

基于相位测量偏折术的反射表面缺陷检测

陶迁, 周志峰, 吴明晖, 王立瑞

引用本文:

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.

TAO Qian, ZHOU Zhi-feng, WU Ming-hui, 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203512.1315>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种液晶模组自动光学检测系统的设计

Defect inspection system design based on the automated optical inspection technique for LCD module

液晶与显示. 2020, 35(4): 402–408 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203504.0402>

基于AttentionGAN和形态学重建的TFT阵列缺陷检测

TFT array defect detection based on AttentionGAN and morphological reconstruction

液晶与显示. 2020, 35(12): 1270–1277 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203512.1270>

基于自相关性和模版匹配的TFT缺陷电路重构算法

TFT defect circuit reconstruction algorithm based on autocorrelation and template matching

液晶与显示. 2020, 35(6): 564–571 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203506.0564>

基于图像融合的木板表面缺陷检测研究

Wood surface defect detection based on image fusion

液晶与显示. 2016, 31(9): 882–888 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163109.0882>

一种采用介电突起消除边缘场效应的LCoS

Eliminating fringe field effect using dielectric protrusions in LCoS

液晶与显示. 2020, 35(1): 12–18 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203501.0012>

文章编号:1007-2780(2020)12-1315-08

基于相位测量偏折术的反射表面缺陷检测

陶 迁, 周志峰*, 吴明晖, 王立瑞

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:针对机器视觉难以对反射表面进行缺陷检测等问题,本文提出一种基于相位测量偏折术的缺陷检测方法。该方法以 LCD 屏幕作为结构光源,格雷码图案结合相移图案作为结构光,通过 LCD 屏幕投射到被测表面,使用单目相机捕捉结构光的反射图案。首先对相机捕捉的图案逐个像素进行解码,获得包裹相位和条纹级数;然后进行相位展开并消除误差,生成绝对相位图像;再使用 Canny 算子对图像进行边缘检测,将投影区域与非投影区域分割;最后在投影区域内使用 Canny 算子检测出缺陷的边缘,实现表面缺陷的检测与定位。实验结果表明:在环境亮度较低且恒定的条件下,相位测量偏折术可高效检测出反射表面上具有形变特征的缺陷,精度为 0.1 mm,基本满足对反射表面上多种缺陷进行高精度、高效率、低成本检测的要求。

关键词:机器视觉;缺陷检测;相位测量偏折术;格雷码;相移

中图分类号:TH741 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203512.1315

Detection of reflective surface defects based on phase measuring deflectometry

TAO Qian, ZHOU Zhi-feng*, WU Ming-hui, WANG Li-rui

(School of Mechanical and Automotive Engineering,
Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the problem that machine vision is difficult to detect defects on reflective surfaces, a defect detection method based on phase measuring deflectometry is proposed in this paper. This method uses an LCD screen as a structured light source, Gray code pattern combined with phase shift pattern as structured light, which is projected onto the measured surface through the LCD screen, and monocular camera is used to capture the reflected pattern of the structured light. Firstly, the image captured by the camera is decoded pixel by pixel to obtain the wrapped phase and fringe order. Secondly, the absolute phase image is generated by unwrapping phase and eliminating the error. Thirdly, Canny operator is used to detect the edge of the image to segment the projected region and the unprojected region. Finally, Canny operator is used to detect the edge of defect in the projected region to realize the detection and location of surface defect. The experimental results show that under the condition of low and constant ambient brightness, phase measuring deflectometry can efficiently

收稿日期:2020-07-23;修订日期:2020-09-04.

基金项目:上海市科学技术委员会科研基金(No. 17511106700)

Supported by Scientific Research Foundation of Shanghai Science and Technology Commission (No. 17511106700)

* 通信联系人, E-mail: zhousjtu@126.com

detect the defects with deformation characteristics on the reflecting surface, with an accuracy of 0.1 mm. It basically meets the requirements of high precision, high efficiency and low cost detection for various defects on the reflected surface.

