

深孔内表面结构光三维重构

丁超¹, 唐力伟¹, 曹立军¹, 邵新杰², 邓士杰¹

- (1. 陆军工程大学(石家庄校区) 火炮工程系, 河北 石家庄 050003;
2. 陆军工程大学(石家庄校区) 车辆与电气工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要:为实现针对深孔内表面几何形状的高精度三维重构, 搭建了一套基于结构光的三维检测系统。首先, 介绍了该检测系统的构成及相关测量原理, 并验证了在某一确定范围内图像距离与实际距离近似呈线性关系, 该论断为后续检测奠定了坚实的理论基础; 然后, 针对深孔模型实物以及对应的内表面展开成平面模型分别进行结构光检测, 从而验证了检测方案的可行性以及检测系统的实际效果。结果表明: 该检测方案在理论上可行, 在实际应用中系统的检测精度能够达到亚像素水平, 绝对偏差控制在 0.034 7 mm 的范围内; 最后, 在实际应用于深孔类零部件内表面检测的过程中, 实现了针对该零部件内表面几何形状的高精度三维重构。

关键词: 深孔; 结构光; 三维重构

中图分类号: TN247; TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1117004

3D reconstruction of deep-hole inner surface using structured light

Ding Chao¹, Tang Liwei¹, Cao Lijun¹, Shao Xinjie², Deng Shijie¹

- (1. Artillery Engineering Department, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China;
2. Vehicle and Electrical Engineering Department, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to realize the high precision 3D reconstruction for deep-hole inner surface geometry, a 3D measurement system was built based on the structured light. First, the constitution and relevant measurement principle of the system were introduced, the assertion was proved that the distance between the image and the actual was approximately linear in a given range. The assertion lays a solid theoretical foundation for the following measurement. Then, the deep-hole model object and the model in which the corresponding inner surface was unfolded into a plane which were measured using the structured light. The measurement proves the feasibility of the measurement scheme and the actual effect of the measurement system. The measurement results show that the measurement scheme is feasible in theory, the measurement accuracy of the system can reach sub-pixel in practical applications and the absolute deviation is controlled within 0.034 7 mm range. Finally, in the actual measurement of the inner surface of the deep-hole parts inner surface, the high precision 3D reconstruction for deep-hole inner surface geometry was realized.

Key words: deep-hole; structured light; 3D reconstruction

收稿日期: 2018-06-13; 修订日期: 2018-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(51575523)

作者简介: 丁超(1990-), 男, 博士生, 主要从事机器视觉及数字图像处理方面的研究。Email: duncan1119@163.com

导师简介: 唐力伟(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事机械性能检测与故障诊断、机器视觉方面的研究。Email: tom5157@163.com

0 引言

深孔类零部件内部空间狭小,高精度检测设备难以安放在深孔内部直接展开测量^[1]。传统针对深孔内表面几何参数的测量,主要依靠塞规法^[2]等接触式测量手段,测量过程繁复、耗时且精度不高。

以结构光光学检测手段为代表的非接触式测量是目前的研究热点,可实现针对被测物体外表面几何参数的快速、高精度测量及三维重构^[3-5]。相比于被测物体外表面检测,针对深孔内表面几何参数的三维检测研究较少;参考文献[6]为获取水泥混凝土路面错台量,依托激光三角法采用线结构光检测手段,通过对比直尺测量结果,将误差控制在 2 mm 范围内,但仍不能满足深孔类零部件内表面检测的精度要求;参考文献[7]采用圆结构光测量技术针对管道内表面进行三维检测,测量精度达到 0.1 mm 以内,但相比于线结构光,有限的应用范围和复杂的换算过程限制了圆结构光检测技术的应用;参考文献[8]采用线结构光检测手段针对深孔内轮廓直径展开快速测量,检测精度达到微米级别,实现了针对深孔内轮廓直径的有效检测。

