

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107665

基于结构光的深孔零件内表面单视角三维重建

潘 硕 邵新杰 唐香珺 李晓磊 宋 彬

(中国人民解放军陆军工程大学 石家庄校区 车辆与电气工程系 石家庄 050003)

摘 要: 针对深孔类零件内表面三维测量问题,提出了一种新型深孔类零件内表面三维重建算法。该方法使用远心镜头和多线结构光发生器获取深孔类零件内表面的结构光图像,结合深孔零件的形态特征,建立了基于柱坐标系的远心镜头三维投影模型,并利用图像的偏移量计算测量点的半径,并在此模型上获取测量图像的三维重建点云。实验结果表明,该方法在 155 mm 直径的深孔测量中均方根误差在 0.03 mm 以内,测量精度满足系统要求,为精确分析深孔零件内表面状态提供了数据基础。

关键词: 单目视觉;结构光;三维重建;深孔测量

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Single-view 3D reconstruction of the inner surface of deep-hole parts based on structured light

Pan Shuo Shao Xinjie Tang Xiangjun Li Xiaolei Song Bin

(Vehicle and Electrical Engineering Department, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Aiming at the problem of three-dimensional measurement of the inner surface of deep-hole parts, this paper proposes a new three-dimensional reconstruction algorithm for the inner surface of deep-hole parts. This method uses a telecentric lens and a multi-line structured light generator to obtain structured light images of the inner surface of deep-hole parts, combined with the morphological characteristics of deep-hole parts, establishes a three-dimensional projection model of a telecentric lens based on a cylindrical coordinate system, calculate the radius of the measurement point with the offset in image, and the 3D reconstruction point cloud of the measurement image is obtained on this model. The experimental results show that the root-mean-square error of this method is within 0.03 mm in the measurement of a deep hole with a diameter of 155 mm, and the measurement accuracy meets the requirements of the system, which provides a data basis for accurately analyzing the state of the inner surface of deep-hole parts.

Keywords: monocular vision; structured light; 3D reconstruction; deep-hole measurement

0 引 言

火炮身管、反后坐装置、发动机气缸等深孔类零件的内表面形态变化情况与装备的技术状态有着紧密联系。对零件表面进行三维重建,精确检测深孔零件内表面状态,对预测火炮身管剩余寿命,掌握缸套内壁磨损规律,复杂深孔类零件的质量监测和故障诊断有重要意义^[1]。传统的深孔类零件内表面检测方法主要为接触式测量手段,测量效率低,无法反映零件内表面三维特征,并且容易对其表面造成二次损伤,利用结构光原理的非接触测量方法能够实现自动化高速测量,因此在深孔类零件内表面测量中有良好的应用前景^[2-4]。

目前,在深孔类零件内表面测量研究中,国内外学者针对不同应用场景普遍采用了圆结构光的测量方案^[3-7]。该方案在投影时投射出锥形光路,能够通过解算相机拍摄的图片得到光路上的三维信息,但是该方法仅能测量单线轮廓。为了追求更高的测量效率,很多学者采用了其他原理的光电测量手段,Almaraz-Cabral等^[8]应用条纹投影原理采集不同相位的图像,对深孔类零件进行了三维重构,与单线的圆结构光测量相比拥有更大的测量范围。Yokota等^[9]将多波长数字全息技术应用到深孔类零件检测中,可以恢复管道内表面的三维轮廓,并且多波长成像在检测内壁缺陷上有着独特的优势。但在以上几种测量方法中,用于图像采集的 CCD 相机都是平行于深孔类零件轴线放置,

收稿日期:2021-08-21

在测量过程中不需要通过旋转来获取整个周向的三维信息,但是成像效果最佳的图像中心包含的可供分析信息较少,在精密分析其表面状态时需要图像进行展开,实际的三维重建分辨率较低,评估深孔内表面状态时存在局限性^[10]。

近年来,线结构光和多线结构光测量技术的发展^[11-12]为多线结构光测量平台集成到深孔零件测量场景中提供了新的可能,文献[4]在进行深孔内表面凹槽高度检测时采用了一种新的结构,系统由线激光发射器、平面反射镜和 CCD 相机组成,CCD 相机通过反射镜采集激光发射器投射到身管内壁上的结构光图像,垂直于管壁成像,并通过线性拟合实现了深孔内表面凹槽深度的精确量化。本文在文献[4]搭建的系统基础上提出了深孔内表面重建的优化算法,通过建立柱坐标系下的远心镜头成像模型,结合深孔零件的几何特征,实现了基于标定筒的标定,同时建立图像偏移量与内径深度的比例推算关系实现了深孔类零件内表面的三维重建,为进一步分析深孔内表面参数提供了较为全面的数据基础。