Key words: machine vision; defect detection; phase measuring deflectometry; Gray code; phase shift

1 引言

工业生产中常常需要对反射表面的加工质量进行检测,由于反射表面的反射特性,缺陷检测和表面轮廓测量仍然是具有挑战性的问题。三维接触式测量是一种高分辨率的测量方法,可用于反射表面的缺陷检测,但其检测时间长,且可能会损伤被检测表面。非接触式光学检测方式依赖于漫反射,如果没有昂贵专用的设备或消除反射特性带来的影响,不能直接应用于反射表面检测^[1]。因此,目前反射表面的缺陷检测大多依赖于人工检测,工人从不同角度的目测和触摸来判断是否存在缺陷,这种检测方式效率低、漏检率高,且工作强度大。

为了改进反射表面的缺陷检测,国外研究人员提出并应用了相位测量偏折术^[2]。作为一种测量自由镜面形状的新技术,相位测量偏折术可以为镜面表面形貌分析提供连续的数据,且具有较大的动态范围,可以进行全场测量。相位测量偏折术对镜面表面形状变化十分敏感,并且在测量相对变形时对系统标定误差的容忍度更高,因此将相位测量偏折术应用于镜面测量和缺陷检测越来越受到人们的重视。袁婷等人^[3]使用相位测量偏折术对一个凹球面镜进行三维面形测量;张莲涛等人^[4]对标准平面镜和汽车后视镜进行检测;张于北等人^[5]使用四步相移法求取相位,利用相位差快速检测出反光喷漆光滑表面的缺陷;姜硕等人^[6]采用四步相移法结合格雷码编码来提取相位,提出消除相位误差的方法,并在机身喷涂样件表面对多种类型缺陷进行检测。德国 Micro-Epsilon 公司利用该技术开发了 reflectCONTROL 汽车喷漆表面缺陷检测系统,单个位置检测用时少于 1 s,可以检测出最小缺陷尺寸为直径 0.3 mm^[7]。

本文提出了一种基于相位测量偏折术的反射表面缺陷检测方法,利用计算机生成格雷码和多步相移法相结合的编码结构光,通过 LCD 屏幕投

射到被测表面,单目相机采集反射图案,进行解码和相位展开,再使用 Canny 算子提取出表面缺陷,最后搭建实验装置和编写软件,以汽车漆膜样件为实验对象,验证本文方法的有效性。

2 缺陷检测原理及装置

相位测量偏折术的基本原理是反射定律,如图 1 所示,被测表面上的缺陷会使光线发生偏转,缺陷位置的切线相对于表面的角度变化 α ,会使反射光线的角度变化 2α 和反射的条纹相位变化 φ ,因此相位测量偏折术对表面的梯度变化非常敏感,而且实际检测区域的大小取决于物体的几何形状。

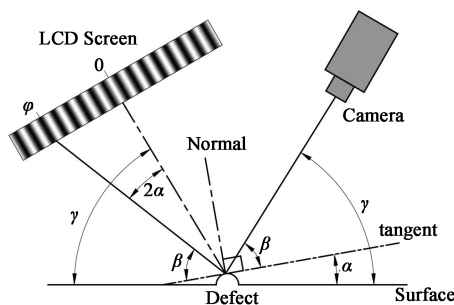


图 1 缺陷检测系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of defect detection system

缺陷检测系统装置的主要设备包括相机(单目或多目)、LCD 屏幕、被测工件和计算机。与传统的结构光投影三维重建不同,投影结构光的设备由投影仪变为 LCD 屏幕,将计算机生成的结构光条纹图案依次显示在 LCD 屏幕上,每张条纹图案在被测表面上的反射都由相机来捕捉,通过对相机捕获图像的解码来发现缺陷。如果要对反射表面进行准确的重建,需要确定系统参数,比如相机到被测表面之间的距离、LCD 屏幕与被测表面之间的距离等。此外,使用单个相机会存在高度和梯度的模糊问题,为了解决这个问题,需要引入额外相机、额外的 LCD 屏幕或距离传感器^[8]。本文使用相位测量偏折术的系统设置,目的是检测

出反射表面上局部梯度突变的位置,将所有疑似缺陷的部分提取,再从提取的部分中筛选出缺陷。因此,本文使用的方法不涉及表面高度信息,但这不影响缺陷的检测,因此不需要这些额外的辅助器件和准确的系统参数。

3 结构光图案生成与解码

使用相位测量偏折术对反射表面进行缺陷检测,首先要根据系统检测需求生成理想的结构光图案。该技术原本使用的是相移条纹,相移条纹的优点是在离焦时不改变相位,使用时只需要相机稳定地聚焦在被测表面即可。相位提取技术包括傅里叶变换法和多步相移法^[9]。傅里叶变换法虽然只用单张图案,但相位信息丢失严重,因此不适合用于缺陷检测。多步相移法需投影多张相移条纹图案,获取的相位信息更加全面,被广泛采用。多步相移法投影图案的张数越多,误差越小,但依然无法避免相位展开的误差。本文提出在相位测量偏折术使用多步相移法的基础上,额外增加格雷码图案构成混合系统,格雷码的快速解码和多步相移法的高精度相结合,增强相位提取的鲁棒性。

