

基于相位偏折术和图像处理的 表面缺陷检测

成先明, 王婷婷, 史柏迪, 李奕文

(河海大学 机电工程学院, 常州 213022)

摘要: 针对工业产品中类镜面透明物体表面缺陷检测的问题, 研究了基于相位偏折术和图像处理结合的检测方法; 采用格雷码和四步相移法解算反射条纹图的绝对相位, 将绝对相位转换为梯度后可可视化即可得到缺陷图; 分析缺陷图中后表面干扰产生的原因, 提出采用图像处理的方法消除后表面反射干扰; 该方法能保留前表面缺陷, 过滤后表面干扰; 实验结果表明, 文章所提方法能够实现对类镜面透明物体表面缺陷检测, 效果较传统明场检测有较大提升。

关键词: 缺陷检测; 相位偏折; 四步相移; 图像处理; 反射干扰;

Surface Defect Detection Based on Phase Deflection and Image Processing

Cheng Xianming, Wang Tingting, Shi Baidi, Li Yiwen

(School of Mechanical Engineering, HoHai Univ., Changzhou 213022, China)

Abstract: Aiming at the problem of surface defect detection of mirror-like transparent objects in industrial products, a detection method based on the combination of phase deflection and image processing was studied. The absolute phase of the reflected fringe pattern is solved by gray code and four-step phase shift method. The defect pattern can be visualized by converting the absolute phase to gradient. After analyzing the cause of the interference of the rear surface in the defect diagram, a method of image processing is proposed to eliminate the interference of the rear surface reflection. The method can retain the defect of the front surface and filter the interference of the rear surface. The experimental results show that the method proposed in this paper can detect the surface defects of mirror-like transparent objects, and the effect is much better than that of traditional open field detection.

Keywords: defect detection; phase deflection; four-step phase shift; image processing; reflection interference

0 引言

在现代工业快速发展过程中, 对于类镜面的透明物体, 如手机玻璃盖板、钢化膜、曲面玻璃等, 检测和测量精度已经成为制约制造技术发展的主要因素之一^[1]。目前, 对于这类类镜面物体表面质量检测方法主要分为两类: 接触式和非接触式^[2]。接触式常用的有接触式三角坐标仪, 但三角坐标仪测量时间相当长^[3] (通常数小时以上), 不能满足工业快速检测要求, 而且还可能破坏测量物体表面。非接触式有干涉法和相位偏折法 (PMD)。干涉法测量精度高, 但设备昂贵, 对环境光亮度变化敏感, 不能用于自由曲面。PMD 有检测速度快、精度高, 设备成本低等优点^[2,4-5], 但是相位偏折术也存在一些局限性, 比如在检测透明物体时会存在后表面反射干扰。

相位偏折术关键算法在于解相位和拆相位。目前, 解相位计算方法主要有相移法、傅里叶变换轮廓术、小波变

换轮廓术^[6]等。相移法需要采集多张图像进行计算, 可以获得完整的相位信息, 对于非线性误差抑制效果好^[7]; 傅里叶变换轮廓术和小波变化轮廓术都是单帧测量, 对于随机噪声抑制效果较好, 但是傅里叶变换轮廓术在积分重建后会丢失部分细节; 小波变换轮廓术虽然细节保存较好, 但是处理速度慢。本文主要目的在于检测缺陷, 需要完整的相位信息, 所以选用相移法。

拆相位通常分为空间相位展开法和时域相位展开法^[8]。空间相位展开法与积分路径选择有关, 如果在积分路径上存在干扰, 会影响到下一像素点及以后像素点, 最终解得的全局绝对相位会存在“拉线”现象, 这是需要避免的。针对这一问题, 国内外研究学者提出了一些解决方案, 如枝切法^[9]、基于统计滤波的解包法^[10]、中心摄动法^[11]等。这些方法主要目的都是在于主动选择积分路径, 避开干扰点, 实际应用场景会受到限制。时域相位展开法利用辅助

收稿日期: 2020-10-23; 修回日期: 2020-11-09。

基金项目: 国家自然科学基金(61403122); 中央高校科研项目(B200202220)。

作者简介: 成先明(1997-), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要从事粗糙度预测与缺陷检测方向的研究。

通讯作者: 王婷婷(1983-), 女, 江苏常州人, 博士, 副教授, 主要从事机器视觉伺服控制方向的研究。

引用格式: 成先明, 王婷婷, 史柏迪, 等. 基于相位偏折术和图像处理的表面缺陷检测[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 64-69.

