Phi(x, y)$ 被周期性地折叠在 $[-\pi, \pi]$ 范围内,如图3(b)所示,因此由相移法获取的相位称为折叠相位。

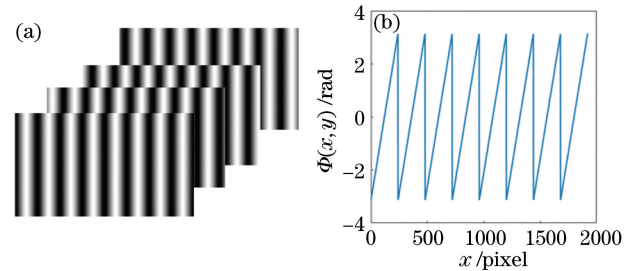


图3 折叠相位 $\Phi(x, y)$ 的提取。(a) 四步相移序列图像; (b) 折叠相位 $\Phi(x, y)$

Fig. 3 Extraction of wrapped phase $\Phi(x, y)$. (a) Sequence image of four-step phase-shift; (b) wrapped phase $\Phi(x, y)$

理想情况下折叠相位周期边界处只存在一次 $-\pi$ 到 π 的跳变。记(5)式中反正切函数的分子部分为 a ,由于反射图像存在随机噪声, a 在0附近的正负不定,导致解算的折叠相位在 π 和 $-\pi$ 之间反复跳变,产生 2π 的相位跳变误差。折叠相位反复跳变现象和对应的 a 值如图4所示。

为了保证相位展开算法的准确性,对折叠相位跳变误差进行校正。由于折叠相位跳变误差产生的原因是反射图像噪声引起 a 在0附近的符号反复变化,因此本文通过校正 a 的符号实现折叠相位跳

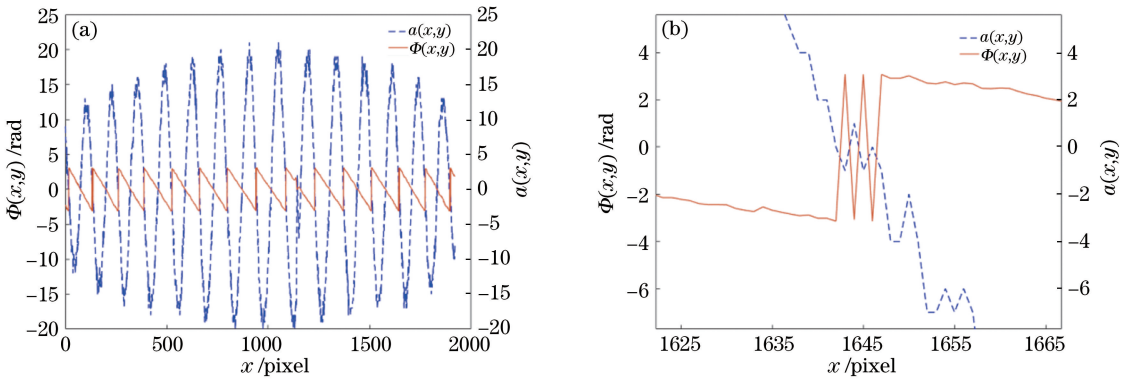


图4 折叠相位跳变误差。(a)某行存在跳变误差的折叠相位 $\Phi(x,y)$ 和对应的 a 值;(b)折叠相位跳变误差局部放大

Fig. 4 Wrapped phase jump error. (a) Wrapped phase $\Phi(x,y)$ and corresponding a of jump error in some row;

(b) local amplification of wrapped phase jump error

变误差校正。具体方法为判断 $a(x,y)$ 与 $a(x, y-1)$ 的符号是否一致:若一致,则说明不存在反复跳变现象;若不一致,存在反复跳变的可能性。为进一步确认反复跳变现象,判断 $a(x,y)$ 与 $a(x, y+n)$ (n 一般不超过 10) 的符号是否一致;若一