3.1 格雷码图案

格雷码图案在结构光三维视觉中应用广泛,由亮条纹和暗条纹组成,暗条纹对应格雷码 0,亮条纹对应格雷码 1。格雷码图案虽然是一种简单实用的方法,但具有一定的局限性,达到实际应用的空间分辨率常常需要许多格雷码图案, n 张格雷码图案表面最多可以划分为 2^n 块区域。随着格雷码图案张数的增多,条纹的分辨率越来越精细,更小的条纹宽度通常会获得更高的精度,但由于涉及测量过程的光学器件引入的误差,正确的解码会变得越来越困难,所以最小条纹宽度的要求在反射表面上相机观察到的最小条纹黑白分界明显。

格雷码 $G_{n-1}G_n \cdots G_2G_1G_0$ 和二进制数 $B_{n-1}B_n \cdots B_2B_1B_0$ 可以相互转换,转换公式如下:

a 、 n 位二进制数转为格雷码

$$G_{n-1} = B_{n-1}, \quad (1)$$

$$G_i = B_{i+1} \oplus B_i. \quad (2)$$

b 、 n 位格雷码转为二进制数

$$B_{n-1} = G_{n-1}, \quad (3)$$

$$B_i = G_{i+1} \oplus B_i, \quad (4)$$

$$(i = 0, 1, \dots, n-2).$$

格雷码图案的张数由图案的大小和最小的条纹宽度决定,格雷码图案张数的计算如下:

$$N_H = \log_2 \frac{H}{m} + 1, \quad (5)$$

$$N_V = \log_2 \frac{W}{m} + 1, \quad (6)$$

式中, H 为图案高度; W 为图案宽度; m 为条纹宽度; N_H 和 N_V 分别是水平、垂直格雷码图案的张数。 H 、 W 、 m 为 2 的幂次方。

以 H 为 512 像素, W 为 256 像素, m 为 32 像素的格雷码图案为例,会生成如图 2(a) 所示的 5 张垂直格雷码图案和图 2(b) 所示的 4 张水平格雷码图案,可以将 LCD 屏幕分割为 512 个区域。

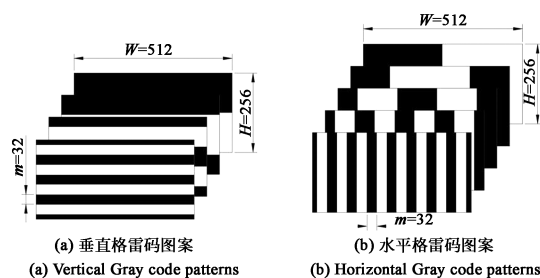


图 2 格雷码图案

Fig.2 Gray code patterns

对相机捕捉的格雷码反射图案解码,就是将格雷码转为二进制数,再由二进制数转化为十进制数的过程。格雷码反射图案需经过二值化处理,亮条纹照射的区域灰度值设置为 255,暗条纹照射的区域灰度值设置为 0。按照格雷码图案投影顺序读取相机图片中反射图案区域内像素点的灰度值,可获得格雷码。

3.2 多步相移法图案

多步相移法条纹图案是由多张余弦条纹改变相位生成,前后两张余弦条纹图之间的相移增量是相同的,增量为 $2\pi/N$, N 为相移步数。 N 步相移法中,第 n 张垂直相移图案的生成公式为:

$$f(x, y) = \frac{G}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{T}x + \frac{\pi(n-1)}{2} \right) \right] \quad (n = 1, 2, \dots, N), \quad (7)$$

式中, $f(x, y)$ 为 (x, y) 像素点处的灰度值; G 为最大值灰度值,通常为 255; T 为条纹周期。

相移图案一张接一张显示在 LCD 屏幕上,每

一张图案投影的反射都被相机捕捉。捕捉的图案灰度值强度表达式为:

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \times \cos\left[\Phi(x, y) + \frac{2(n-1)\pi}{N}\right], \quad (8)$$

$$(n=1, 2, \dots, N)$$

式中, $I_n(x, y)$ 为捕捉的图像中 (x, y) 像素点处的灰度值; $a(x, y)$ 为平均强度; $b(x, y)$ 为强度调制; $\Phi(x, y)$ 为 x 或 y 方向的绝对相位值, 可由包裹相位 $\varphi(x, y)$ 展开来求取。对多步相移法图案解码的目的是求解 $\varphi(x, y)$, 其计算公式为:

$$\varphi(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin\left(\frac{2(n-1)\pi}{N}\right)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos\left(\frac{2(n-1)\pi}{N}\right)}. \quad (9)$$

常用的多步相移法有三步、四步或更多步, 其中四步相移法的应用最为普遍^[10], 本文也采用四步相移法。四步相移法要生成水平、垂直各 4 张相移条纹图案, 图案的大小与格雷码图案相同, 相移条纹的周期 T 等于 m 。相邻两张图案之间的相移为 $\pi/2$, 生成的四步相移法条纹图案如图 3 所示。

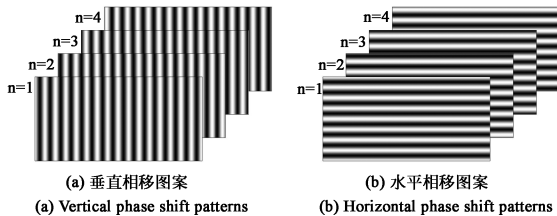


图 3 四步相移法条纹图案

Fig.3 Four step phase shift stripe patterns

3.3 相位展开

由于包裹相位是由四象限反正切函数求解得出, 所以被限制在 $(-\pi, \pi)$ 中。由包裹相位求得绝对相位的过程被称为相位展开或解包裹。

传统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。空间相位展开法原理是将相邻两像素的包裹相位进行比较, 用后一位的减去前一位得到相位差, 如果相位差小于 $-\pi$, 则后一位的包裹相位加上 2π ; 如果相位差大于 π , 则后一位的包裹相位减去 2π , 展开结果一定要保证相位差在 $[-\pi, \pi]$ 范围内, 相位才能是连续的, 但

缺点是误差会传播和累积^[11]。时间相位展开法需要额外投射一系列不同频率的条纹图, 条纹频率随着时间变化, 相机图片中的每个像素点可以沿着时间的路径独立地进行相位展开, 而不需要在二维图像中寻找路径。完全避免图像中的噪声点等对相位展开的影响, 也可以避免空域相位展开中的误差传播^[12], 缺点是投影图案较多, 解码时间较长。

本文方法的相位展开方式与传统的相位展开方法相比, 兼具效率与鲁棒性^[13], 计算公式如下:

$$\Phi(x, y) = \varphi(x, y) + K(x, y)\pi, \quad (10)$$

式中, $K(x, y)$ 为条纹级数, 是由格雷码图案解码获得的十进制数, 将所有十进制数中的奇数加 1 变为偶数后得来。相位展开的原理如图 4 所示。

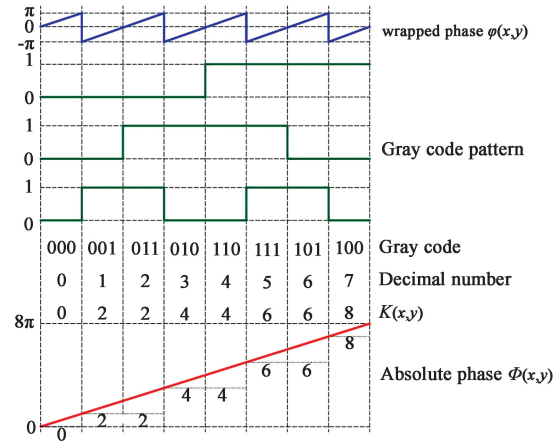


图 4 相位展开过程原理图

Fig.4 Schematic diagram of phase unwrapping process

3.4 相位展开误差消除

在理想情况下, 包裹相位 $\varphi(x, y)$ 与条纹级数 $K(x, y)$ 应同步发生跳变, 但实际情况中会出现图 5 中 Error 指出现象, 称为相位展开过程中的周期错位现象^[14]。这种现象主要是由于表面反射率低、环境光强较高、相机没有聚焦在表面上、相机和 LCD 的非线性误差^[15-16]和 LCD 伽马偏移效应^[17]等原因造成的格雷码解码误差。