条纹图得到折叠相位参考相位, 以实现相位展开。常见的方法有线性递增法、指数递增法、三频外差相位展开法^[12], 利用时域展开法可以有效避免干扰, 本文将采用时域展开法避开干扰。

传统检测类镜面透明物体主要采用的是明场、暗场的方法^[13], 这种方法成像质量较差, 且很难从获取的图像中分离出脏污和损伤性缺陷。

本文提出用相位偏折术方法检测类镜面透明物体表面缺陷。针对后表面反射干扰提出用图像处理的方法过滤干扰。由于前后表面反射率不同, 可以用动态阈值分割结合形态学处理过滤掉后表面缺陷, 仅保留前表面实际缺陷。整个检测过程相对传统 PMD 无需对硬件结构作出调整, 只需要增加图像处理算法, 即可过滤后表面反射干扰。本文所提方法经过实验验证, 可以打破 PMD 在检测透明物体时的局限性, 提高了 PMD 的应用范围和检测准确率。

1 PMD 缺陷检测基本原理

PMD 缺陷检测系统主要由显示器、反光物体 (被测物体表面) 和相机组成, 如图 1 所示。系统采用镜面反射的方法, 显示器投影结构光, 相机采集经物体表面调制过的条纹光图像, 调制过的条纹光图像包含了反射表面的三维信息, 通过对镜像图像进行相位提取、解相位、拆相位可以得出反射表面的梯度信息, 缺陷处相位变化剧烈, 可以根据梯度变化大小来确定是否为缺陷^[14]。

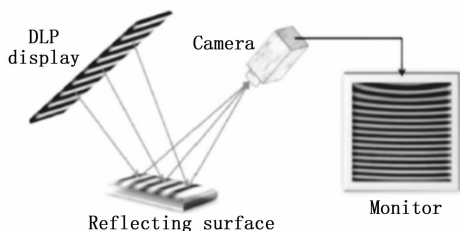


图 1 PMD 缺陷检测系统

如图 2 (a) 所示, 当不存在后表面反射时, 显示器上某一点 S 被点亮, 发出一条光线, 经过上表面的 O 点反射到相机上的 A 点, 其中 θ_1 和 θ_2 是入射光线和反射光线与法线 Z 方向的夹角。通过反射定律可以逆向追踪 CCD 每个像素点所对应的显示器上的像素点的坐标。传统 PMD 通常采用相移的正弦条纹光作为结构光, CCD 上的像素点 A 可以根据相移算法算出光源点 S 的位置。当存在后表面反射时, 前后表面反射的光线会产生非相干叠加, 这样提取出来的条纹相位就是一个叠加的条纹相位。

如图 2 (b) 所示, 如果检测表面不存在缺陷, 此时光线全部平行射入、平行射出, CCD 接收到的光强信号可以表示为:

$$I_{\text{accept}} = I_{\text{front}} + I_{\text{rear}}(k) \quad (1)$$

式中, I_{accept} 表示 CCD 接收到的总光强, I_{front} 表示前表面反射光强, I_{rear} 表示后表面反射光强, k 表示相移步数, 所以每一点的亮度都是经过叠加, 那么解算出来的绝对相位信

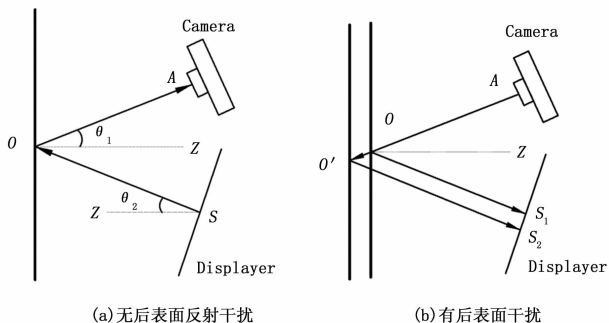


图 2 PMD 测试系统示意图

息不会发生突变。一旦出现缺陷时, 前表面的缺陷会被映射到后表面, 形成重影, 此时解算出来的相位信息会在前表面处产生一次突变, 在后表面处产生一次突变, 最终会表现为两个缺陷。因此, 解算反射图像的绝对相位是获得缺陷图像的重要前提, 而解算绝对相位又分为解相位和拆相位两个步骤。

