

# 光学学报

## 基于双目光栅重建和纹理映射的缺陷三维测量方法

侯冠宇<sup>1</sup>, 吴斌<sup>1\*</sup>, 何荣芳<sup>2\*\*</sup>, 张伟斌<sup>2</sup>

<sup>1</sup>天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999

**摘要** 针对工业检测中对表面缺陷的高精度检测和定位需求,提出了一种缺陷特征重建方法。通过在基于双目光栅投影的三维重构系统上附加纹理相机,实现对于重构点云模型的纹理映射,并结合纹理相机图像中提取到的特征区域,完成表面特征的三维重构。针对待测物体需要进行多视角重建的情况,引入精密转台,利用旋转轴标定方法获取不同旋转位置下纹理图像与点云数据的映射关系,并利用基于距离判据的判断方法实现了对遮挡部分点云的剔除。采用四象限临近点搜索和基于距离加权平均的线性插值方法对纹理图像中像素坐标进行三维测量。实验完成了对于图像中标注缺陷轮廓内像素点的重建,实现了对于表面特征的精确尺寸计算和定位,通过对重建的缺陷尺寸和位置进行计算并与影像测量仪测得结果进行对比,可得本文方案对缺陷三维尺寸和位置的测量误差不超过 0.2 mm,且能更准确地计算缺陷面积。

**关键词** 测量; 三维重构; 纹理映射; 视觉测量; 表面缺陷定位

中图分类号 TH74

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0712003

### Three-Dimensional Measurement Method of Defects Based on Binocular Grating Reconstruction and Texture Mapping

Hou Guanyu<sup>1</sup>, Wu Bin<sup>1\*</sup>, He Rongfang<sup>2\*\*</sup>, Zhang Weibin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Key Laboratory of Precision Testing Techniques and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China

**Abstract** To meet the demand for high-precision detection and location of surface defects in industrial inspection, this paper proposes a defect feature reconstruction method. A texture camera is added to the three-dimensional (3D) reconstruction system of binocular grating projection to realize the texture mapping of the reconstructed point cloud model. The 3D reconstruction of surface features can be realized using the feature regions extracted from the image captured by the texture camera. Since the object needs to be reconstructed from multiple perspectives, a precision turntable is introduced. The rotation axis calibration method is used to obtain the projection relationship between the texture image and the point cloud data at different rotation positions, and the judgment method based on the distance criterion is employed to eliminate the occluded part of the point cloud. Finally, the pixel coordinates of the texture image are located in three dimensions by four-quadrant proximity search and linear interpolation based on distance weighted average. The experiments complete the reconstruction of the pixel points in the marked defect contour in the image and realize the accurate size calculation and location of surface features. The reconstructed defect size and position are calculated which are then compared with the results measured by an optical image measuring instrument. The results show that the measurement error of the proposed solution for the 3D sizes and positions of defects is no more than 0.2 mm, and the areas of defects can be calculated more accurately.

**Key words** measurement; three-dimensional reconstruction; texture mapping; visual measurement; surface defect location

收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2021-09-05; 录用日期: 2021-10-15

通信作者: \*wubin@tju.edu.cn; \*\*herongfang@caep.cn

0712003-1

## 1 引言

视觉三维重建技术旨在利用图像恢复待测物的三维形貌信息,在自动驾驶<sup>[1]</sup>、虚拟现实<sup>[2]</sup>、古文物和建筑保护<sup>[3-4]</sup>、地形地貌测绘<sup>[5]</sup>、工业测量<sup>[6-7]</sup>等领域都有着重要的应用价值。根据测量过程中是否向场景中投射结构光源,可将视觉三维重建分为主动视觉重建和被动视觉重建<sup>[8-9]</sup>。双目光栅投影重建法属于主动视觉重建的一种。光栅投影法对于投射至物体表面的横纵方向光栅条纹进行相位编码,并将这些相位编码作为特征进行双目立体匹配,从而实现相位编码特征点空间坐标的求解<sup>[10-11]</sup>,其中重点研究方向在于如何实现光栅条纹的快速动态相位解算<sup>[12-13]</sup>。相比于被动立体视觉中基于图像特征的匹配方法<sup>[14-15]</sup>,光栅投影法可以重建出高密度的空间点云(反映待测物表面形貌),对于低纹理表面具有更好的重建效果<sup>[16]</sup>。