为了提高格雷码解码的准确度, Daniel Scharsterin^[18]提出了一种方法, 在投影的格雷码图案基础上, 再将前格雷码图案取反, 投影一组反格雷码图案。这种方式虽然可大大增加格雷码解码的准确度, 但会使格雷码图案数量翻倍, 大大增

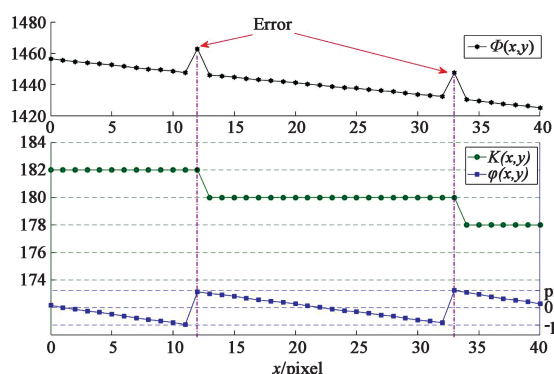


图 5 相位展开误差

Fig.5 Phase unwrapping error

加检测时间,而且不能应用于类镜面检测。本文使用另一种改善条纹解码的方法,额外增加一种纯白色和一张纯黑色的图案,设在纯白色图案和纯黑色图案投影下 \$(x,y)\$ 像素点的灰度值分别为 \$W(x,y)\$ 和 \$B(x,y)\$,第 \$n\$ 张相机捕捉的反射图案里 \$(x,y)\$ 像素点的灰度值为 \$G_n(x,y)\$,若 \$G_n(x,y)\$ 大于等于 \$W(x,y)\$ 与 \$B(x,y)\$ 的平均值,则 \$(x,y)\$ 像素点为 1,反之则为 0。这种方法只需要增加两张图案,对检测时间影响较小,但周期错位现象依然存在,还需要使用周期修正方法。在上述改善方法下,周期错位现象只会发生在一个包裹相位周期起始的 1 至 2 个像素。根据空间相位展开原理,一个包裹相位周期的起始可以通过领域分析知晓。如图 6 所示,设包裹周期为 \$(x_1, x_e)\$,同一个包裹相位周期内条纹级数必须是相同的,取周期内数量最多的条纹级数作为该周期所有像素的条纹级数。可对周期内所有条纹级数求解平均数后向下取整,结果即为该周期修正后的条纹级数 \$K\$,求解过程如下:

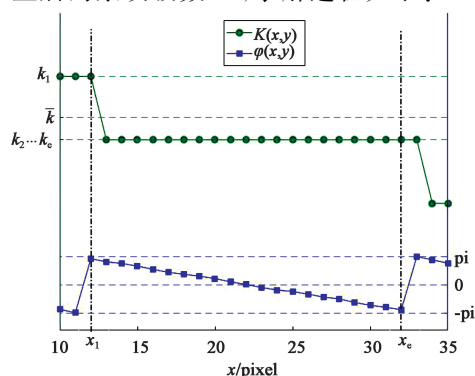


图 6 条纹级数修正

Fig.6 Correction of fringe order

$$K = \left[\bar{k} \right], \bar{k} = \frac{\sum_{i=1}^e k_i}{e}. \quad (11)$$

4 缺陷检测算法

4.1 投影区域分割

为了准确捕捉缺陷,先后求取 \$x\$ 方向的绝对相位 \$\Phi_x(x,y)\$ 和 \$y\$ 方向绝对相位 \$\Phi_y(x,y)\$,可分别生成 \$x\$ 方向和 \$y\$ 方向的绝对相位图,如图 7(a)、(b)所示。由于本文使用的是固定焦距的工业相机,相机与被测表面的距离固定,投影区域的大小会受到反射表面的曲率变化影响,因此相机图片中会存在投影区域和非投影区域。投影区域可提取连续相位,属于低频信号;非投影区域为斑点噪声,属于高频信号,如图 7(c)所示;表面缺陷在绝对相位图中表现为局部梯度畸变,属于中频信号,如图 7(d)所示。因此,缺陷检测的第一步是从绝对相位图中分割出投影区域。