1 测量原理

1.1 系统结构

本文阐述的深孔类零件内表面测量系统结构如图 1 所示,该系统由激光发生器、结构光栅、两个平面反射镜、远心镜头、CCD 相机及外部承载机构组成。系统工作时,激光发生器投射出的多线结构光经反射镜 1 投射到深孔零件内表面上,另一端的 CCD 相机通过反射镜 2 拍摄得到多线结构光与身管内壁形成的光条图像。计算机对采集到的结构光图像进行处理,通过三维重建算法得到身管内壁的三维点云。

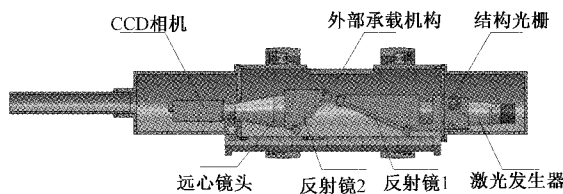


图 1 图像采集系统结构

1.2 成像模型

远心镜头的成像光线平行于主光轴,其成像过程为平行投影,即成像物体沿相机主光轴方向按一定的比例正交投影于相平面。与传统镜头相比,远心镜头成像接近零失真、景深大,被广泛应用于精密测量成像^[13]。远心镜头成像的数学模型如图 2 所示,其中 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系, $O_c - X_c Y_c Z_c$ 为相机坐标系, $o - uv$ 为图像坐标系远心镜头的成像过程为空间测量点在世界坐标系统的坐标转换到相平面坐标系的过程。

在测量过程中,设在世界坐标系中光平面上的一点 $P = (X_w, Y_w, Z_w)^T$,其在图像坐标系中的投影点为

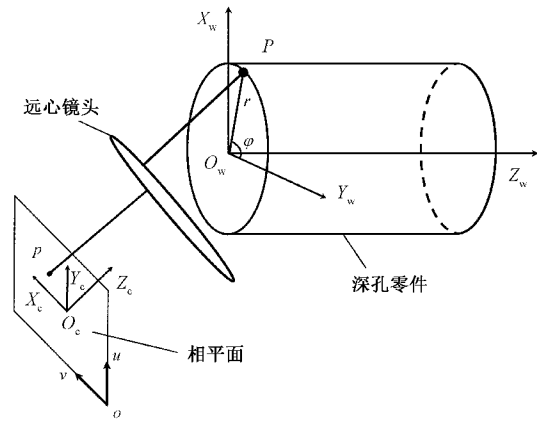


图 2 远心镜头成像模型

$p = (u, v)^T$,根据仿射摄像机投影数学模型有:

$$p = M_{2 \times 3} P + t \tag{1}$$

其中, $M_{2 \times 3}$ 为仿射摄像机投影模型的映射矩阵, $t = (t_1, t_2)^T$ 为中心像素的偏移坐标,即:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} \tag{2}$$

在进行深孔类零件测量时,本文将世界坐标系定义在柱坐标系下,其内表面内一点 $P = (X_w, Y_w, Z_w)^T$ 可通过柱坐标 $(r, \varphi, z)^T$ 表示为 $P = (r \sin \varphi, r \cos \varphi, z)$,则式(2)转化为:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} r \sin \varphi \\ r \cos \varphi \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} \tag{3}$$

1.3 三维重建

如图 3 所示为测量系统经反光镜折射的等效光路,在进行测量时,结构光源投射出的线结构光被不同内径的圆柱表面调制,形成光条截断偏移的图像。其内径变化量 Δr 与对应结构光条像素偏移距离 Δp 之间呈线性关系^[14]。测量过程中,设置一个参考内径,提取参考内径上成像的结构光曲线,在进行实际测量时,被测位置的内径 r 则可以通过测量点与参考曲线之间的偏移像素 Δp 求出。