致,则确认不存在反复跳变现象;若不一致,则确认 $a(x,y)$ 的符号会引起相位反复跳变,此时将 $a(x,y)$ 的符号取反。图 5 为校正前后的折叠相位图,可以看出此方法能有效解决折叠相位在边界处反复跳变的问题。

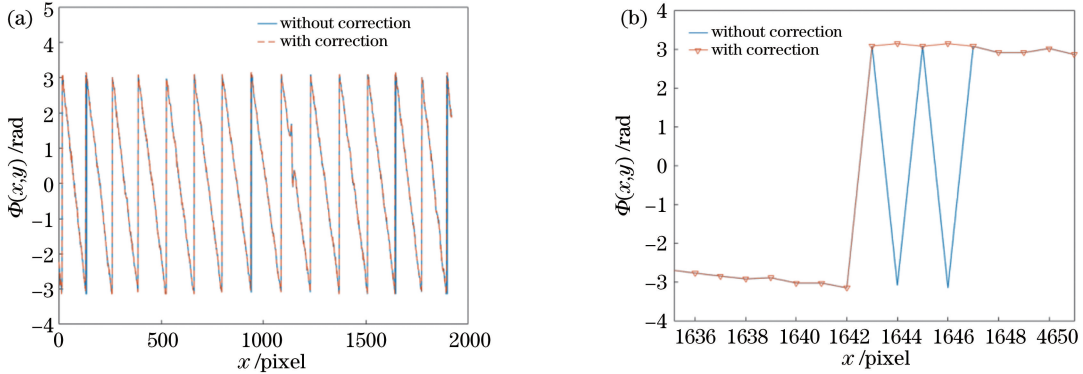


图5 折叠相位跳变误差校正。(a)校正前后折叠相位;(b)折叠相位校正效果局部放大

Fig. 5 Correction of wrapped phase jump error. (a) Wrapped phase with and without correction;

(b) local amplification of wrapped phase correction effect

3.2 折叠相位展开

由于折叠相位被周期性截断在 $[-\pi, \pi]$ 区间,无法直接利用折叠相位实现缺陷检测。为获取连续的相位,必须确定折叠相位的周期级数,通常用 k 表示^[19]。在折叠相位 Φ 的基础上加减 $2k\pi$ 即可得到连续的绝对相位 ϕ ,此过程称为折叠相位展开。为保证相位提取稳定性,减少相位展开所需图像的数目,本文采用格雷码编码的折叠相位展开方法,原因在于:首先,格雷码编码是一种时间序列相位展开方法,不会造成误差的累积;其次,相位展开所需要的格雷码图像数量不随相移步数增加而成倍增加,仅由相移条纹的周期数决定,可以在不损失相位提取精度的情况下减少相位展开所需图像数目,进而提高检测速度。

格雷码编码法通过多幅格雷码图像进行编码,编码值与折叠相位的周期级数 k 一一对应。与普通二进制编码类似, n 位格雷码最多可以编码 2^n 个码值。以 8 个周期折叠相位为例,8 个格雷码值对应 8 个周期级数。因此,LCD 需要显示 3 幅格雷码序列图像,如图 6(a)所示。相机采集的格雷码序列图像经过二值化处理后进行解码,得到周期级数 k ,如图 6(b)所示。

如图 7 所示,结合相移法求取的折叠相位 $\Phi(x,y)$ 和格雷码序列图像解码的周期级数 $k(x,y)$,可以求得连续的绝对相位,即

$$\phi(x,y) = \Phi(x,y) + 2k(x,y)\pi. \quad (6)$$

3.3 折叠相位周期级数校正

理想情况下,格雷码序列图像解码得到的周期

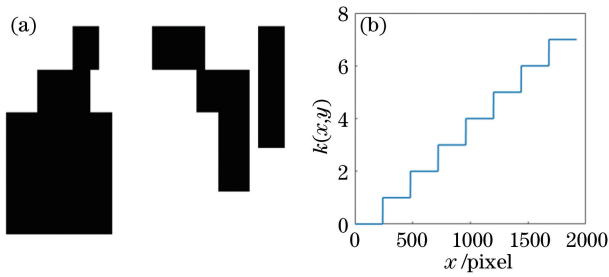


图6 解算周期级数 $k(x, y)$ 。(a)格雷码序列图像；
(b)周期级数 $k(x, y)$

Fig. 6 Calculation of period index $k(x, y)$. (a) Sequence image of Gray-code; (b) period index $k(x, y)$