工业三维重建设备通常采用黑白相机,无法获取颜色信息;并且,由于生成的点云密度有限,无法完成表面缺陷的高精度检测。基于图像处理的缺陷识别与定位技术则克服了这一不足,通过适当的图像处理算法<sup>[17-18]</sup>,自动得到高精度的缺陷轮廓。然而,基于图像的缺陷检测方法只能获取以像素为单位的二维特征参数,对于三维信息的判定不足。为生成具有真实感的三维模型并实现对于表面特征的定量分析,结合二者的优势,在测得的三维空间点云的基础上,利用纹理映射技术赋予点云色彩,实现真实感表面的生成和表面缺陷特征的三维测量。其中的关键步骤是获取纹理图像与三维点云模型之间的对应关系,即实现三维点云向纹理图像的投影过程;根据投影关系为空间点云赋颜色值,完成彩色纹理模型的构建。刘星明等<sup>[19]</sup>提出了一种复合权重纹理融合方法,对重叠区域的纹理颜色进行重新计算,生成了具有真实感的表面三维模型并有效消除了拼接痕迹。赵琳敬等<sup>[20-21]</sup>将纹理相机固定于高精度旋转设备上,通过对旋转台进行标定,实现了多个位置的纹理图像融合。杜瑞建等<sup>[22]</sup>利用特征匹配算法,实现了局部纹理图像与双目系统左相机坐标系下点云的匹配,从而完成表面纹理映射。上述工作主要聚焦于真实感表面的重建与获取,但对于表面缺陷的定量描述与评价未进行深入探讨。Zong 等<sup>[23]</sup>聚焦于表面缺陷三维参数的定量分析,搭建了将基于双目激光散斑投影系统与附加纹理相机相结合的缺陷识别与重构系统,提出了基于卷积神经网络

DenseNets<sup>[24]</sup>和互相关计算的图像缺陷提取方法,并通过遍历三维点云查找投影于图像中缺陷轮廓内部的三维点,实现重建。但相比于图像像素分辨率,空间点云的分辨率仍然较低,因此缺陷重建过程会导致部分图像信息尤其是边缘信息失真,导致缺陷参数计算出现一定误差,并且该方法在点云较为稀疏的区域也会失效。

本文提出了一种物体和缺陷特征的三维重构方法。在用于形貌检测的工业级双目光栅投影系统 GOM ATOS TripleScan 基础上,添加纹理相机,通过立体标定和旋转轴标定建立不同拍摄位置下纹理图像与点云的映射关系。针对在将多视角拼接点云向图像投影过程中遮挡引起的纹理映射错误,提出了一种基于距离判据的遮挡点剔除方法。在此基础上,提出一种查找缺陷轮廓内的感兴趣像素点的方法,并利用四象限邻近点搜索的方式查找纹理图像中感兴趣像素临近的三维投影点,结合基于距离加权平均的线性插值方式,完成了对图像中缺陷轮廓内部区域的高分辨率三维重建。最后进行相关实验,以验证本文方法的精度。

## 2 三维点云模型的获取

双目光栅投影重建系统原理如图 1 所示。系统由两台高分辨率工业相机和一个光栅投影仪组成。投影仪分别向待测物体投射多组具有相移的横向和纵向光栅条纹,左右相机分别对上述图像进行采集。对于获取到的光栅条纹图像,利用相位展开算法得到图像中沿横向或纵向光栅条纹方向的相位值。对于单幅图像而言,图像像素坐标 $(u, v)$ 具有唯一的相位值。若左、右两幅图像拥有相同相位值的像素点,可认为这些像素点是同名像点,从而得到左右相机图像中一对匹配的特征点 $(u_1, v_1)$ 和 $(u_2, v_2)$ <sup>[25]</sup>,经畸变校正后的对应像点为 $(u'_1, v'_1)$ 和 $(u'_2, v'_2)$ 。

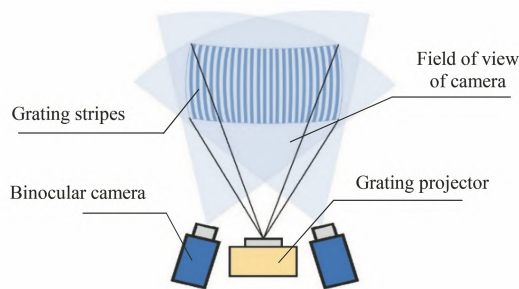


图 1 双目光栅投影重建系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of binocular grating projection reconstruction system

假定实际物点在左相机坐标系下的空间点齐次坐标矩阵为  $\mathbf{W}_L = [x_l \ y_l \ z_l \ 1]^T$ , 在右相机坐标系下的空间点齐次坐标矩阵为  $\mathbf{W}_R = [x_r \ y_r \ z_r \ 1]^T$ , 则可建立方程:

$$\begin{cases} z_l[u'_1 \ v'_1 \ 1]^T = \mathbf{K}_1 \mathbf{W}_L \\ z_r[u'_2 \ v'_2 \ 1]^T = \mathbf{K}_2 \mathbf{W}_R \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{K}_1$  和  $\mathbf{K}_2$  分别为左、右相机的内参矩阵。

同一空间点在左、右相机下的空间坐标关系为

$$\mathbf{W}_R = \mathbf{M} \mathbf{W}_L, \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{M}$  为左右相机外部参数矩阵。通过联立(1)、(2)式进行求解, 得到  $\mathbf{W}_L$ , 进而得到图像匹配点的空间三维坐标。光栅条纹投影可生成大量的密集匹配点, 对于这些匹配点全部进行重建, 可生成高密度表面轮廓点云。

### 3 基于纹理映射的缺陷像素定位

将由双目光栅投影重建系统生成的三维点云数据进行进一步网格化, 可得到待测物的轮廓模型。为实现基于图像的缺陷三维测量, 在此基础上需要附加一台彩色纹理相机以实现轮廓表面模型的纹理映射<sup>[26]</sup>。考虑到对于待测物全貌进行检测的需求, 需要引入一台转台实现多视角点云和图像信息的采集与匹配<sup>[27]</sup>。对于多视角采集拼接的点云, 在向多