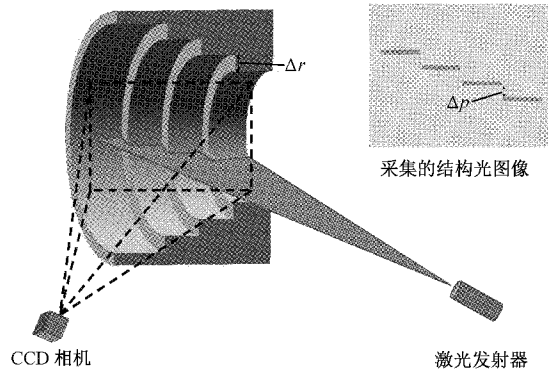


图 3 测量原理

图像中光条上一点 p 的 r 值通过图像比例反推算法确定之后,将 $p=(u, v)^T$ 代入式(3),式中只有 φ 和 z 两个未知数,由式(3)可得出两个方程,在标定得出 $M_{2 \times 3}$ 与 t 后,通过非线性方程求解可得到其在柱坐标系中的 φ 和 z 。因此,通过在测量系统中设置多线结构光可以实现被测表面的三维重建。

2 系统标定

为获取较高精度的三维重建结果,需要对系统参数进行标定,其中包括远心镜头标定、参考柱面曲线标定和图像比例反推系数标定。

为实现系统标定,本文设计研制图 4 所示标定筒。

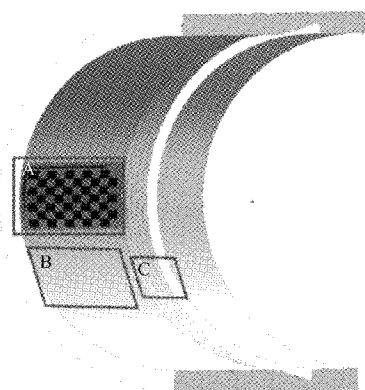


图 4 实验用标定筒

标定实验区域主要分为 3 个部分,A 区域:紧附柔性标定靶面部分。由于深孔零件空间限制,在其内表面直接加工提供特征点难以保证精度和具体的坐标,因此标定靶面在标定实验中使用柔性靶面,易于加工,在标定曲面上能够提供特征点精确的三维坐标。B 区域:半径为 77.5 mm 的参考柱面,C 区域:半径分别为 77.5、78.5、79.5、80.5 mm 的阶梯状圆柱面。其中区域 A 用于远心镜头标定,区域 B 用于参考柱面曲线标定,区域 C 用于图像比例反推系数标定。

2.1 远心镜头标定

远心镜头的畸变很小,常用在一些精密二维检测中,其放射性失真度可小于 0.1%,在图像中造成的提取光条中心偏移有限,因此忽略远心镜头的畸变,采用直接线性标定法对远心镜头进行标定。根据式(3),一组已知图像精确坐标和世界坐标的点可以得到两个方程,其中 $M_{2 \times 3}$ 与 t 共包含 8 个未知量,至少需要 4 组点的精确坐标才可以标定出 $M_{2 \times 3}$ 与 t 。

为获取点 P 在世界坐标系中的精确坐标,本文结合管道检测使用场景,使用图 4 所示的实验标定筒,将棋盘格打印在柔性平面上,将其紧密贴附于具有精确内径的圆筒内表面。棋盘格的 x 轴对应圆筒内表面的周向, y 轴对应其内表面的轴向,单个棋盘格大小为 $s \times s$,圆筒内表面半径为 r ,设棋盘格上一点为原点,其角点间隔用柱坐标 $\Delta\varphi$

和 Δz 表示为:

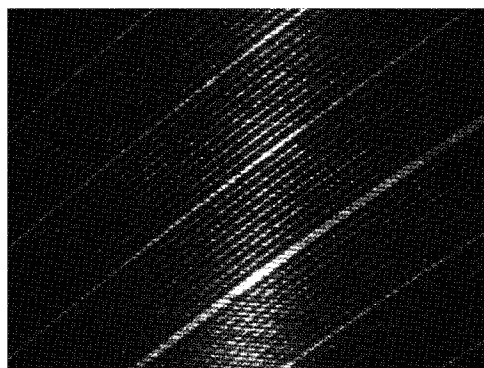
$$\begin{cases} \Delta\varphi = s/r \\ \Delta z = s \end{cases} \quad (4)$$

提取 $n(n \geq 4)$ 个棋盘格角点坐标 $p_i=(r, \varphi_i, z_i)^T$, $i=1, 2, \dots, n$,代入式(3),即可以求出 M 和 t 。