1.1 解相位

相移法需要显示器显示多幅不同初始相位的图像并由相机获得, 当采用正弦条纹时, 假设采用 N 步相移法, 则相机接收到的光强表达式为:

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos(\varphi + 2\pi n/N) \quad (2)$$

式中, $I_n(x, y)$ 为相移 n 步时图像光强, 是由相机获得的已知量, $a(x, y)$ 表示背景光强分布, $b(x, y)$ 表示调制度分布^[1], 相位 φ 是要求解的未知量, 所以要求出 φ 至少需要三步相移, 即 N 最小为 3。用最小二乘法可以解出 (2) 式中的 φ , 结果为:

$$\varphi(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin 2\pi n/N}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos 2\pi n/N} \quad (3)$$

由于反正切函数值域在 $[-\pi, \pi]$, 所以 $\varphi(x, y)$ 是绝对相位值被折叠在 $[-\pi, \pi]$ 区间内的包裹相位, 如图 3 (a) 所示。折叠相位图中存在多处灰度截断, 截断处与被测物和缺陷混叠, 无法识别缺陷, 所以要对获得的包裹相位进行展开, 这一过程称为相位展开。

1.2 相位展开

为了获得连续的绝对相位值, 必须确定相位截断处的周期级数, 通常用 k 表示。在折叠相位 $\varphi(x, y)$ 的基础上加上所在的周期级数 $2k(x, y)\pi$ 即可得到连续的实际相位值。

本文采用时域相位展开法, 辅助条纹图选择格雷码图。格雷码相位展开按时间序列展开相位, 不会造成误差累计, 而且结合相移码后可以减少格雷码的编码位数, 加快解码速度。格雷码条纹将图像中的像素编码, 用于确定相位级数, 相移正弦条纹图用于确定包裹相位, 如图 3 (b) 所示。

相移周期不能小于格雷码周期的 N 倍, N 为相移步数, 这样才能对所有像素点唯一编码。将格雷码确定的相位级

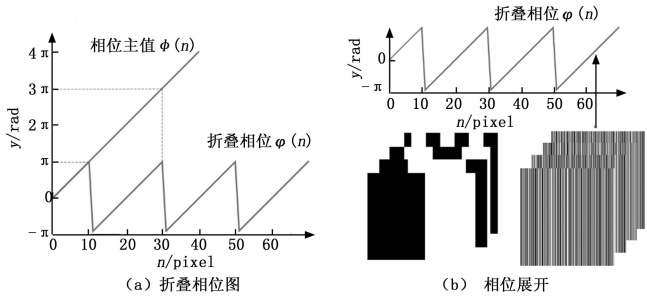


图 3 相位解码

数 $2k(x, y)\pi$ 和相移法确定的包裹相位 $\varphi(x, y)$ 结合, 即可求得连续的绝对相位:

$$\varphi(x, y) = \varphi(x, y) + 2k(x, y)\pi \quad (4)$$

根据相位与梯度的关系, 可以得到被测物体表面 x 和 y 方向的梯度分布:

$$g_x = \tan\theta_x = \frac{\Delta\varphi_x P_x}{4\pi L_x} \quad (5)$$

$$g_y = \tan\theta_y = \frac{\Delta\varphi_y P_y}{4\pi L_y} \quad (6)$$

式中, g_x 、 g_y 表示 x 和 y 方向的梯度, θ_x 和 θ_y 分别表示被测物表面两个方向的偏转角, $\Delta\theta_x$ 和 $\Delta\theta_y$ 表示两个方向绝对相位与参考相位间的相位差, P_x 和 P_y 表示两个方向的条纹周期, L_x 和 L_y 表示被测物与显示屏间的高度。

解得的绝对相位与被测物体表面梯度成正相关, 缺陷处梯度会产生突变, 因此梯度可以用来表征缺陷^[15]。由于被测物表面近似平面, 所以解得的梯度值大多近似为 0, 如图 4 所示, 缺陷处梯度会产生突变, 此时梯度会大于 1, 局部缺陷较大处甚至会超过 10。