幅图像的投影过程中, 需要遮挡并剔除不可见点。此外, 由于三维点云相比于图像像素更加稀疏, 投影点与纹理图像像素无法实现一一对应, 因此还需要考虑纹理像素的精确定位问题。综上所述, 完成三维模型表面全貌信息获取并实现缺陷定位需要进行的步骤如下:

1) 对相机内外参数的标定和对转台与相机位置关系的标定;

2) 获取不同转动角度下的纹理图像和点云数据, 实现点云向图像的纹理映射和遮挡点的剔除;

3) 对图像中感兴趣特征区域内的像素进行三维重建和定量评估。

#### 3.1 系统标定

通过张正友<sup>[28]</sup>棋盘格标定法对纹理相机和双目系统左相机进行立体标定, 可得到纹理相机内部参数和纹理相机与双目左相机坐标系的外部参数, 从而完成单幅图像的纹理映射。为获取待测物表面全貌信息, 需要通过转台带动待测物旋转并进行表面形貌重建, 附加转台的系统原理图如图 2 所示。通过标定转台转轴在左相机坐标系下的位置和方向, 可计算出绕轴旋转任意角度前后相机相对待测物的位姿, 从而将点云和纹理图像统一至同一坐标系下。

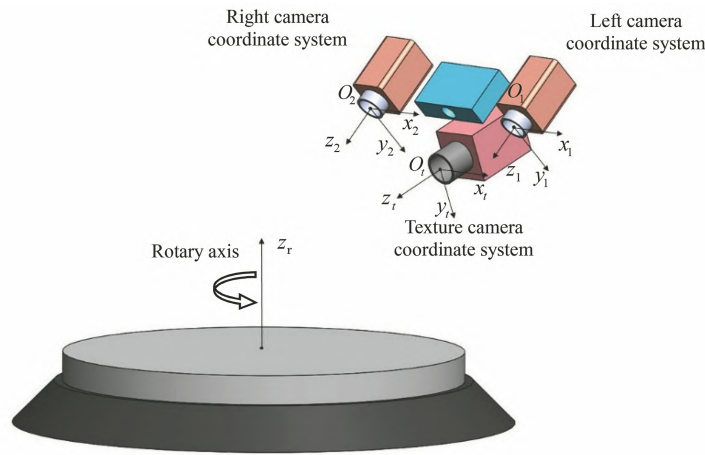


图 2 附加转台和纹理相机的三维重构系统

Fig. 2 3D reconstruction system with turntable and texture camera

在初始位置下, 将棋盘格标定板固定放置于转台之上, 用双目左相机拍摄多个位置标定板图像, 随后将标定板固定, 并控制转台旋转角度  $\alpha$ , 再次拍摄标定板图像, 结合此前拍摄的标定板其余图像数据进行标定, 可以分别得到转动前后标定板所在世界坐标系与左相机坐标系的转换关系, 即旋转向量

$\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$  和平移向量  $\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2$ 。根据文献[21]提出的旋转轴标定方法, 旋转轴在左相机下的空间直线的方向向量  $\mathbf{A}$  满足

$$\mathbf{T}_1 - \mathbf{T}_2 = (\mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1) \mathbf{A}, \quad (3)$$

控制旋转台转轴移动至多个位置并进行立体标定, 得到多组旋转矩阵和平移矩阵, 两两联立可得



$$\begin{bmatrix} T_2 - T_1 \\ \vdots \\ T_i - T_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 - R_2 \\ \vdots \\ R_j - R_i \end{bmatrix} A, \quad (4)$$

式中:  $i, j$  分别表示第  $i$  个和第  $j$  个旋转位置。求解出  $A$  所在的空间直线表达式, 可得到旋转轴方向向量  $V$ 、其对应的单位向量  $V_u$ , 以及旋转轴轴线上一点。标定完成后, 若转台和待测物绕轴转动的角度为  $\alpha$ , 对应旋转向量为  $\alpha V_u$ , 根据罗德里格斯变换得到旋转矩阵  $R_\alpha$ , 旋转前后的左相机外参转换矩阵<sup>[29]</sup>为

$$T_\alpha = A - R_\alpha A. \quad (5)$$

根据计算得到的变换参数, 可实现任意转角下点云数据向纹理图像的投影, 并将多个视角下纹理映射结果统一至同一坐标系下。

### 3.2 基于距离判据的遮挡点剔除

根据 3.1 节, 可建立起不同旋转位置下多组点云之间以及点云和纹理图像之间的映射关系。为保证纹理图像对点云的全覆盖, 采用先拼合再映射的方式将不同旋转角度下拍摄的点云数据转换至  $0^\circ$  所对应的左相机坐标系下, 以实现点云拼接, 生成待测物表面完整的点云  $c_1$ , 其对应初位置纹理图像  $p_1$ 。随后利用旋转轴参数将点云  $c_1$  分别变换至多个旋转位置下, 得到点云  $c_2, c_3, \dots, c_i$ , 对应的纹理