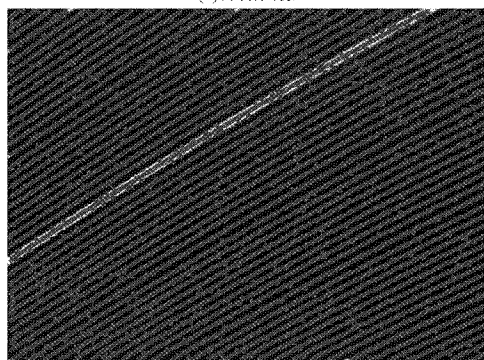
2.2 参考柱面曲线标定

本文测量系统主要应用场景为直径 155 mm 的管道内表面测量,故将光条在 155 mm 直径的标准圆筒中的位置作为参考柱面。空间中不同的激光平面与参考柱面相交形成的曲线在采集的图像中映射为对应的二维光条曲线,在标定实验中提取参考柱面对应光条的二维曲线,计算实际被测光条上的点与参考曲线的偏差,在三维重建时便可以通过图像比例反推算法求取对应点的 r 值。参考柱面曲线标定的图像处理步骤如下。

步骤 1:提取光条中心。采集到的参考柱面的结构光图像如图 5 (a) 所示,提取光条中心就是提取结构光条在图像中的中心坐标,即 (u, v) 。对光条图像进行阈值处理,将光条背景区域设为 0,将光条主体与背景分隔开。通过 Steger 法^[15] 提取出结构光条主体的中心坐标,提取结果如图 5 (b) 所示。



(a) 原始图像



(b) 光条中心提取结果

图 5 光条中心提取结果

步骤 2:光条中心分类编号。步骤 1 中提取的结构光条中心为离散的图像坐标,对坐标值进行分类编号使其与光条一一对应。激光发射器发出的结构光透过光栅形成 3 种类型光条:定位光条、计数光条和测量光条。如图 6 所

示,对光条进行编号时,将定位光条编号记为0,将定位光条左侧的点集编号为1,2,⋯,将定位光条右侧的点集编号为-1,-2,⋯。在图像编号过程中,首先将所有的光条编号聚类生成光条中心坐标点集,再通过图像灰度和光条宽度识别出定位光条中心坐标的点集,并通过计算所有光条点集对定位光条的距离,从而实现光条点集的自动编号。

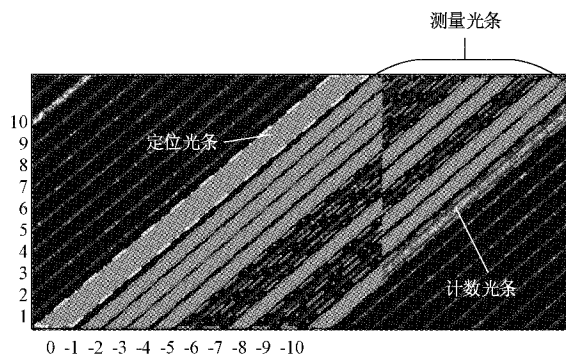


图6 光条分类及编号

步骤3:曲线拟合。步骤2求出不同编号的光条中心坐标后,采用最小二乘法对各白编号的点集进行曲线拟合,本文在曲线拟合中将目标曲线设为二次曲线,得到每个编号光条对应的二次曲线,作为索引数据存储在计算机中。

2.3 图像比例反推系数标定

为获取所测区域的内径,需要对图像比例转换系数 $q = \Delta p / \Delta r$ 进行标定,本文采集标定筒不同内径区域的测量图像,采用如下步骤进行图像比例反推系数标定。

步骤1:拍摄不同内径区域的测量图像,按照2.2节中步骤1和2对不同内径的图像区域内的光条提取中心并进行分类编号。

步骤2:从2.2节的标定数据中调用参考内径曲线数据,求取不同内径区域上对应光条中心点到参考内径曲线的平均距离。

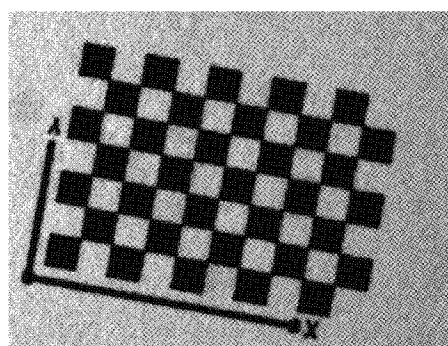
步骤3:标定计算,通过多组 Δr 和 Δp 值的对应关系,通过最小二乘算法求取相应的图像比例反推系数 q 的最优解。