文中依托结构光三维检测手段力图实现针对深孔内表面几何形状的三维重构,在理清系统构成和检测原理的基础上,分别针对深孔模型实物及对应的内表面展开成平面模型进行结构光检测,用于检验三维重构方案的可行性和系统的检测精度,为最终应用于实际深孔类零部件内表面几何形状的三维检测奠定基础。

1 检测系统构成及原理

1.1 系统构成

结构光检测系统主要构成如图 1 所示,该系统主要包含三个模块:(1)光源控制模块,在计算机控制下调节结构光投射器的发射光强,间接影响相机采集经深孔内表面漫反射后结构光图像的明暗效果;(2)图像采集模块,在计算机控制下调节相机的曝光时间,直接影响结构光图像的采集效果;(3)图像处理、分析模块,负责处理采集后的结构光图像,分析图像中隐藏的反映深孔内表面几何形状的参数

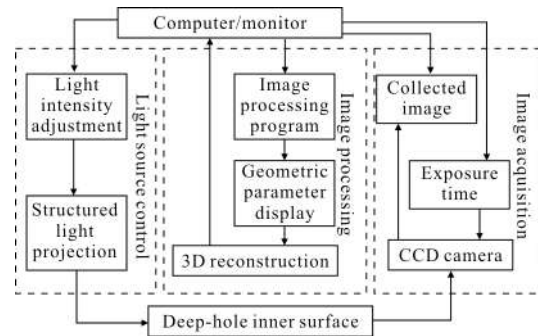


图 1 检测系统构成

Fig.1 Construction of the detection system

信息以便进行三维重构,并在显示器上进行直观的三维显示。其中各模块涉及到的相关设备的型号、参数如表 1 所示,主要采用北京博兴远志科技公司的相关产品。

表 1 相关设备描述

Tab.1 Description of related equipment

Name	Model	Related equipment
Laser source	BX-PT20V5	Colour G/520 mm, spot diameter 22, LED related power 1 W
Camera lens	BX-T0.3X110	Infinite objective, resolving power 33 μm , depth of focus 17 mm, optical distortion <0.5%
CCD camera	TXG03	Maximum frame rate 140, resolution 656 \times 494, size 1/3"

1.2 检测原理

检测系统的结构光投射路径如图 2 所示。受限于深孔内部有限的物理空间,将激光光源、CCD 相机、反射镜等主要部件整合在一起,结合中心定位与电机驱动设备,组成结构光检测设备 (Structured-light Detection Device, SDD);同时考虑到深孔内表面相对光滑的特性,采用斜射式^[9]将结构光栅以 2α 角度投射到深孔内表面,即引入反射镜将水平方向投射的结构光栅经反射镜反射后以 2α 角度斜射到深孔内表面以减小 SDD 的径向尺寸;同时将漫反射后竖直方向传播的变形结构光栅经反射镜反射后水平投射到 CCD 相机视野内,从而获取结构光图像。图 2 中虚线框(CCD 相机和结构光光源)为实线框(CCD 相机和结构光光源)在反射镜中的镜像,通过设置镜像物体,便于分析激光光路在二维空间中的几何关系。