图像分别为  $p_2, p_3, \dots, p_i$ 。对每组点云进行纹理映射后可得第  $j$  个点云对应的像素坐标。由于拼接点云包含整周测量数据, 投影过程中可能会存在自遮挡, 导致部分被实际物体遮挡的区域被错误投影。因此提出一种基于距离约束的计算方法, 用于剔除错误投影点。对于点云  $c_i$  中投影至同一临近像素坐标  $(u, v)$  的三维点集  $c_{ip}$ , 查找  $c_{ip}$  中与纹理相机距离最小的一点  $P_{\min}$ , 定义距离为  $d_{\min}$ , 并设定距离阈值为  $d_{\text{thres}}$ , 点集  $c_{ip}$  中与距离相机  $d_{\min} + d_{\text{thres}}$  范围内的三维点被认为是可见的, 保留该点及其映射的颜色; 超出该范围的三维点被认为是被遮挡且错误匹配的, 剔除该点:

$$\begin{cases} t_{pj} = t(u, v) & |d_j - d_{\min}| \leq d_{\text{thres}} \\ t_{pj} = (0, 0, 0) & |d_j - d_{\min}| > d_{\text{thres}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $t_{pj}$  表示点云中第  $j$  个点的颜色值;  $t(u, v)$  表示位于  $(u, v)$  的像素颜色值;  $|d_j|$  表示第  $j$  个点与相机光心的距离。通过遍历图像像素, 对投影至每个像素附近的点云进行遮挡判断, 可实现对整体点云的遮挡剔除。图 3 给出了基于本方法进行遮挡判断的纹理映射效果, 其中给定的距离阈值  $d_{\text{thres}} = 1.5 \text{ mm}$ , 邻域范围为以目标点为中心的  $11 \times 11$  个像素的矩形区域。

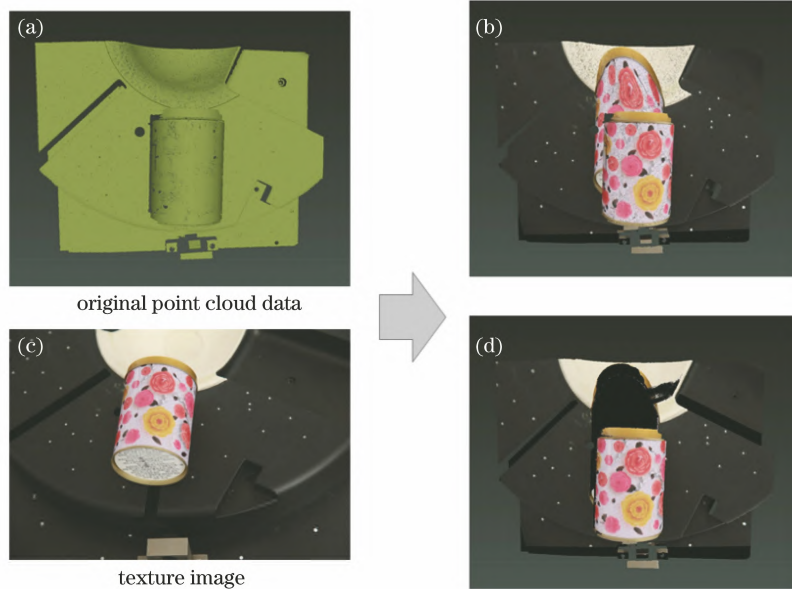


图 3 进行遮挡判断的纹理映射前后效果对比。(a)原始点云数据;(b)直接映射结果;(c)纹理图像;(d)遮挡判断后的映射结果(剔除点表示为黑色)

Fig. 3 Comparison of effect of texture mapping before and after occlusion judgment. (a) Original point cloud data; (b) direct mapping result; (c) texture image; (d) mapping result after occlusion judgment (eliminated points are displayed in black)

### 3.3 缺陷区域像素的定位与重构

投影过程中, 三维点投影至图像后对应的二维像素坐标并非整数, 对于纹理图像中感兴趣的像素

点, 无法通过直接查找映射关系获取对应的三维坐标。为了实现图像像素到三维坐标的反向计算, 需要结合已有的三维坐标点投影信息。本文建立了一

种四象限邻近点搜索算法,可实现目标像素临近三维投影点的查找,并对搜索到的临近三维点云投影点进行线性插值,从而通过计算得到目标像素点的三维坐标值。分割与查找方法如图 4 所示。以目标像素点为原点建立坐标系,分别在原点,  $x$ 、 $y$  轴方向,以及 4 个象限中按照给定的搜索框尺寸逐像素查找投影至区域内的三维点索引,并根据找到的点索引序号查找其精确的二维投影坐标,分别找到 4