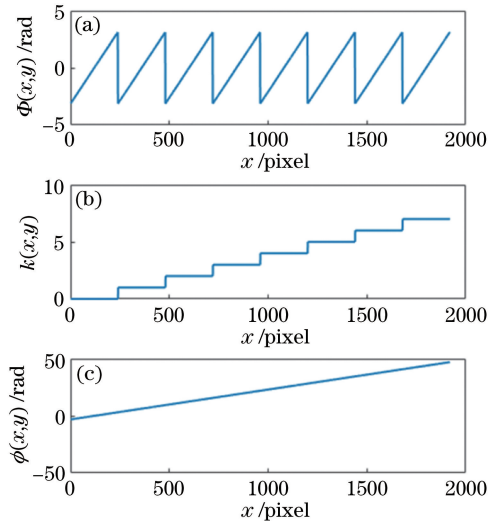


图7 折叠相位展开。(a)折叠相位 $\Phi(x, y)$ ；(b)折叠相位的周期级数 $k(x, y)$ ；(c)绝对相位 $\phi(x, y)$

Fig. 7 Unfolding of wrapped phase. (a) Wrapped phase $\Phi(x, y)$; (b) period index $k(x, y)$ of wrapped phase; (c) absolute phase $\phi(x, y)$

级数 k 的跳变与折叠相位 Φ 的跳变同时发生, 折叠相位展开得到的绝对相位单调连续, 判断绝对相位突变即可实现缺陷检测。然而, 在格雷码解码前的图像二值化处理环节中, 由于类镜面表面反射率不足、环境光干扰、镜头离焦等因素的影响, 图像噪声显著。实际应用中二值化分割难以做到完全准确, 导致格雷码易出现解码错误, 周期级数 k 的跳变超前或者滞后于折叠相位 Φ 的跳变, 导致 $\pm 2\pi$ 的相位误差, 如图 8 所示, 该现象称为周期错位^[19]。对高斯卷积滤波算法而言, 周期错位现象引起的相位突变与工件表面缺陷引起的相位突变并无本质区别, 均表现为高频信号, 滤波算法无法进行区分。因此, 周期错位问题会对缺陷检测造成严重干扰, 导致缺陷漏检和误检。如何解决周期错位问题是格雷码编码相位展开方法要考虑的关键问题。

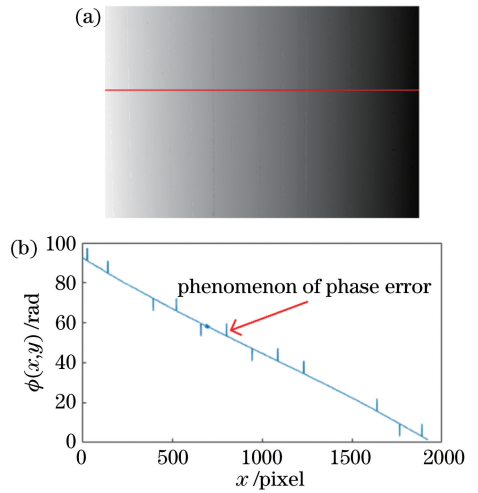


图8 相位展开误差。(a)绝对相位强度图；
(b)图8(a)中划线部分绝对相位

Fig. 8 Error in phase unwrapping. (a) Diagram of absolute phase intensity; (b) absolute phase of marked line in Fig. 8(a)