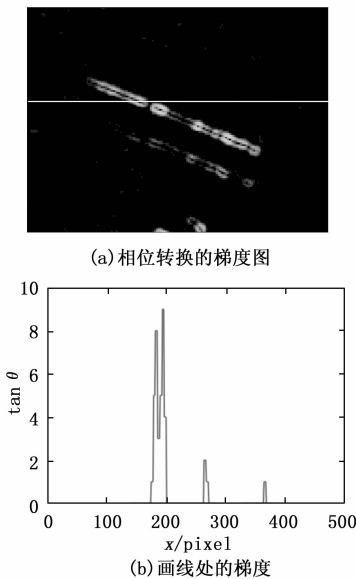


图 4 梯度图

由于人眼能够识别的灰度值范围在 0~255, 而当灰度值小于 10 的时候很难分辨出来, 所以不能对梯度图直接进

行图像处理, 需要先将梯度图拉伸至 0~255 范围内, 如图 5 表示从 x 、 y 方向相位图转换成缺陷图的处理过程。

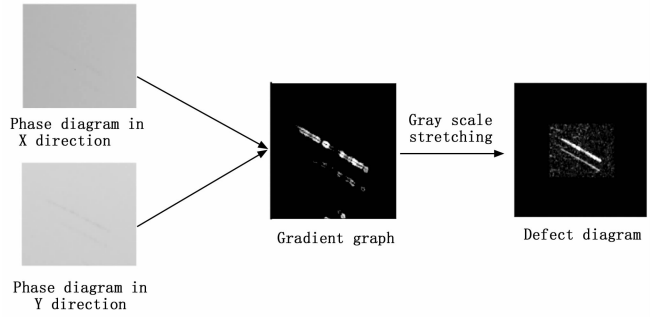


图 5 从相位图到缺陷图的变换过程

2 图像处理算法

从梯度转换的缺陷图中, 可以明显看到前表面的划痕在后表面也有相同形状的成像。针对这一现象本文提出采用图像处理的方法消除后表面成像干扰, 主要处理方法包括: 图像重建、形态学处理、图像分割等。首先用高斯滤波对图像滤波, 降低噪声干扰, 然后用动态阈值分割获取前表面二值化图像区域, 再对分割区域进行膨胀、骨架提取等操作提取出前表面缺陷, 然后求取缺陷处最小外接矩形对图像进行重建, 重建过程中仅保留缺陷处像素灰度值, 其余部分全部设为 0, 这样就能得到仅含前表面缺陷的图像, 再对无后表面缺陷的图像用全局阈值分割和闭运算提取出缺陷区域, 最后在缺陷处用最小外接矩框出, 以便后续根据缺陷特征对缺陷分类。

2.1 图像平滑处理

由于电子元器件内部电子的随机运动或者或者外部的天然电磁都会对图像采集造成干扰^[16], 其结果会造成成像质量下降, 影响后边的缺陷提取。所以需要图像进行滤波处理。常见的滤波方法有: 中值滤波、均值滤波、高斯滤波等。中值滤波和均值滤波对图像平滑效果较好, 但是对缺陷细节丢失比较明显, 而且图像模糊, 从图 6 的三维灰度图中可以看出高斯滤波在平滑图像的同时能够较好的保留缺陷的细节信息。

本文采用高斯滤波对图像进行平滑处理, 过滤噪声。连续二维高斯函数如下:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

式中, $G(x, y)$ 表示像素点 (x, y) 经过高斯滤波后的结果, σ 为标准差。

离散化后得:

$$f(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(i-k-1)^2 + (j-k-1)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