个象限中距离目标点最近的投影点,将找到的 4 个点与目标点距离的倒数作为权重。第  $j$  个点的权重系数可表示为

$$w_j = \frac{1/d_j}{\sum_{n=1}^4 1/d_n}, \quad (7)$$

式中:  $d_n$  表示感兴趣像素与第  $n$  个象限中最近的像素的距离。

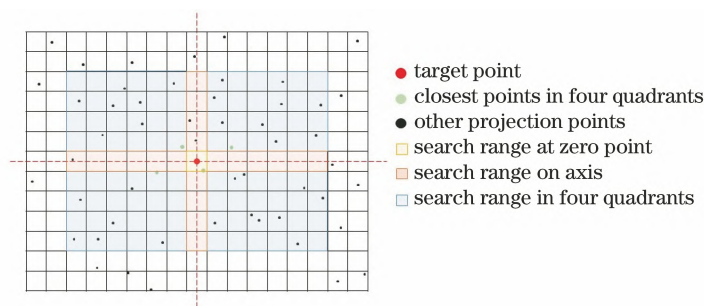


图 4 查找临近四点分割与搜索方式

Fig. 4 Segmentation and search method of finding four closest points

根据权重系数对 4 个投影点对应的三维坐标进行加权平均,完成感兴趣像素点空间三维坐标的线性插值计算:

$$p = \sum_{j=1}^4 w_j p_j, \quad (8)$$

式中:  $p_j$  表示第  $j$  个相邻点;  $p$  表示待求像素点。像素点到空间三维点的转换如图 5 所示。

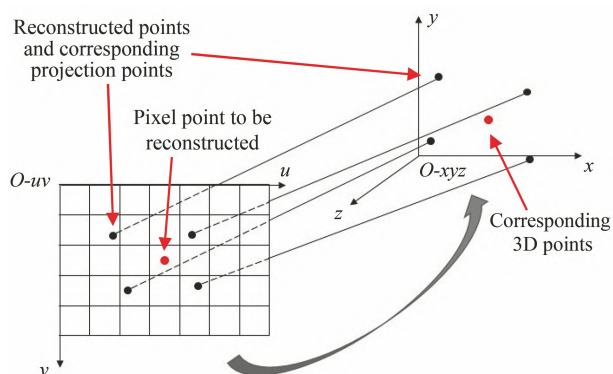


图 5 选定图像像素点到空间点的转换

Fig. 5 Conversion of selected image pixels to spatial points

为减少搜索时间,提出的搜索方式如下:搜索从原点开始进行,若在原点所在的搜索范围内找到最近投影点,查找该点所在的象限,认为已找到该象限内的最小距离点,不再查找对应象限的矩形范围;若在原点所在的搜索范围内找到相邻两象限中的两个最近投影点,则对两象限所夹的轴方向对应的搜索范围也不再进行查找。利用该方案对图像中轮廓圈出的感兴趣区域进行重建,可获得与缺陷在图片中

的分辨率相一致的三维点云,并实现像素点三维坐标的精确定位。此外,由于光栅投影对于物体表面深色区域的重建效果较差,产生的点云十分稀疏,选取较大的搜索矩形,基于点云插值实现对于该类型区域中缺陷三维坐标的计算。

## 4 实验与精度验证

本文采用 GOM 公司的 ATOS TripleScan 设备进行双目光栅投影重建,系统包含两台工业相机(分辨率为  $3296 \times 2472$ )、一个蓝光投影仪,以及两个定位激光器。附加一台 Canon EOS 400D 单反相机进行纹理特征提取,相机分辨率为  $2592 \times 1728$ 。系统结构如图 6 所示。

采用棋盘格标定板实现多相机内外参数的标定。对于旋转轴标定,将棋盘格标定板置于转台上,

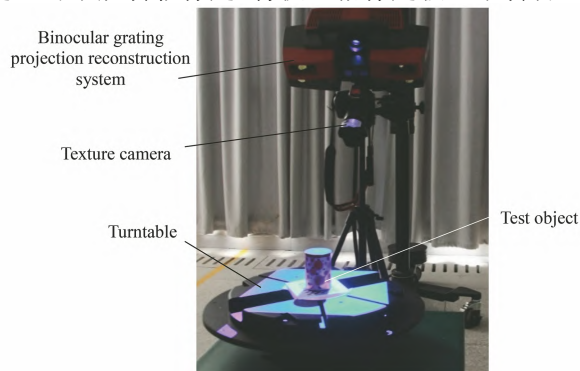


图 6 测量系统结构

Fig. 6 Measurement system structure

从  $0^\circ$  开始,以  $36^\circ$  为间隔旋转一周,共拍摄 10 个位置的图像并进行转轴空间位置解算。标定完成后,将待测物放置于转台上,从  $0^\circ$  开始,以  $20^\circ$  为间隔旋转物体,构建点云并拍摄纹理图像,对多幅图像中的缺

陷轮廓进行标注以验证由图像缺陷轮廓到三维点云重建的效果。实验中选用的待测物以及缺陷序号如图 7 所示。针对表面缺陷的定量评估,分别从缺陷基本尺寸、相对位置和面积三个方面进行实验验证。