目前常用的解决周期错位的方法包括互补格雷码、正反格雷码等^[19-20], 需要增加额外的格雷码图像, 本文提出一种新的周期级数校正的方法, 该方法能够在不增加额外编码图像的情况下有效解决周期错位问题。折叠相位 Φ 的一个周期通常包含几十至数百个像素, 但格雷码解码错误只会发生在折叠相位 Φ 跳变的若干像素处, 其余部分格雷码解码得到的周期级数 k 都是正确的。考虑到上述特点, 提出一种周期级数 k 校正方法: 将折叠相位一个周期内所有像素对应的格雷码解码值 k 的中位数作为该周期内折叠相位的周期级数进行相位展开。下面以反射图像上某一行的折叠相位展开过程为例对校正方法进行具体阐述。

由于折叠相位被周期性截断在 $[-\pi, \pi]$ 区间, 可以通过相邻像素点的折叠相位从 $-\pi$ 跳变到 π 来判定一个周期开始和结束的位置。设定折叠相位跳变的阈值为 Φ_{th} (通常取 π), 若 $|\Phi(x+1, y) - \Phi(x, y)| > \Phi_{th}$, 则判定折叠相位发生跳变, 记相邻两次跳变的位置分别为 x_1 和 x_2 , 如图 9 所示。 x_1 到 x_2 即为折叠相位的一个周期, 为了得到正确的周期级数, 计算 x_1 和 x_2 之间所有周期级数 $k(x, y)$ 的中位数, 即

$$K = \text{median}[k(x_1, y), k(x_1 + 1, y), \dots, k(x_2, y)]. \quad (7)$$

将校正后得到的 K 代入 (6) 式即可得到该周期正确的绝对相位, 即

$$\phi(x, y) = \Phi(x, y) + 2K\pi, \quad x = x_1, x_1 + 1, \dots, x_2. \quad (8)$$

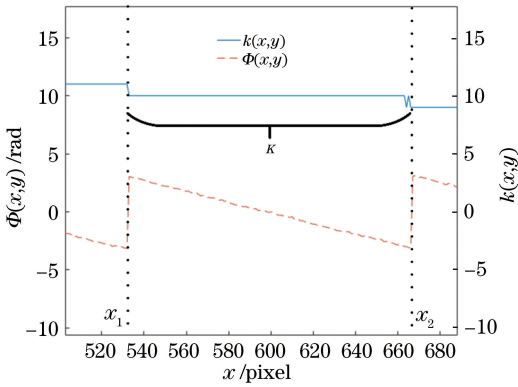


图9 周期级数 $k(x, y)$ 的校正

Fig. 9 Correction of period index $k(x, y)$

4 实验

为验证本文的方法,搭建实验系统对图 10 所示的飞机机身喷涂样件表面进行缺陷检测。样件表面反射特性近似符合镜面反射,其表面存在人眼难以观察到的颗粒、针孔和气泡等缺陷。

实验系统装置如图 11 所示,包括被测样件、相机(分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$, 像素尺寸为

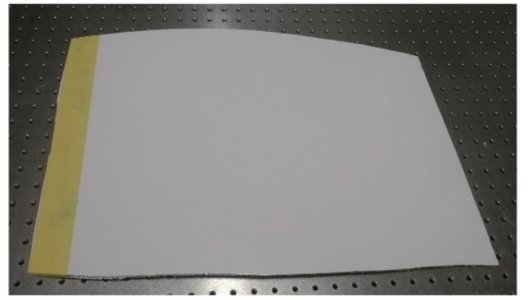


图 10 机身喷涂样件

Fig. 10 Painted fuselage sample

$5.86 \mu\text{m} \times 5.86 \mu\text{m}$, 镜头焦距为 16 mm) 和 LCD 显示屏(分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$, 像素尺寸为 $0.2745 \text{ mm} \times 0.2745 \text{ mm}$)。实验采用四步相移提取折叠相位,显示屏投射 4 幅相移序列图像,设置相移条纹周期为 120 pixel ,共 16 个周期。采用格雷码编码的相位展开方法,显示屏投射 4 幅格雷码序列图像,编码值为 $0 \sim 15$,每个码值的长度为 120 pixel 。控制相机同步采集经被测物反射的相移和格雷码序列图像的虚像。