通过式 (8) 可以得到高斯滤波模板为: $(2k+1) \times (2k+1)$ 。

2.2 图像分割

缺陷提取中最关键的一步就是图像分割, 只有准确的

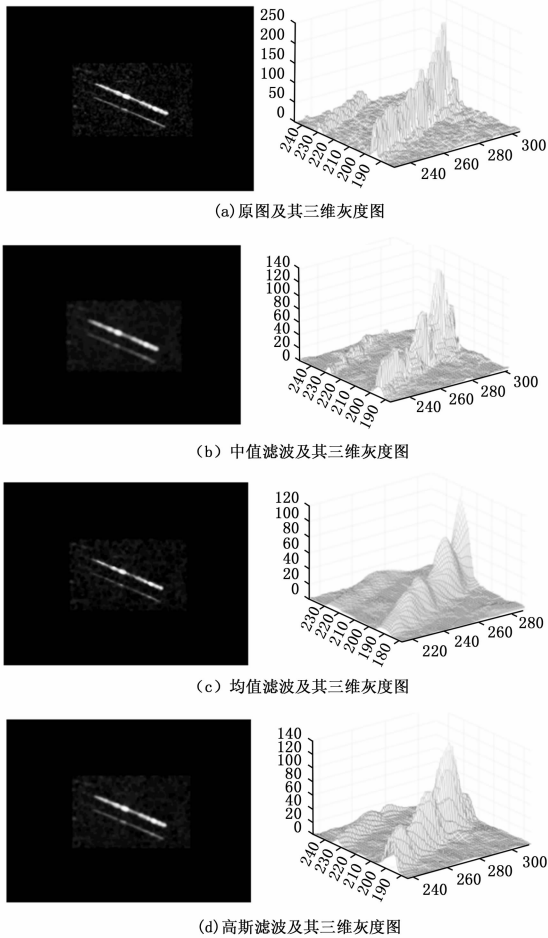


图 6 中值滤波、均值滤波和高斯滤波效果对比

分割出前表面缺陷区域才能过滤后表面缺陷, 从而消除后表面反射干扰。图像分割算法有多种, 目前应用最广泛的主要有阈值分割法、全局阈值分割法、Otsu 法、动态阈值分割法等。本文先采用动态阈值分割的方法粗略的分割出前表面缺陷, 消除后表面缺陷后再用阈值分割法分割出缺陷。

阈值分割算法是最简单的图像分割技术, 主要适用于前后背景差异较大, 待分割区域比较明显的情况。阈值分割的关键就在于选取合适的阈值 T 区分前景和后景。其表达式如下:

$$g(x, y) = \begin{cases} 0, & 0 \leq f(x, y) \leq T \\ 1, & T \leq f(x, y) \leq 255 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $f(x, y)$ 表示输入图像像素点的灰度值, T 表示用于分割前景和后景的阈值, $g(x, y)$ 表示输出图像。

动态阈值分割法就是利用像素点的灰度值与其所在背景周围的平均阈值比较, 大于 (或小于) 某个值时, 设置为目标物体, 其分割原理如下^[17]:

$$\begin{cases} B(x, y) = [f(x, y) - g(x, y)] > T \\ B(x, y) = [g(x, y) - f(x, y)] > T \end{cases} \quad (10)$$

式中, $f(x, y)$ 为输入的原始图像, $g(x, y)$ 为平滑后

的背景图像, T 为分割的阈值, T 的实际值为指定阈值和改点平均灰度之和, $B(x, y)$ 为输出的二值化图像。动态阈值分割适用于背景复杂或要区分的阈值差异不明显的情况, 而前后表面缺陷阈值差异不大, 甚至还有重叠。由于动态阈值分割法充分利用了像素点周围的灰度值, 所以分割时阈值一直是动态变化的, 可以区分出前后表面缺陷如图 7 (a) 所示。

2.3 形态学处理

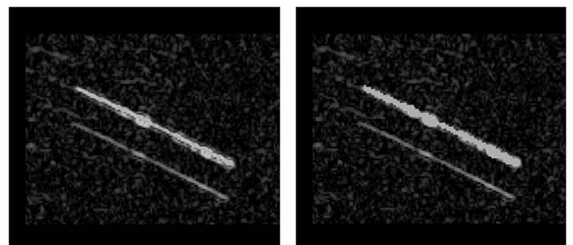
通过图像分割可以得到前表面缺陷区域的粗提取, 从图 7 (a) 中可以看出提取出的区域不能覆盖所有缺陷区域, 而且还存在断续现象, 所以需要对其分割的区域进行形态学处理, 以得到完整的缺陷区域。本文用到的形态学方法主要有膨胀、闭运算、骨架提取等。