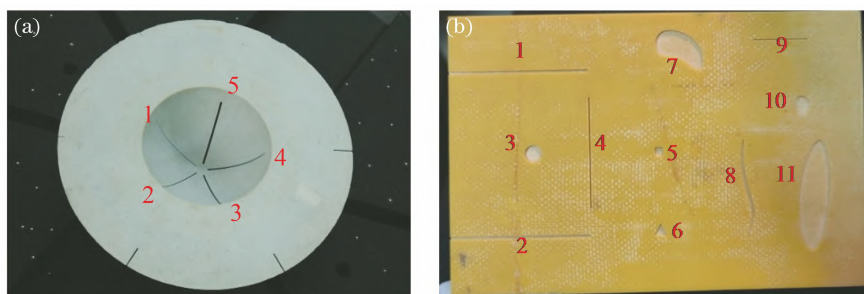


图 7 两种实验待测物及其缺陷标号。(a)待测物 1;(b)待测物 2

Fig. 7 Two kinds of test objects and their defect labels. (a) Test object 1 ; (b) test object 2

对待测物 1 表面内壁的 5 个刻痕宽度进行重建和测量以验证提出的基于图像重建的方法对缺陷基本尺寸的计算精度,位于中间区域的刻痕由细到粗沿逆时针方向分布,分别记为缺陷 1~缺陷 5。通过找到对应图像中刻痕所在的像素区域,采用本文 3.3 节提出的搜索和插值方法对内部像素点进行三维重建,并与文献[23]中搜索点云中位于缺陷轮廓内部三维点的方案进行比较,重建结果如图 8 所示。可以看出,相比于双目光栅投影三维测量设备直接扫

描得到的点云,本文方法重建出的缺陷点云密度更大,并且具有更加整齐的边缘,能够进一步提升测量准确性。随后,在图像中缺陷长度方向上均匀选取不同测量位置,在选取位置的左右边缘处各选一点,重建两点的三维距离作为缺陷宽度,并与 Hexagon OPTIV ADVANCE 影像测量仪得到的缺陷宽度进行比较,测量数据如图 9、表 1 所示。在本实验所用的硬件设备条件下,本文方法对于表面缺陷尺寸的测量误差小于 0.2 mm。

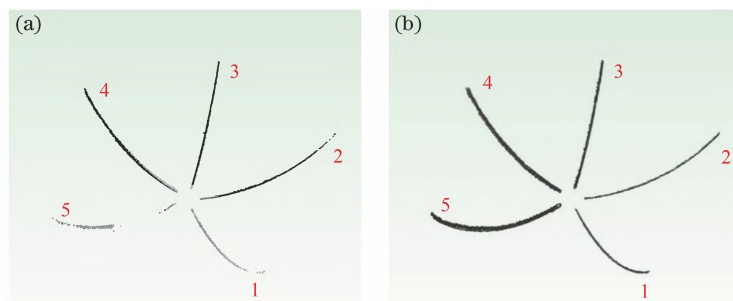


图 8 对待测物 1 内壁上 5 条划痕的重建结果。(a)本文提出的插值方法获得的重建结果;  
(b)通过直接查找轮廓内点云获得的重建结果

Fig. 8 Reconstruction results of 5 scratches on the inner surface of the test object 1. (a) Reconstruction result obtained by the interpolation method proposed in this paper ; (b) reconstruction result by using the method of direct searching to find the point cloud in the contour

表 1 缺陷宽度测量数据及误差

Table 1 Defect width measurement data and error

Defect serial number	Width measured by image measurement instrument /mm	Average width measured by method in this paper /mm	Max error /mm	Average error /mm
1	0.643	0.715	0.113	0.072
2	0.906	0.968	0.167	0.090
3	1.308	1.342	0.127	0.109
4	1.481	1.558	0.123	0.086
5	1.722	1.761	0.091	0.041



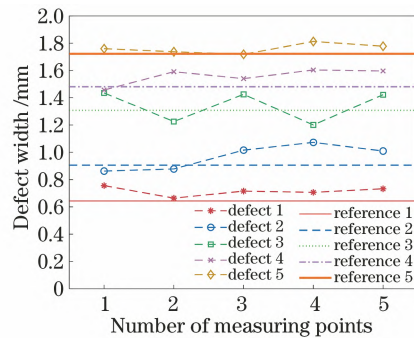


图 9 测得缺陷宽度与影像测量仪所得结果的对比

Fig. 9 Comparison of measured defect widths and results of image measurement instrument

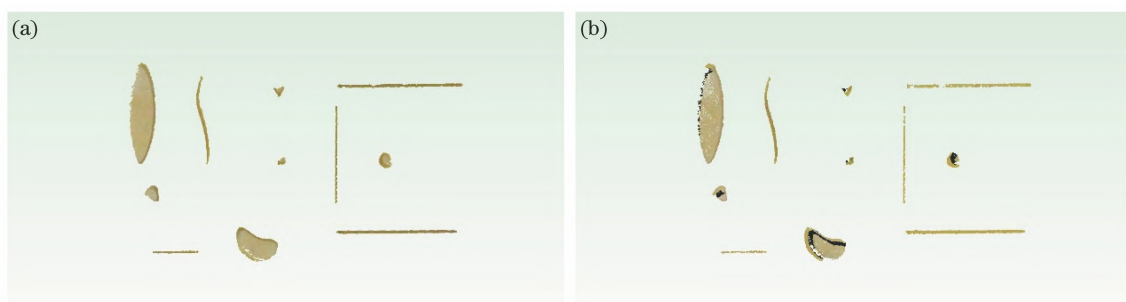


图 10 待测物表面缺陷的重建结果。(a)采用点云插值后的重建结果;(b)通过直接查找轮廓内点云得到的重建结果

Fig. 10 Reconstruction results of surface defects of test object. (a) Reconstruction result after point cloud interpolation; (b) reconstruction result obtained by using method of direct searching point clouds in contour