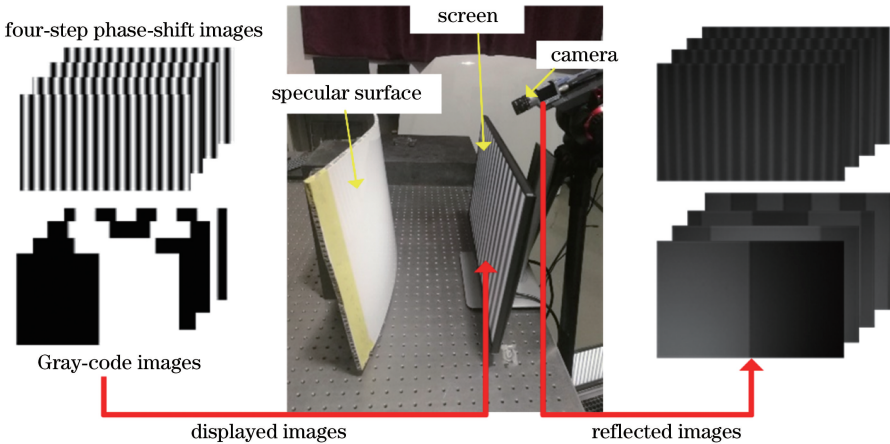


图 11 实验系统装置图

Fig. 11 Diagram of experimental system

为了对比周期级数校正前后的缺陷检测效果,对反射图像进行两次相位提取:一组不进行周期级数校正,提取到的绝对相位如图 12(a)、(c)所示;另一组采用本文方法进行周期级数校正,提取的绝对相位如图 12(b)、(d)所示。设置卷积核尺寸为 $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$,核函数标准差为 $\sigma = 7$,对两组绝对相位进行高斯卷积滤波,周期级数校正前后的缺陷检测结果分别如图 12(e)和 12(f)所示。

周期级数校正前的实验结果表明:周期错位导致的相位突变与缺陷引起的相位突变同时存在,如图 12(c)所示;两种相位突变都表现为高频信号,通

滤波算法难以区分,导致大量的缺陷误检,如图 12(e)所示,且难以设置合理的阈值将真实的缺陷信号分割出来,导致缺陷漏检。折叠相位校正后的实验结果表明:本文周期级数校正方法可以有效解决周期错位问题,绝对相位突变全部由缺陷引起,如图 12(d)所示;对绝对相位进行高斯卷积滤波即可实现类镜面物体表面微小尺寸缺陷的检测,如图 12(f)所示,避免误检与漏检问题。