2.3.1 膨胀和腐蚀

膨胀是一种集合运算, 如果定义 A 和 B 两个集合, 则以 B 为结构元对 A 集合进行膨胀定义为:

$$A \oplus B = \{z \mid (B)_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (11)$$

式中, B 为结构元素, A 为待膨胀区域, z 为膨胀操作后的结果。膨胀是一种“粗化”操作, 可以将指定区域边缘处拓宽, 拓展的宽度由所用的结构元大小控制。如图 7 (b) 为分割的缺陷区域经过膨胀操作的结果。



(a) 图像分割

(b) 膨胀处理

图 7 图像分割后膨胀处理

腐蚀与膨胀相反, 是一种“细化”操作, 如果定义 A 和 B 两个集合, 则以 B 为结构元对 A 集合进行腐蚀定义为:

$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \subseteq A\} \quad (12)$$

式中, B 为结构元素, A 为待腐蚀区域, z 为腐蚀操作后的结果。

2.3.2 闭运算

闭运算操作是先对 A 区域膨胀, 然后再用同样的结构元进行腐蚀操作。使用结构元 B 对 A 进行闭运算定义为^[18]:

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (13)$$

闭运算可以连接区域中不连续的区域, 包括区域内的孔洞和细小的鸿沟, 而目标对象总的形状和位置不发生改变^[19]。如图 8 (a) 所示, 通过闭运算操作可以将断续区域连接成一个区域。这样方便后续对缺陷区域进行骨架提取, 保证提取出完整的缺陷区域。

2.3.3 骨架提取

膨胀可以连通断续的区域, 但是不能表征缺陷的形状。

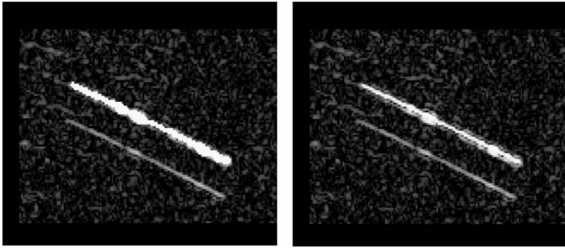
为了表征缺陷的形状可以用形态学中的骨架提取操作，区域 A 的骨架可以用腐蚀来表达^[20]，即：

$$S(A) = \bigcup_{k=0}^k S_k(A) \tag{14}$$

其中：

$$S_k(A) = (A \ominus k B) - (A \ominus (k+1) B) \tag{15}$$

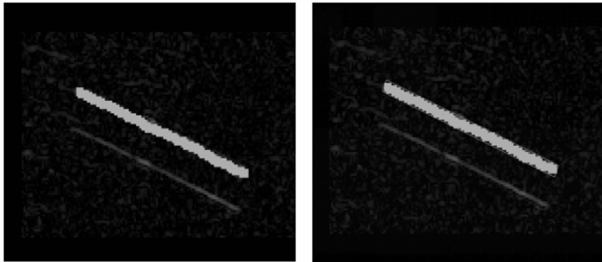
式中，B 是进行操作的结构元，A (A ⊖ k B) 表示对 A 连续 k 次腐蚀至被腐蚀为空集前停止。经过骨架提取操作后的区域如图 8 (b) 所示。从图中可以清楚地看到缺陷区域的形状和延伸方向。而且骨架轮廓正好位于缺陷区域的中心。



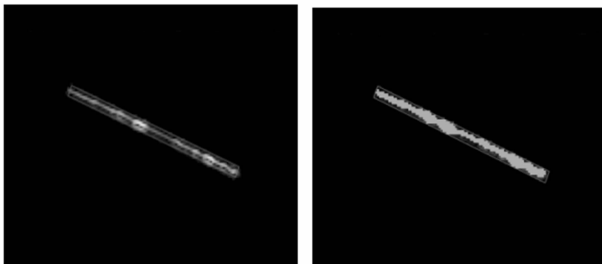
(a) 闭运算结果 (b) 骨架提取

图 8 闭运算和骨架提取

如图 9 所示，提取出骨架后将骨架膨胀至正好可以完整覆盖缺陷区域的最小范围，然后绘制缺陷区域最小外接矩形。此时矩形框内为前表面缺陷，矩形框外为需要消除的干扰部分。所以直接对图像重建，仅保留矩形框内灰度值，其余部分全部以 0 填充，这样就可以消除后表面缺陷成像，得到仅有前表面缺陷的图像。