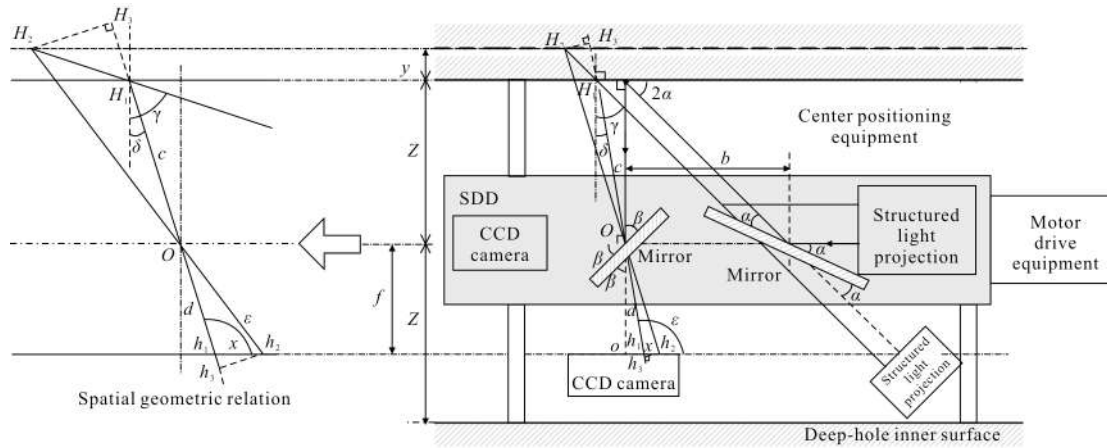


图 2 系统检测原理

Fig.2 Principle of system detection

分析图中空间几何关系^[10], 针对 ΔH_2H_3O 与 Δh_2h_3O 作相似三角形处理, 如公式(1)所示:

$$\frac{d-x\cos\epsilon}{c+\frac{y}{\cos\gamma}\cos(\gamma-\delta)} = \frac{x\cos(\epsilon-\pi/2)}{\frac{y}{\cos\gamma}\sin(\gamma-\delta)} \quad (1)$$

式中: x 为距离 h_1h_2 , 与图像距离 u 对应, 即 $x=k \cdot u$, 其中 k 为常数; y 为内表面凹槽实际深度; d 为距离 Oh_1 ; c 为距离 OH_1 。

推导公式(1), 获取 x 和 y 之间的关系, 即 u 与 y 之间的关系, 见公式(2); 输入深孔实际尺寸以直观显示两参数间关系, 如图 3 所示; 其中 $Z=75 \text{ mm}$, $b=75 \text{ mm}$, $f=50 \text{ mm}$, 同时考虑到深孔内表面凹槽尺寸一般在几个毫米范围内, 故将距离 x 限制在 $[0, 5] \text{ mm}$ 范围内。由图 3 分析知, 深孔内表面凹槽实际深度 y 与距离 x 近似呈线性关系, 故可通过计算图像上同一结构光条纹在折断处的图像距离 u 推算得到实际的凹槽深度, 如公式(2)所示:

$$y=Z^2x/(bf-xZ) \approx K \cdot u \quad (2)$$

式中: K 为常数。

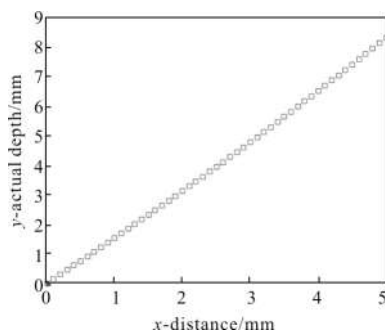


图 3 距离 μ 与实际深度 x 关系

Fig.3 Relationship between distance μ and actual depth x

2 模型内表面检测

2.1 模型搭建

针对常见深孔类零部件, 文中利用 3D Max 软件设计了一款孔径 $d=155 \text{ mm}$ 的深孔内表面模型 (Deep-hole Inner-surface Model, DIM), 并制造了实物, 该模型主要包括各类尺寸不一的梯形凹槽和矩形凹槽, 如图 4(a) 所示; 同时针对 DIM 模型进行展开建模, 设计了与之对应的深孔内表面展开成平面模型 (Deep-hole Inner-surface Plane Model, DIPM), 如图 4(b) 所示。