绝对相位经过滤波、二值化、连通域提取后得到缺陷位置和轮廓。将求解的缺陷图像坐标和轮廓绘制到折叠相位图像上,结果如图 13 所示。实验结果

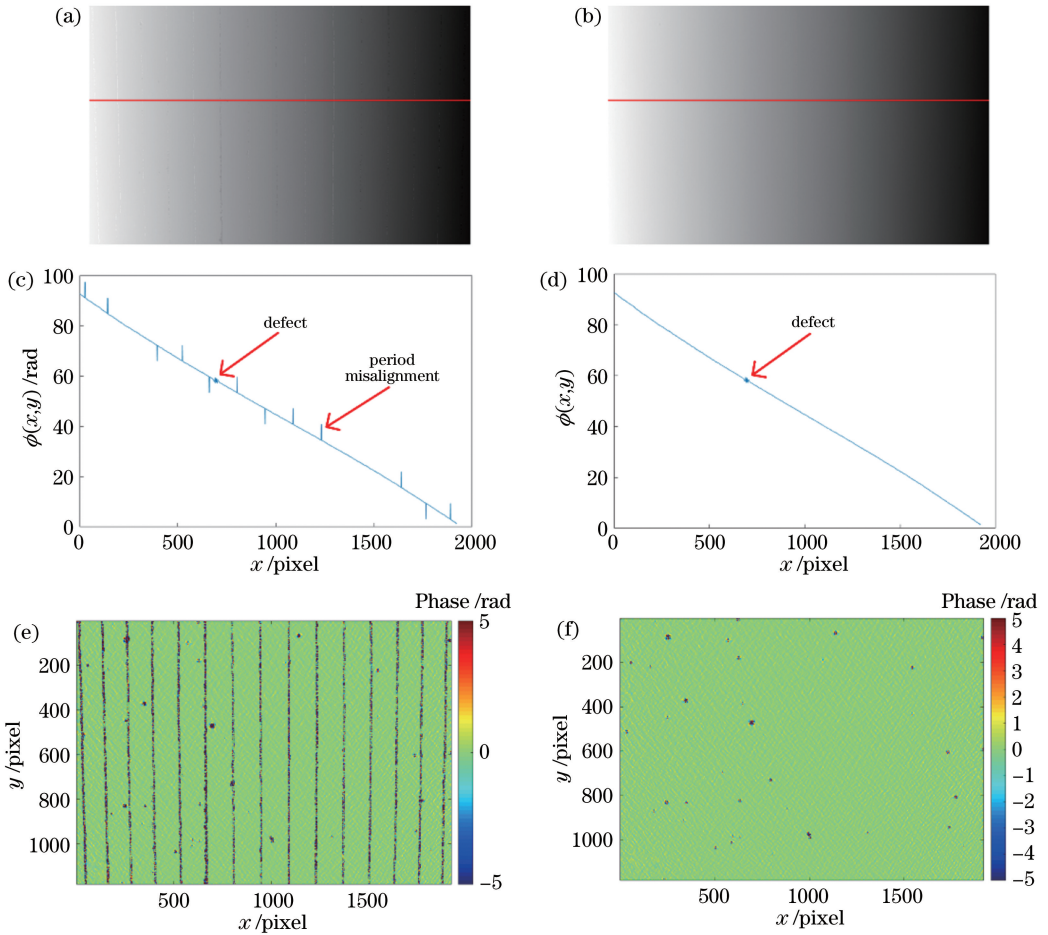


图 12 周期级数未校正和校正后的缺陷检测结果。(a)(b)绝对相位强度图;(c)图 12(a)和(d)图 12(b)中划线部分绝对相位;(e)图 12(a)和(f)图 12(b)的缺陷检测结果

Fig. 12 Defect detection results without and with period index correction. (a) (b) Intensity images of absolute phase; absolute phases of marked line in (c) Fig. 12(a) and (d) Fig. 12(b); defect detection results in (e) Fig. 12(a) and (f) Fig. 12 (b)

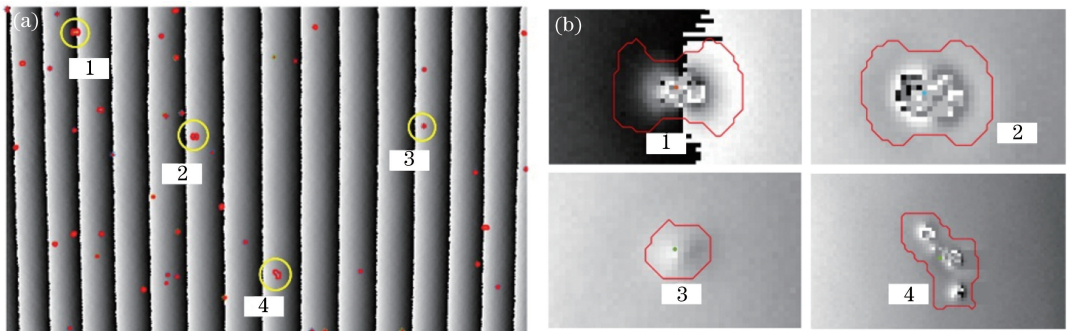


图 13 缺陷位置和轮廓。(a)折叠相位上的缺陷位置和轮廓;(b)缺陷局部放大

Fig. 13 Defect locations and contours. (a) Defect locations and contours on wrapped phase image; (b) local amplification of defects