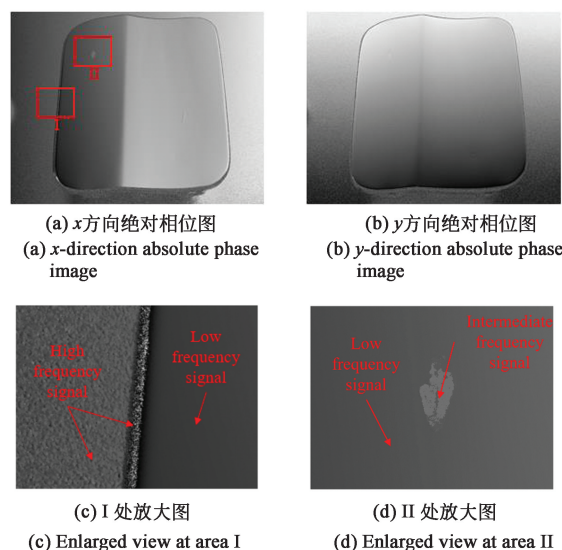


图 7 绝对相位图中的低频信号与高频信号

Fig.7 Low-frequency and high-frequency signals in the absolute phase image

为了有效区分投影区域和非投影区域,引入 Canny 边缘检测算法^[19],先对绝对相位图进行高斯核平滑滤波器来降噪,再用一阶导数计算梯度大小和方向,最后用滞后阈值寻找出梯度的局部最大值,得到梯度幅值图像,如图 8 所示。低频信号和中频信号被全部过滤,高频信号被提取,表现

为高灰度值。

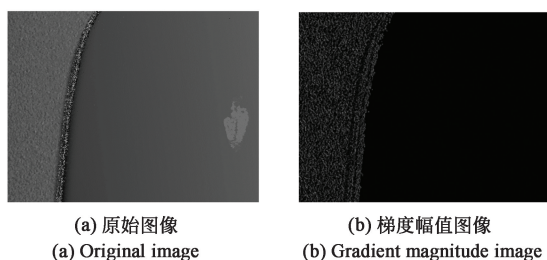


图 8 原始图像与梯度幅值图像
Fig. 8 Original image and gradient magnitude image

对梯度幅值图像使用阈值处理可将高灰度值区域提取出来,再对提取结果进行形态学闭运算来填补区域内空洞与缝隙后形成掩膜。最后使用非投影区域的掩膜对绝对相位图像做分割,可得到投影区域。

4.2 缺陷提取

在投影区域分割步骤中,使用 Canny 算子提取高频信号会把区域内的表面缺陷和区域外的噪声同时提取出来,但被提取的表面缺陷往往是不全的。非投影区域分割完成后,再对投影区域内的图像(如图 9(a))使用 Canny 算子提取缺陷,避免了区域外的高频信号影响,滞后阈值的低阈值大小要比投影区域分割步骤中设定的低很多。投影区域被 Canny 算子处理后,区域内缺陷被突显出来,再对算法处理结果进行阈值分割和连通域分析,可实现缺陷提取,结果如图 9(b)所示。

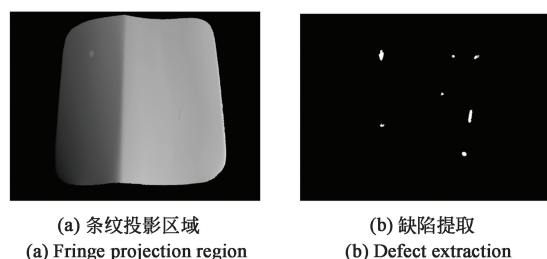


图 9 投影区域中提取缺陷过程
Fig.9 Process of defect extraction in fringe projection region

5 实 验

为了验证本文介绍的检测方式,搭建实验系统,以图 10(a)所示的汽车漆膜样件(面积为 185

mm×150 mm)为检测对象。油漆表面上存在颗粒、划痕、凹坑、掉漆 4 种缺陷。实验系统装置如图 10(b)所示,包括 LCD 屏幕(分辨率为 1 920×1 080,像素尺寸为 0.264 mm²,亮度为 250 cd/m²)、显示器支架、工业相机(分辨率为 4 024×3 036,镜头焦距为 12 mm)、工业相机支架、检测对象。LCD 屏幕中心点距离被测表面约为 30 mm,相机距离被测表面约为 300 mm。使用计算机生成结构光条纹图案,利用 C# 编写程序,全屏幕显示图案和控制工业相机拍照。