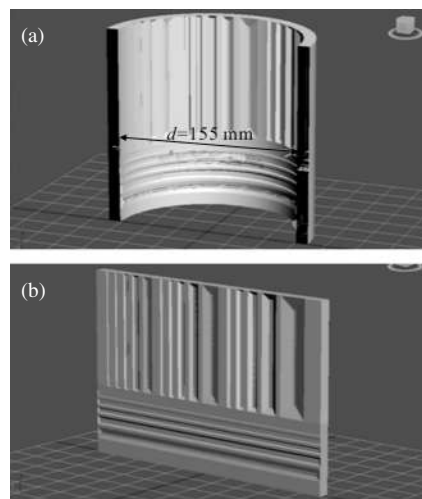


图 4 深孔内表面模型搭建

Fig.4 Construction of deep-hole inner-surface model

DIPM 模型主要用于检验结构光三维检测方案

的可行性以及方案在理论上的检测精度;DIM 模型主要用于验证系统在实际检测中的测量精度。故首先针对 DIPM 模型在 3D Max 软件中的理想环境下进行结构光检测,然后针对 DIM 模型进行实际检测。

2.2 DIPM 模型内表面检测

为验证检测方案的可行性及理论精度,首先针对 DIPM 模型中某一梯形凹槽进行结构光三维检测。具体的检测流程如图 5 所示。

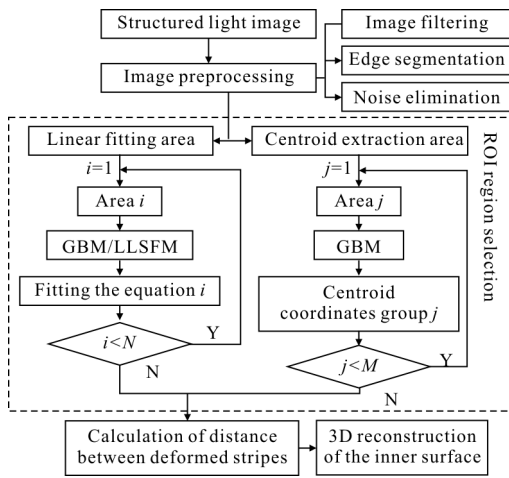


图 5 深孔内表面三维检测流程

Fig.5 3D detection process of deep-hole inner-surface

(1) 图像预处理,依据采集图像(如图 6(a)所示)

的实际特点,分别采取图像滤波、边缘分割以及噪声点消除等操作,为感兴趣区域 (Region of Interest, ROI)的选取奠定基础,该图像分为区域 A、B 和 C。由于图 6(a)是理想条件下的 DIPM 模型采集图像,故仅采用 Canny 算子进行边缘分割,如图 6(b)中白色边缘所示。

(2) 线性拟合区域选取,选取区域 A 作为线性拟合区域,采用区域选取函数 roipoly 手动设置相关参数,依次提取区域内结构光条纹;以第 i 根条纹为例,结合灰度重心法 (Gray Barycenter Method, GBM)提取条纹质心 (x_0, y_0) ,如公式(3)和图 6(b)中白色粗线所示,其中 S 为目标区域;依据提取质心坐标采用线性最小二乘拟合法 (Linear Least Squares Fitting Method, LLSFM)拟合出直线方程,如公式(4)和图 6(b)中浅灰色细实线所示,其中 n 为单根条纹质心坐标数目。

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{(x,y) \in S} x \cdot g(x,y)}{\sum_{(x,y) \in S} g(x,y)} \\ y_0 = \frac{\sum_{(x,y) \in S} y \cdot g(x,y)}{\sum_{(x,y) \in S} g(x,y)} \end{cases} \quad (3)$$

$$F(a,b) = \sum_{i=0}^n (ax_i + b - y_i)^2, \frac{\partial F}{\partial a} = 0, \frac{\partial F}{\partial b} = 0 \quad (4)$$