表明,解算出的缺陷位置和轮廓正确。

机身样件表面共检测到 48 处缺陷,缺陷在图像上的最小尺寸约为 3 个像素,根据相机分辨率和视场推算单个像素对应的空间物理尺寸约为

0.12 mm,故本实验系统检测到的最小缺陷尺寸约为 0.36 mm。通过分析可知,PMD 的缺陷分辨力与系统相机分辨率以及视场大小相关。通过采用更高分辨率的相机,减小检测视场,可以实现更小尺寸缺

陷的检测,提高检测分辨力。实际应用中,需要根据待检测对象的尺寸及其检测分辨力需求,选取合适的相机和镜头设计检测系统,以满足检测需求。

为验证本文方法对不同类型缺陷的适用性,对

喷涂表面纤维毛、流挂、漆渣、漆前划伤、黑灰、钣金坑、溶剂坑、钣金包等多种类型缺陷进行检测,结果如图 14 所示。结果表明,本文方法适用于多种类型类镜面表面缺陷的检测。

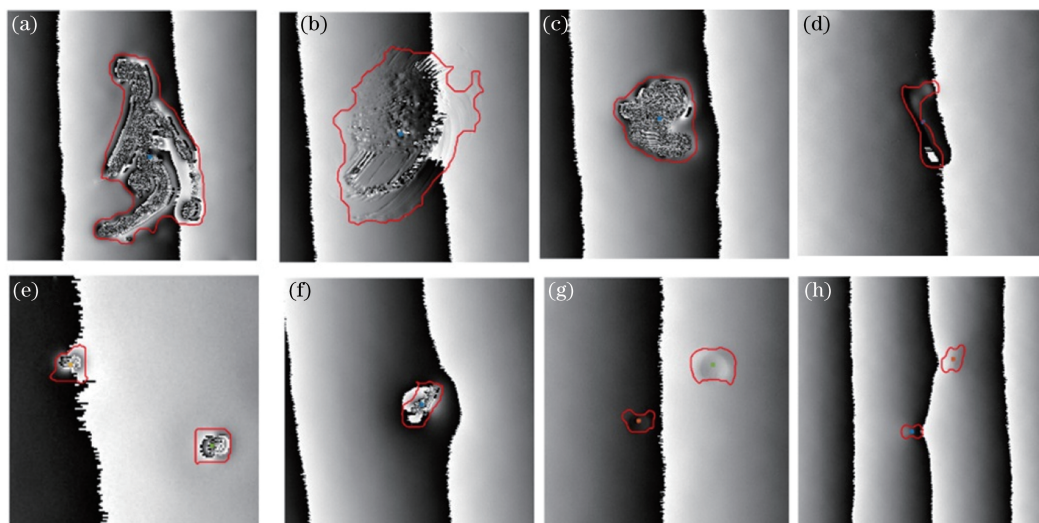


图 14 喷涂表面缺陷位置和轮廓。(a)纤维毛;(b)流挂;(c)漆渣;(d)漆前划伤;(e)黑灰;(f)钣金坑;(g)溶剂坑;(h)钣金包
Fig. 14 Defect locations and contours on painted surface. (a) Hairy fiber; (b) sagging; (c) paint slag; (d) scratch before paint; (e) dirt; (f) dent; (g) craters; (h) bump