(a) 膨胀至覆盖缺陷 (b) 绘制缺陷处最小外接矩



(c) 重建缺陷图像 (d) 提取真实缺陷

图 9 从骨架膨胀到重建图像、提取缺陷过程

骨架提取后至消除后表面缺陷的过程如图 9 所示。由于消除后表面缺陷的图像中缺陷与背景差异较大，待分割区域明显，所以采用最简单、高效的阈值分割法提取缺陷，

然后绘制最小矩形框，以便后续对缺陷特征数据分析。

3 实验结果与分析

为验证本文所提的方法，搭建检测系统如图 10 所示，对手机玻璃盖板进行缺陷检测。实验系统包括被测物，相机（分辨率 1 280 * 960，像素尺寸 3.75 μm * 3.75 μm），显示器（分辨率 1 920 * 1 080，像素尺寸 0.13 μm * 0.13 μm）。

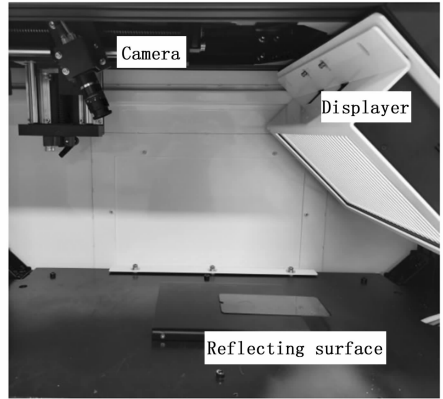


图 10 实验系统装置图

检测时，先将被测物置于载物台。然后设置光源（即显示器）为白屏显示，调节相机光圈，使成像近乎过曝（这样可以抑制脏污）。调节好光圈后，顺序投影条纹图。先投影格雷码再投影正弦条纹，各分为两个方向，分别为 x 方向和 y 方向。

采用四步相移法，相移条纹共 8 张，x、y 方向各 4 张。最小灰度差设为 40，用于确定二值化图像。拆相位时以二值化的反射格雷码为依据，确定相位周期级数 k。最终可得到检测区内绝对相位分布，结果如图 11 (a) 和 11 (b) 所示。



(a) x方向相位图 (b) y方向相位图

图 11 x、y 方向绝对相位图

根据相位与梯度的关系，将相位转换为梯度，然后将梯度值映射到 0~255 范围内可视化显示，即可得到含有后表面反射的缺陷图，如图 12 (b) 所示。

对解算出的缺陷图进行图像处理，消除后表面反射干扰后得到最终结果如图 12 (c) 所示。

为了验证本文所提方法的可行性，将文中所提方法与传统明场方法获得的图像和未消除后表面反射的图像进行比对。

从图 12 (a) 的明场成像图中可以看出，手机玻璃盖板

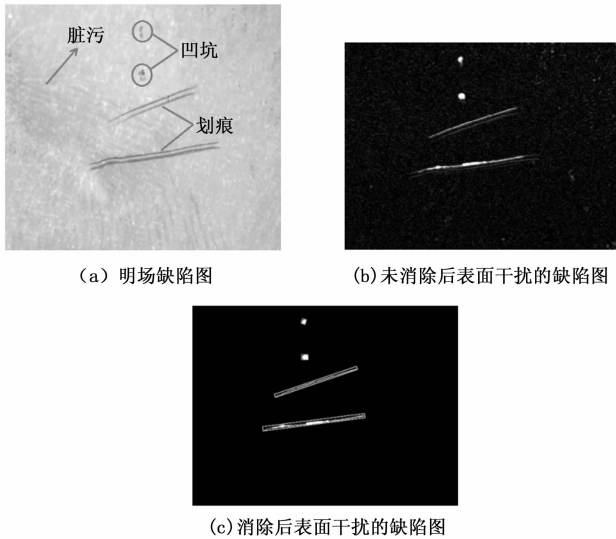


图 12 明场和相位偏折缺陷检测效果对比

表面存在指纹印等脏污以及凹坑、划痕等损伤性缺陷。脏污可以在出厂前清洗掉, 损伤性缺陷只能报废掉。但是如果只从明场图像中看, 那些指纹印与表面擦伤极为相似, 对于没有经验的工人来说很难区分出究竟是指纹印还是表面擦痕。