(3) 质心提取区域选取,针对图中剩余区域 B 和 C,采用 GBM 算法提取所有条纹的质心坐标,如

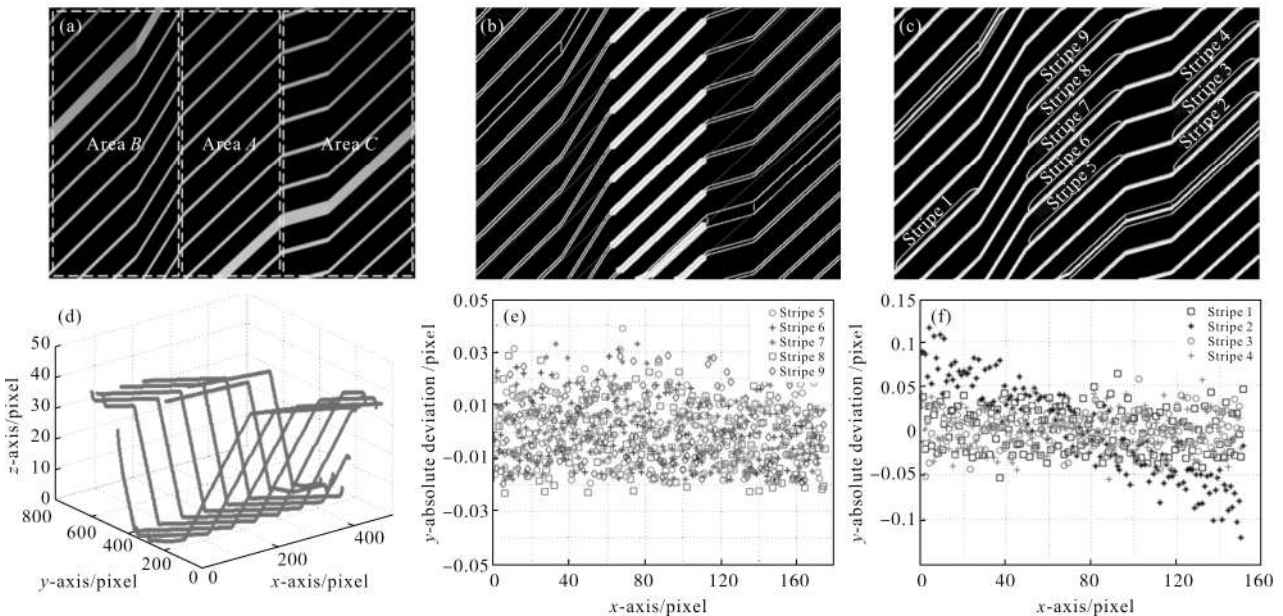


图 6 DIPM 模型内表面检测

Fig.6 DIPM model inner-surface detection

图 6(c)中白色线所示。

(4) 折断间图像距离计算, 在三个区域中分别选取对应条纹, 即同一结构光条纹因内表面几何形状调制, 被折断为多根相对应的条纹; 采用参考文献[11]中的图像转换比例反推算法计算条纹提取后的质心坐标到对应条纹拟合直线方程的垂直图像距离, 如公式(5)所示:

$$d = \frac{|Ax + By + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} = \frac{|ax - y + b|}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (5)$$

式中: (x, y) 为条纹质心坐标; A, B, C 为对应拟合直线方程的系数。

(5) 内表面三维重构, 依据获取的质心到拟合直线方程间的垂直图像距离 z_0 , 结合质心坐标 (x_0, y_0) 实现针对深孔内表面几何形状的三维重构, 如图 6(d)所示, 对比该梯形凹槽设计参数知, 文中检测方案可行。

对比图 6(a)和图 6(d), 在不考虑图像边缘处误差较大的像素点情况下, 分析三维重构后区域 A 内部质心坐标到区域 A 直线方程距离的绝对偏差, 如图 6(e)所示; 区域 B 和 C 内部质心坐标到区域 A 直线方程距离的绝对偏差, 如图 6(f)所示。由图分析知, 绝对偏差均远小于单个像素, 验证了方案在理论上的高精度。