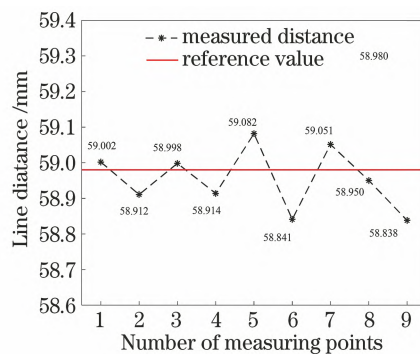


图 11 缺陷距离测量数据及误差

Fig. 11 Defect distance measurement data and error

采用待测物 2 表面刻有的缺陷进行缺陷面积和相对位置的重建实验,结合通过图像标注的缺陷轮廓实现三维重建,重建效果如图 10 所示。对于刻线 1 和刻线 2,采用 Hexagon OPTIV ADVANCE 影像测量仪获取二者的间距,将其作为标准值,随后从图像中提取两刻线的中轴线上相同长度位置处的像素点,利用本文方法重建对应的三维坐标,将计算得到的两点间距作为测得的距离值。均匀选取中轴线方向上不同位置的 9 个点进行测量并将其与标准值进行对比,得到的测量数据如图 11 所示,数据表明本文方法对于缺陷相对位置的测量误差不超过 0.2 mm。

对其他缺陷的重构点云进行网格化后,计算面积,并与加工时确定的标准面积以及不插值得到的结果进行比对,面积计算结果如表 2 所示。由于缺陷 7,8,10,11 为任意形状,其具体面积难以测算,以“/”表示。通过表 2 数据可得,相比于通过直接查找轮廓内点云得到的重建结果,经过插值后的结果能够更真实地反映缺陷三维形貌,从而得到更加准确的测量值。对于线状缺陷,由于其宽度误差对面积值的影响较大,因此其结果相比于块状缺陷较不稳定,显示为编号 4 的线状缺陷面积测量结果误差较大。

表 2 模拟缺陷面积测量结果

Table 2 Simulated defect area measurement results

Defect serial number	1	2	3	4	5	6
Theoretical value /mm <sup>2</sup>	30.000	30.000	19.635	8.000	4.000	3.897
Interpolation area /mm <sup>2</sup>	28.970	24.221	15.143	3.201	3.657	4.321
No interpolated area /mm <sup>2</sup>	24.119	14.737	13.641	2.543	1.758	1.194
Defect serial number	7	8	9	10	11	
Theoretical value /mm <sup>2</sup>	/	/	5.000	/	/	
Interpolation area /mm <sup>2</sup>	105.716	12.412	5.022	18.957	198.860	
No interpolated area /mm <sup>2</sup>	97.463	8.801	2.974	15.955	229.853	

## 5 结 论

本文针对工业检测中对于表面特征或缺陷的定量分析问题,提出了一种结合双目光栅投影三维重建系统和纹理映射的高精度测量方法,实现了图像中缺陷像素精度的三维测量。通过在 GOM ATOS 三维重建系统中附加一台纹理相机,建立了点云与图像像素的映射。通过对高精度转台的旋转轴进行标定,完成了多视角下转台与测量系统位姿关系的确定,并利用矩形搜索范围内的距离判据来进行每个位置下的遮挡点剔除,消除了纹理错误映射。随后,为进一步提升三维测量精度,对图像中获取的兴趣区域像素进行四象限临近点搜索。根据搜索到的四个邻近点,利用基于距离加权平均的线性插值方法获取像素对应的三维坐标,实现了基于图像像素的三维测量。实验中分别对模拟缺陷宽度、相对位置和模拟缺陷面积进行了测试,宽度与位置测量结果表明,在实验设备硬件条件下本文提出的方法对于缺陷尺寸和距离的测量误差不超过 0.2 mm。面积计算结果表明,相比于直接获取缺陷图像轮廓内的原始三维点数据,插值方法能够生成更高密度且边缘更整齐的点云数据,使得点云网格化后的面积计算结果更接近缺陷的真实面积。若进一步结合机器视觉和图像处理算法,可完成中小型工业产品的表面缺陷三维参数的自动定量测量与分析。