3 实验测试

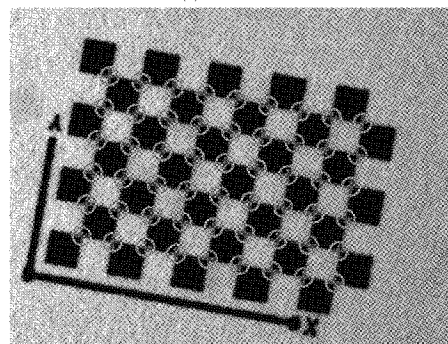
本文测量系统采用 BX-T0.3X110 远心镜头, TXG03 工业相机和 BX-PT20V5 半导体绿光激光光源,在实验过程中对提出标定模型参数进行标定,获取实验过程中所需要的参数数值,最后通过测量实验对实验凹坑进行了点云重建,验证本文提出算法的有效性。

3.1 M 和 t 的标定

在远心镜头投影参数标定实验中设置平面靶棋盘格大小为 $7 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,将打印好的棋盘平面靶附于标定筒上,不打开线结构光投射器,对相机参数 M 和 t 进行标定,其拍摄的图像如图7(a)所示。



(a) 原始图像



(b) 角点提取结果

图7 标定靶面图像处理

提取棋盘格图像角点,将靶面左下角提取的第1个角点设为原点 $O = (77.5, 0, 0)^T$,在靶标中,考虑到柔性靶面的厚度,测量柔性平面靶标厚度为 0.101 mm ,取 $r = 77.396 \text{ mm}$, $\Delta\varphi = 1/155 \text{ rad}$, $\Delta z = 1 \text{ mm}$ 。提取的角点坐标如图7(b)所示,将提取的角点坐标和对应的柱状坐标代入式(3),通过第2节中的方法求出 M 和 t :

$$M = \begin{bmatrix} 46.6527 & 4.3709 & 8.3944 \\ 8.5023 & 0.0555 & -46.5132 \end{bmatrix}, t = \begin{bmatrix} -234.1458 \\ 328.8864 \end{bmatrix}$$

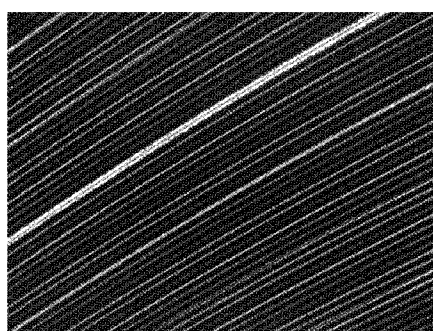
3.2 参考柱面曲线标定

在标定实验中采集标定筒的B区域,采集激光发射器测量标定筒的结构光图像,按照2.2节中的方法步骤标定光条初始位置曲线。图8(a)为参考内径图像上提取的光条曲线中心,每个光条对应不同的二次曲线,如图8(b)所示为 uv 坐标系下标定二次曲线的图像,不同光条中心标定的关于 uv 坐标的二次曲线系数被拟合求解,并被保存在计算机中。进行三维测量时,求取测量点到相应编号二次曲线的距离可以得出该点在柱状坐标系中的实际半径 r 。

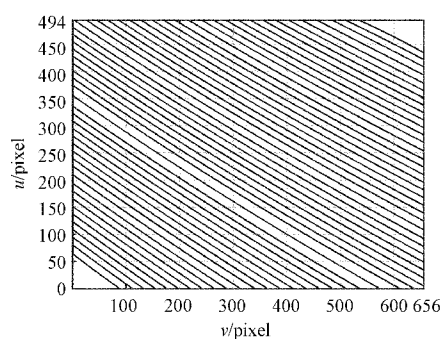
3.3 图像比例反推系数标定

按照2.3节中的方法对测量系统进行图像比例反推系数标定,在标定筒C区域分别采集被调制的结构光条纹图像,求取光条中心坐标相对于参考内径光条曲线偏移量的平均值如表1所示。在测量过程中,根据表1中的数据最终确定反推系数 $q = 26.8869 \text{ pixel/mm}$ 。