2.3 DIM 模型实物内表面检测

与 DIPM 模型内表面检测流程相同, 针对 DIM 模型实物内表面进行检测: 首先采用 Canny 算子针对采集图像(如图 7(a)所示)进行边缘分割, 采用

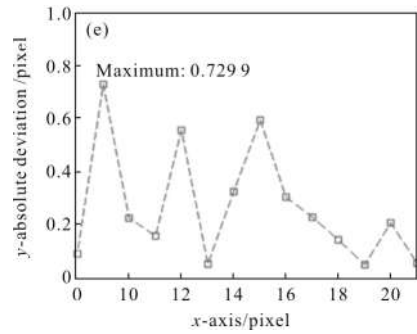
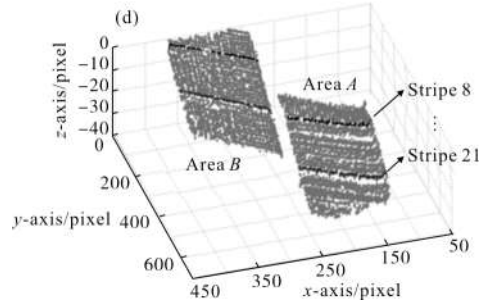
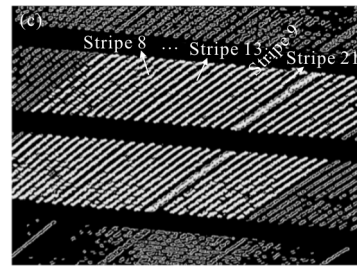
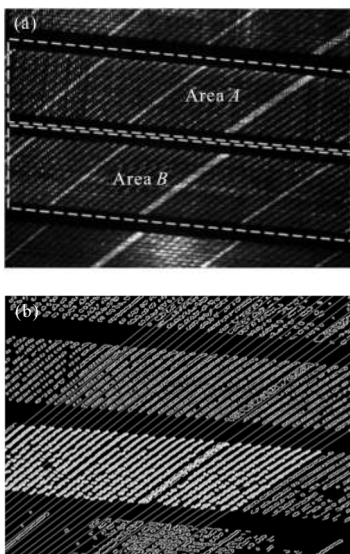


图 7 DIM 模型实物内表面检测

Fig.7 DIM model object inner surface detection

bwareaopen 函数消除图像中噪声点, 如图 7(b)所示; 然后选取区域 B 作为线性拟合区域, 提取区域 B 内的结构光条纹质心和拟合直线方程, 分别如图 7(b)中白色粗线和浅灰色细实线所示; 然后提取区域 A 内部结构光条纹的质心坐标, 如图 7(c)中白色线所示; 最后计算两区域内对应质心坐标与拟合直线方程之间的垂直图像距离 z_0 , 并结合质心坐标 (x_0, y_0) 作三维重构, 如图 7(d)所示。

提取区域 A 内部 stripe 8~stripe 21 共 14 根结构光条纹在靠近区域 B 的部分质心坐标, 取平均值代入公式(5)获取各条纹在折断处的图像距离, 如表 2 所示。

进一步做平均, 获取该区域在折断处的图像距离 $d=28.838$ pixel, 并以此获取每根条纹在折断处图像距离的绝对偏差, 如图 7(e)所示。分析知, 在实际检测中, 绝对偏差均小于单个像素, 达到亚像素水平; 同时该模型实物凹槽的实际深度 depth 为 1 mm,

表 2 Stripe 8~stripe 21 折断处图像距离

Tab.2 Image distance from stripe 8 to stripe 21

Number	Distance/ pixel	Number	Distance/ pixel	Number	Distance/ pixel
8	28.931	13	28.893	18	28.692
9	29.568	14	29.164	19	28.889
10	28.612	15	28.245	20	28.628
11	28.679	16	28.533	21	28.896
12	29.395	17	28.610	-	-