## 参 考 文 献

- [1] Janai J, Güney F, Behl A, et al. Computer vision for autonomous vehicles: problems, datasets and state of the art [M]. New York: Now Foundations and Trends, 2020: 115-186.
- [2] Deng Y, Yang J L, Xu S C, et al. Accurate 3D face reconstruction with weakly-supervised learning: from single image to image set [C]// 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), June 16-17, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 285-295.
- [3] Agarwal S, Furukawa Y, Snavely N, et al. Building Rome in a day[J]. Communications of the ACM, 2011, 54(10): 105-112.
- [4] Zhang Z J, Cheng X J, Cao Y J, et al. Application of 3D reconstruction of relic sites combined with laser and vision point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1110001.
- 张子健, 程效军, 曹宇杰, 等. 结合激光与视觉点云的古遗迹三维重建应用[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1110001.
- [5] Smith M W, Carrivick J L, Quincey D J. Structure from motion photogrammetry in physical geography [J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2016, 40(2): 247-275.
- [6] Li B W, Zhang S. Novel method for measuring a dense 3D strain map of robotic flapping wings[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(4): 045402.
- [7] Zhu S P, Gao Y. Noncontact 3-D coordinate measurement of cross-cutting feature points on the surface of a large-scale workpiece based on the machine vision method [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(7): 1874-1887.
- [8] Zheng T X, Huang S, Li Y F, et al. Key techniques for vision based 3D reconstruction: a review[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(4): 631-652.  
郑太雄, 黄帅, 李永福, 等. 基于视觉的三维重建关键技术研究综述[J]. 自动化学报, 2020, 46(4): 631-652.
- [9] Tong S, Xu X G, Yi C T, et al. Overview on vision-based 3D reconstruction[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(7): 2411-2417.  
佟帅, 徐晓刚, 易成涛, 等. 基于视觉的三维重建技术综述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(7): 2411-2417.
- [10] Xiao Y. Research and implementation of key technologies for three-dimensional measurement of grating projection structured light [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2019: 9-10.  
肖媛. 光栅投影结构光三维测量的关键技术研究是实现[D]. 太原: 太原科技大学, 2019: 9-10.
- [11] Qiu Y C. Key technology research of binocular grating projection [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2015: 9-19.  
邱运春. 双目光栅投影关键技术研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015: 9-19.
- [12] Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0800001.  
郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0800001.
- [13] Pu T T, Wu Z J, Zhang Q C. Dynamic three-dimensional measurement technology based on gray code and phase-shifting algorithm [J]. Acta Optica



- Sinica, 2021, 41(5): 0512001.
- 浦婷婷, 吴周杰, 张启灿. 基于格雷码和相移算法的动态三维测量技术[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0512001.
- [14] Hirschmuller H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2): 328-341.
- [15] Zhang Q P, Cao Y. Research on three-dimensional reconstruction algorithm of weak textured objects in indoor scenes[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0810017.
- 张庆鹏, 曹宇. 室内场景下弱纹理物体三维重建算法的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0810017.
- [16] Yang F, Ding X J, Cao J. 3D reconstruction of free-form surface based on color structured light[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0212001.
- 杨帆, 丁晓剑, 曹杰. 基于彩色结构光的自由曲面三维重建方法[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0212001.
- [17] Shen H, Li S X, Gu D Y, et al. Bearing defect inspection based on machine vision [J]. Measurement, 2012, 45(4): 719-733.
- [18] Do Y, Lee S, Kim Y. Vision-based surface defect inspection of metal balls[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(10): 107001.
- [19] Liu X M, Liu X L, Yin Y K, et al. Texture blending of 3D photo-realistic model[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(11): 1440-1446.
- 刘星明, 刘晓利, 殷永凯, 等. 真实感三维模型的纹理融合[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(11): 1440-1446.
- [20] Zhao L J. Research on 3D point cloud intelligent evolutionary registration and surface texture mapping method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018: 41-47.
- 赵琳敬. 三维点云智能进化拼接与表面纹理映射方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2018: 41-47.
- [21] Li X, Ge B Z, Luo Q J, et al. Acquisition of camera dynamic extrinsic parameters in free binocular stereo vision system[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(10): 2888-2894.
- 李肖, 葛宝臻, 罗其俊, 等. 自由双目立体视觉摄像机动态外参数的获取[J]. 计算机应用, 2017, 37(10): 2888-2894.
- [22] Du R J, Ge B Z, Chen L. Texture mapping of multi-view high-resolution images and binocular 3D point clouds[J]. Chinese Optics, 2020, 13(5): 1055-1064.
- 杜瑞建, 葛宝臻, 陈雷. 多视高分辨率纹理图像与双目三维点云的映射方法[J]. 中国光学, 2020, 13(5): 1055-1064.
- [23] Zong Y L, Liang J, Wang H, et al. An intelligent and automated 3D surface defect detection system for quantitative 3D estimation and feature classification of material surface defects [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 144: 106633.
- [24] Huang G, Liu Z, van der Maaten L, et al. Densely connected convolutional networks [C]// 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 2261-2269.
- [25] Song L M, Wang D N. A novel grating matching method for 3D reconstruction [J]. NDT & E International, 2006, 39(4): 282-288.
- [26] Liu L Y, Stamos I. Automatic 3D to 2D registration for the photorealistic rendering of urban scenes[C]// 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), June 20-25, 2005, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2005: 137-143.
- [27] Fuhrmann S, Langguth F, Moehrle N, et al. MVE: an image-based reconstruction environment [J]. Computers & Graphics, 2015, 53: 44-53.
- [28] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [29] He Q F. Principles of computer graphics and algorithms [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 94-96.
- 和青芳. 计算机图形学原理及算法教程[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2010: 94-96.