对标定区域进行三维重建结果如图9(a)所示,不同内径区域测量点的半径如图9(b)所示,其中3个区域的半径

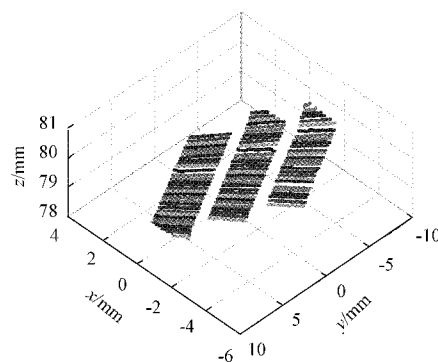


(a) 曲线在图像中的位置

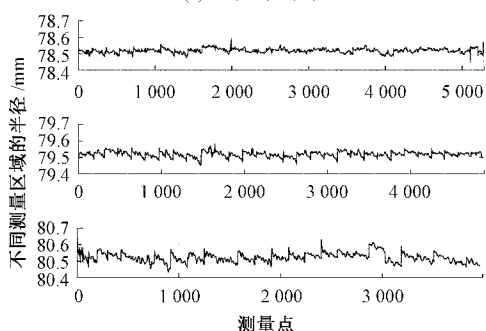


(b) uv 坐标系中的标定曲线

图 8 参考柱面曲线标定结果



(a) 三维重建结果



(b) 不同区域上被测量点的半径

图 9 不同内径区域的重建结果

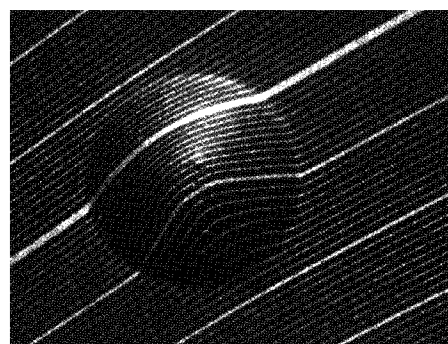
表 1 不同光条在标定筒不同区域的偏移量

像素偏移量/ pixel	标定筒中不同区域/mm			
	78.5	79.5	80.5	
光条编号	1	26.914 7	52.676 3	79.902 3
	2	26.859 1	52.228 6	79.533 2
	3	27.218 9	53.310 9	80.245 1
	4	27.434 8	52.528 4	79.620 1
	5	27.916 4	54.463 6	80.059 8
	6	27.778 0	54.370 2	80.801 8

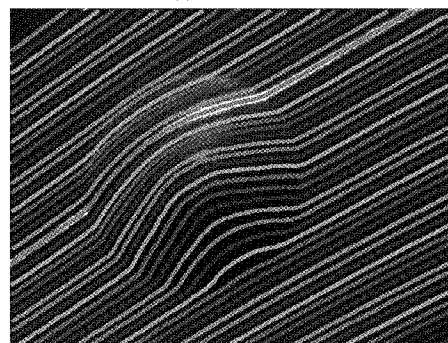
均值分别为 78.518 8、79.520 0、80.523 2 mm, 3 个区域的测量均方根误差分别为 0.013 1、0.016 1、0.028 0, 精度满足测量需要。同时可以看出, 在 3 个区域中的测量误差分布逐渐增大, 一方面是由图像边缘处成像质量差和镜头畸变引起的, 另一方面是由标定误差在较长距离的累计误差造成。与原有算法在凹槽高度测量中 0.018~0.027 mm 的测量精度相比^[4], 本文算法在凹槽高度参数的量化精度上也有一定程度地提高, 同时本文重建了深孔内表面的三维形貌特征, 提供了较为完整的测量数据。

3.4 测量实验

为实现系统测量, 使用标定好的测量系统对 77.5 mm 圆筒内表面的一个凹坑进行检测, 拍摄的结构光图片如图 10(a)所示, 结构光条受凹坑区域调制向左偏移, 按照本文测量方法对其进行测量, 提取光条中心并进行编号如图 10(b)所示。



(a) 原始图片



(b) 光条中心编号结果

图 10 缺陷检测实验处理图像

计算得到不同编号的光条中心到初始位置光条曲线的像素距离, 通过图像比例反推算法计算其 r 值, 将 r 、 M 和 t 的值代入式(3), 求出每一点的柱坐标 (r, φ, z) , 最终得到