实验系统搭建需要注意以下几点:(1)工业相机聚焦在样件表面上;(2)屏幕与表面距离小于相

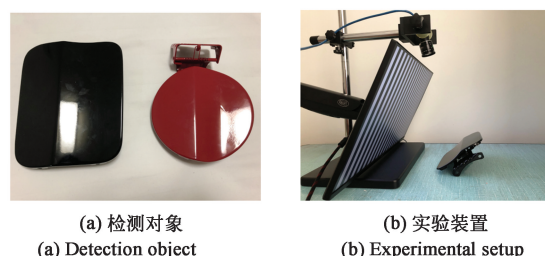


图 10 检测样件和实验装置
Fig.10 Test samples and experimental devices

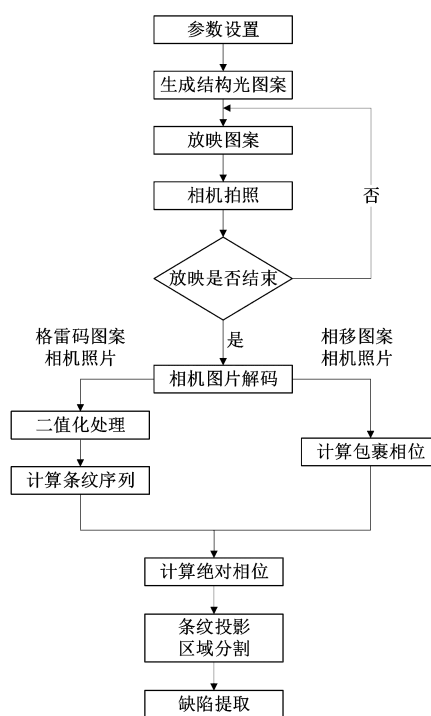


图 11 缺陷检测流程图
Fig.11 Flowchart of defect detection

机后景深;(3)环境光亮度较低且恒定;(4)被测表面后面的背景必须为非镜面;(5)检测时系统装置应保持禁止;(6)工业相机设置为同步采集;(7)结构光图案投影的间隔时间需保证工业相机从触发到完成采集,如果时间间隔太短,可能会出现条纹重叠现象,太长会影响检测效率。

本实验结构光图案大小为 $1\,024 \times 1\,024$,最小条纹宽度为 32 个像素。将时间间隔设置为 0.3 s,共投影 16 张格雷码图案和 8 张相移图案,从开始投影结构光图案到提取出缺陷,共用时 24.4 s。使用 Canny 算子处理绝对相位图,分割出投影区

域,滞后阈值的高低阈值分别为 40 和 20;使用 Canny 算子在投影区域内提取出缺陷,高低阈值分别为 12 和 3。最终可检测出样件表面上 2 处缺陷,其中,最小缺陷为颗粒缺陷,直径约为 0.1 mm。整个检测流程如图 11 所示。

为了证明本文方法对不同材质反射表面检测缺陷的有效性,对表面上的异物附着、划痕、凹坑和凸起等常见缺陷进行检测,表面缺陷和检测结果的对比如图 12 所示。图 12(a)、(b)为金属表面,表面上存在划痕、凹坑和变形;图 12(c)、(d)为油漆表面的凹坑缺陷,本文方法也准确地将把该缺陷检测出来。

6 结 论

本文提出了一种基于相位测量偏折术的反射表面缺陷检测方法。在相位测量偏折术原理和系统组成的基础上,采用格雷码结合多步相移的结构光,提高相位求解的准确性。针对周期错位现象提出有效的校正方法。获取准确的绝对误差后,生成绝对相位图像,分割投影区域后使用 Canny 算子提取缺陷。对汽车油漆表面、不锈钢表面等常见反射表面进行检测,实验结果表明:本文方法的检测精度为 0.1 mm。基本满足对反射表面多种缺陷检测的需求。

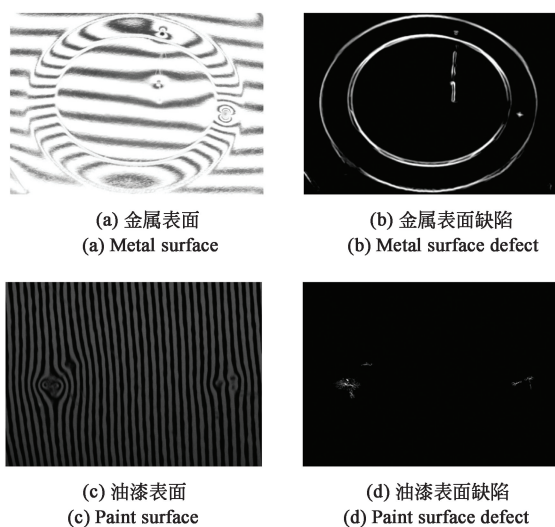


图 12 其他检测案例

Fig.12 Other detect cases

参 考 文 献:

- [1] 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.
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. (in Chinese)
- [2] KNAUER M C, KAMINSKI J, HAUSLER G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces [C]//*Proceedings Volume 5457, Optical Metrology in Production Engineering*. Strasbourg: SPIE, 2004: 366-376.
- [3] 袁婷,张峰,陶小平,等.基于相位测量偏折术的反射镜三维面形测量[J].光学学报,2016,36(2):0212004.
YUAN T, ZHANG F, TAO X P, et al. Three-dimensional shape measuring for specular surface based on phase measuring deflectometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0212004. (in Chinese)
- [4] 张莲涛,卢荣胜,程子怡.基于相移偏折法的高反射表面面形测量技术[J].光子学报,2020,49(1):0112002.
ZHANG L T, LU R S, CHENG Z Y. Measurement technique of high-reflected surface based on phase measuring deflectometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1): 0112002. (in Chinese)
- [5] 张于北,唐佳,杨党纲.对某金属件反光表面缺陷的反射条纹检测[J].计测技术,2013,33(S1):100-102.
ZHANG Y B, TANG J, YANG D G. Detection of defects on a shining-metal surface using reflective fringe pattern [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2013, 33(S1): 100-102. (in Chinese)

- [6] 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.
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. (in Chinese)
- [7] 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.
KONG F, ZHANG C, FENG R H, *et al.* Automatic inspection system for car body paint defect [J]. *Modern Paint and Finishing*, 2017, 20(3): 57-61. (in Chinese)
- [8] XU Y J, GAO F, JIANG X Q. Performance analysis and evaluation of geometric parameters in stereo deflectometry [J]. *Engineering*, 2018, 4(6): 806-815.
- [9] HUANG L, IDIR M, ZUO C, *et al.* Review of phase measuring deflectometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 107: 247-257.
- [10] 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: 22-28.
XU T Y. Research on 3D shape measurement method of mirror object based on stripe reflection [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019: 22-28. (in Chinese)
- [11] GHIGLIA D C, PRITT M D. *Two-dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- [12] 岳慧敏. 基于时间相位展开的三维轮廓测量研究[D]. 成都: 四川大学, 2005: 16-19.
YUE H M. Research on three-dimensional profilometry based on temporal phase unwrapping [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005: 16-19. (in Chinese)
- [13] ZHANG S. Absolute phase retrieval methods for digital fringe projection profilometry: A review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 107: 28-37.
- [14] 林煥, 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.
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. (in Chinese)
- [15] 王建华, 杨延西. 基于彩色编码光栅投影的双 N 步相移轮廓术[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 616-627.
WANG J H, YANG Y X. Double N-step phase-shifting profilometry using color-encoded grating projection [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 616-627. (in Chinese)
- [16] 张旭, 邵双运, 祝祥, 等. 光学三维扫描仪光强传递函数的测量和校正[J]. 中国光学, 2018, 11(1): 123-130.
ZHANG X, SHAO S Y, ZHU X, *et al.* Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 123-130. (in Chinese)
- [17] 郭玉强, 孙玉宝. 改善大视角下 LCD 灰阶图像质量的研究进展[J]. 液晶与显示, 2020, 35(7): 710-724.
GUO Y Q, SUN Y B. Progress in improving the gray scale image quality of LCD under large viewing angle [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 710-724. (in Chinese)
- [18] SCHARSTEIN D, SZELISKI R. High-accuracy stereo depth maps using structured light [C]// *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Madison: IEEE, 2003: 195-202.
- [19] 曾欢, 王浩. 图像边缘检测算法的性能比较与分析[J]. 现代电子技术, 2006, 29(14): 53-55, 58.
ZENG H, WANG H. Comparison and analysis for performance of image edge detection algorithms [J]. *Modern Electronics Technique*, 2006, 29(14): 53-55, 58. (in Chinese)

作者简介:



陶 迁(1995—), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 2014 年于宿迁学院获得学士学位, 主要从事机械设计及其自动化和机器视觉方面的研究。E-mail: t943436471@163.com



周志峰(1978—), 男, 江苏常州人, 博士, 硕士生导师, 2007 年于上海交通大学获得博士学位, 主要从事车辆自动导航驾驶方面的研究。E-mail: zhouzsjtu@126.com