5 结 论

研究了利用 PMD 进行类镜面物体表面缺陷检测的方法。从 PMD 类镜面缺陷检测的原理出发,深入研究反射图像相位提取方法。采用四步相移结合格雷码编码提取反射图像的相位,保证了相位提取的精度和效率。提出一种折叠相位周期级数校正的方法,该方法能有效解决周期错位问题,避免了缺陷漏检和误检。通过喷涂表面缺陷检测实验,证明了利用 PMD 进行类镜面物体表面缺陷检测方法的可行性和有效性。

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] Zhang K. Study on fast detection method of defects on automobile painting surface [D]. Shanghai: Donghua University, 2015: 1-13.
张康. 汽车涂装表面瑕疵快速检测方法研究[D]. 上海: 东华大学, 2015: 1-13.
- [3] 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.

- [4] Yue H M, Li R, Pan Z P, et al. High quality fringe patterns captured from phase measuring deflectometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1112004.
岳慧敏, 李绒, 潘志鹏, 等. 相位测量偏折术中高质量条纹的获取[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1112004.
- [5] Deng X T, Gao N, Zhang Z H. Calibration of system parameters based on direct phase measuring deflectometry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 061204.
邓小婷, 高楠, 张宗华. 基于直接相位测量术的系统参数标定方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 061204.
- [6] Shao S C, 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): 071203.
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): 071203.
- [7] Wang Y M, Zhang Z H, Gao N. Review on three-dimensional surface measurements of specular objects based on full-field fringe reflection [J]. *Optics and*

- Precision Engineering, 2018, 26(5): 1014-1027.
- 王月敏, 张宗华, 高楠. 基于全场条纹反射的镜面物体三维面形测量综述[J]. 光学精密工程, 2018, 26(5): 1014-1027.
- [8] Bone D J, Bachor H A, Sandeman R J. Fringe-pattern analysis using a 2-D Fourier transform [J]. Applied Optics, 1986, 25(10): 1653-1660.
- [9] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 35(5): 263-284.
- [10] Halioua M, Liu H C. Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 1989, 11(3): 185-215.
- [11] Schmit J, Creath K. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry [J]. Applied Optics, 1995, 34(19): 3610-3619.
- [12] Yi J Y. Study on mobile phone shell inside and outside surface quality inspection based on fringe projection and fringe reflection technologies [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- 易京亚. 基于条纹投影和条纹反射的手机壳内外表面质量检测方法[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [13] Wu Y X. Study on specular surface quality inspection based on optical three dimensional metrology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- 吴雨祥. 基于光学三维成像的镜面物体表面质量检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [14] Li M Y. Study on the solar cell wafer surface quality inspection based on the fringe reflection technique [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- 李明阳. 基于条纹反射的太阳能电池硅晶片表面质量检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [15] Su X Y, Chen W J. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 42(3): 245-261.
- [16] Wang X, Jia S H, Chen G D. A review of the study on phase unwrapping [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(S2): 665-668.
- 王新, 贾书海, 陈光德. 相位去包裹技术进展[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(S2): 665-668.
- [17] Huntley M, Saldner H O. Shape measurement by temporal phase unwrapping: comparison of unwrapping algorithms [J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(9): 986-992.
- [18] Saldner H O, Huntley J M. Temporal phase unwrapping: application to surface profiling of discontinuous objects [J]. Applied Optics, 1997, 36(13): 2770-2775.
- [19] Lin H, Ma Z F, Yao C H, et al. 3D measurement technology based on binocular vision using a combination of gray code and phase-shift structured light [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1): 24-28.
- 林焕, 马志峰, 姚春海, 等. 基于格雷码-相移的双目三维测量方法研究[J]. 电子学报, 2013, 41(1): 24-28.
- [20] Sun X Z, Su X Y, Zou X P. Phase-unwrapping based on complementary structured light binary code [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(10): 1947-1951.
- 孙学真, 苏显渝, 邹小平. 基于互补型光栅编码的相位展开[J]. 光学学报, 2008, 28(10): 1947-1951.