深孔类零件内表面三维重建点云如图 11 所示。

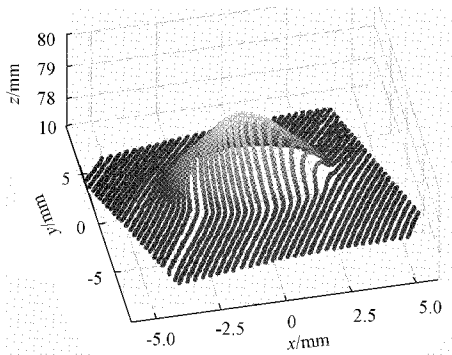


图 11 凹坑缺陷三维重建结果

4 结 论

针对深孔零件内表面三维形貌的高精度测量难题,本文基于多线结构光图像测量系统,结合深孔内表面的测量场景,提出了一种基于柱坐标系的深孔零件内表面三维重建方法。该方法将柱坐标系建立在深孔内表面上,推导出远心成像模型在柱坐标系下的坐标转换关系,结合光条测量点在不同半径深度中的图像偏移量求取测量点在柱坐标系中的三维坐标。本文提出了该重建方法的参数标定方法,在完成系统参数标定后,最后通过测量实验实现了深孔内表面的单视角点云重建,验证了本文算法的有效性。本文利用在不同深度的深孔内表面重建点云对凹槽深度进行量化分析,提取的凹槽高度数据的均方根误差在 0.03 mm 以内,并且为深孔内表面多种参数的提取了较为全面的三维数据。然而本文重建算法对实验过程中深孔内径变化较为敏感,如何在不同内径的深孔中实现高精度测量仍是研究的重点。

参考文献

- [1] 朱焯. 深孔类零件内表面三维综合测量技术的研究[D]. 武汉:中国科学技术大学,2018.
- [2] 郝磊. 基于线激光和 CCD 组合测量的动车车轴表面划痕检测分析[J]. 电子测量技术,2020,43(13):99-104.
- [3] 李志宇,林嘉睿,孙岩标,等. 一种基于线结构光传感器的圆位姿测量方法[J]. 光学学报,2020,40(15):1512004.
- [4] 丁超,唐力伟,曹立军,等. 基于结构光的深孔内表面凹槽深度测量[J]. 仪器仪表学报,2018,39(3):54-61.
- [5] DONG Y C, FANG C S, ZHU L L, et al. The calibration method of the circle-structured light measurement system for inner surfaces considering systematic errors [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(7):075012.
- [6] ZHU Y, WANG L P, GU Y G, et al. Three-dimensional inner surface inspection system based on circle-structured light [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(12): 121007-1-9.
- [7] BUSCHINELLI P, PINTO T, SILVA F, et al. Laser triangulation profilometer for inner surface inspection of 100 millimeters(4") nominal diameter[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015, 648: 012010.
- [8] ALMARAZ-CABRAL C C, GONZALEZ-BARBOSA J J, VILLA J, et al. Fringe projection profilometry for panoramic 3D reconstruction[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2016, 78:106-112.
- [9] YOKOTA M, KOYAMA T, TAKEDA K. Digital holographic inspection system for the inner surface of a straight pipe [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 97: 62-70.
- [10] GAO Y. Mathematical modeling of pipeline features for robotic inspection[D]. Louisiana: Louisiana Tech. University, 2012.
- [11] 李云梦,关丽敏,王会峰,等. 旋转扫描结构光的三维检测系统及其标定[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(7):66-73.
- [12] 马子骥,董艳茹,刘宏立,等. 基于多线结构光视觉的钢轨波磨动态测量方法[J]. 仪器仪表学报,2018,39(6):189-197.
- [13] 朱铮涛,裴炜冬,李渊,等. 基于远镜头的激光三角测距系统研究与实现[J]. 激光与光电子学进展,2018,55(3):191-196.
- [14] 丁超,唐力伟,曹立军,等. 基于结构光的身管膛线高度差检测[J]. 光学精密工程,2017,25:545-553.
- [15] 王利强,刘震,张钟华. 双目视觉中空间圆弧的高精度测量方法[J]. 仪器仪表学报,2013,34(10):2395-2400.

作者简介

潘硕,硕士研究生,主要研究方向为图像处理、结构光三维测量等。

E-mail: panshuo_97@163.com

邵新杰(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为机器视觉及智能控制。

E-mail: shaoxinjie2000@163.com