由于相位偏折术是基于反射条纹计算相位的, 当脏污的高度远小于被测面到显示屏间的距离时, 脏污并不会影响到反射条纹的相位, 所以根据式 (5) ~ (6) 计算梯度时也不会造成梯度突变。这样在灰度拉伸后的缺陷图 12 (b) 中就不存在脏污等非损伤性缺陷。但是在检测手机玻璃盖板等透明物体时, 后表面存在反射干扰, 这一干扰会直接影响到相位的提取, 导致解算出的缺陷图中也存在后表面缺陷, 从图像上直观来看就好像存在四条划痕, 这样不便于我们对缺陷进行准确的统计分析, 所以根据前后表面反射率不同, 成像不同的原理, 结合图像处理的方法消除后表面反射干扰, 仅保留前表面缺陷, 即如图 12 (c) 所示。

从图 12 (c) 中可以明显看出这一样品中存在两个凹坑和两条划痕。通过将 12 (c) 和 12 (a) 对比可以验证本文所提的方法准确地检测出了缺陷, 同时过滤掉了脏污。

4 结束语

研究了基于 PMD 检测类镜面透明物体表面缺陷的方法, 首先从原理推导了该方法的可行性, 然后通过格雷码和相移码的解码方式, 验证了理论推导的过程。提出采用图像处理的方法消除后表面反射干扰, 该方法能有效保留前表面缺陷, 过滤后表面缺陷, 避免了缺陷误检和过杀。通过与传统明场检测缺陷方法相比, 验证了该方法对脏污的过滤能力和缺陷的检测能力, 提高了损伤性缺陷的检测准确率。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王月敏, 张宗华, 高楠. 基于全场条纹反射的镜面物体三维形貌测量综述 [J]. 光学精密工程, 2018, 26 (5): 1014 - 1027.
- [3] 徐天义. 基于条纹反射的镜面物体三维形貌测量方法研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
- [4] Faber C, Olesch E, Krobot R, et al. Deflectometry challenges interferometry: the competition gets tougher! [J]. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 2012 (2), 8493 - 8508.
- [5] Su Peng, Parks Robert E, Wang Lirong, Angel Roger P, Burge James H. Software configurable optical test system; a computerized reverse Hartmann test [J]. Applied optics, 2010, 49 (23): 4404 - 4412.
- [6] Ren H, Gao F, Jiang X. Iterative optimization calibration method for stereo deflectometry [J]. Optics Express, 2015, 23 (17): 22060 - 22068.
- [7] 袁婷. 基于条纹反射法的大口径非球面反射镜面形检测技术研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院 (长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
- [8] 徐平, 王道档, 解钟敏, 等. 基于相位偏折术的大像差透射波前检测 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39 (9): 99 - 105.
- [9] 刘艳. 光栅投影式物体表面三维形貌测量方法的研究与改进 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [10] 杨福俊, 云大真. 基于统计滤波的单幅散斑条纹图的相位恢复技术 [J]. 光学学报, 2002 (8): 952 - 956.
- [11] 盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的快速解相位方法 [J]. 光学学报, 2008 (2): 259 - 267.
- [12] 荆海龙, 苏显渝, 刘元坤, 等. 基于条纹反射的镜面测量及三维重建算法分析 [J]. 光电工程, 2008 (10): 37 - 42.
- [13] 李成瑞. 曲面光学元件表面缺陷检测技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [14] 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): 113 - 121.
- [15] 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.
- [16] 陈晓红. 基于机器视觉的触摸屏玻璃缺陷检测方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [17] 张俊生. 基于动态阈值分割的汽车轮毂缺陷检测技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2012.
- [18] 郭志焯. 高反射表面缺陷检测技术研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- [19] 李文静, 张虎山, 焦键. 基于 HALCON 的贴片 IC 焊接缺陷检测算法研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41 (8): 244 - 248.
- [20] Norie Suetsugu. Digital Image Processing [M]. Tritech Digital Media, 2018.