故单个像素换算成实际距离 p , 如公式(6)所示:

$$p = \text{depth}/d \approx 0.0347 \text{ mm} \quad (6)$$

3 实际深孔内表面检测

在验证文中检测方案的可行性以及实际检测精度后, 针对实际深孔类零部件内表面进行检测, 采集得到结构光条纹图像, 如图 8(a)所示。

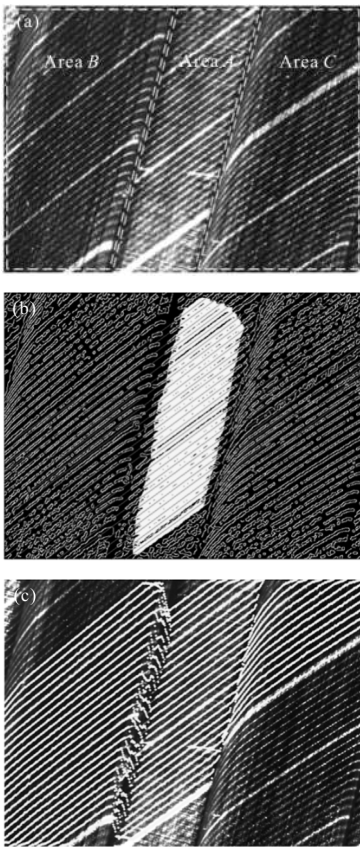


图 8 实际深孔内表面尺寸检测

Fig.8 Size detection of actual deep-hole inner-surface

分析图像实际特点, 依次采用顺序统计滤波

(Order Statistic Filtering, OSF)、Canny 算子边缘分割和 bwareaopen 函数处理图像, 效果如图 8(b)所示。

选取区域 A 作为线性拟合区域, 提取区域 A 中条纹质心坐标并拟合直线方程, 如图 8(b)所示; 选取剩余区域 B 和 C 作为质心提取区域, 提取区域内条纹的质心坐标, 如图 8(c)所示; 计算对应质心坐标与拟合直线方程之间的垂直图像距离, 并作三维重构, 如图 9 所示, 对比实际深孔类零部件内表面尺寸图纸, 该三维模型实现了针对零部件内表面几何形状的重构。

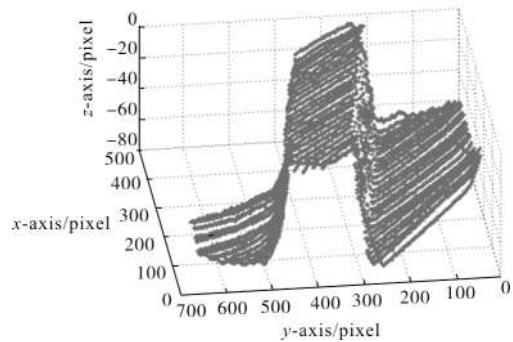


图 9 内表面三维重构

Fig.9 3D reconstruction of inner-surface

4 结论

文中通过采用结构光光学检测手段, 实现了针对深孔类零部件内表面几何形状的高精度三维重构。在检测过程中, 首先在理想的软件环境下针对 DIPM 平面模型进行结构光检测, 验证了结构光三维重构方案的在理论上的可行性及精度; 在此基础上针对尺寸已知的 DIM 曲面模型实物进行检测, 结果表明在实际检测过程中, 系统的实际精度能够达到亚像素水平, 精确到 0.0347 mm 以内; 在方案可行性和实际检测精度得到保证的基础上, 针对实际深孔类零部件内表面进行检测, 实现了针对零部件内表面几何形状的直观显示和高精度重构。

参考文献:

[1] Ding Zhenglong, Xu Yuetong, Fu Jianzhong. On-line precise measurement principle and system for deep-hole diameter [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49 (1): 65-71. (in Chinese)

[2] Leng Huiwen, Xu Chunguang, Xiao Dingguo, et al. A method for measuring complicated deep-hole profile using

- line-structured-light sensor [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(2): 139-143. (in Chinese)
- [3] Xu Jing, Xi Ning, Zhang Chi, et al. Real-time 3D shape inspection system of automotive parts based on structured light pattern [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(1): 1-8. (in Chinese)
- [4] Zhang Weiguang, Zhao Hong. Error correction method for three dimensional measurement system with multi-sensor and linear structure light [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(6): 75-80. (in Chinese)
- [5] Barone S, Paoli A, Rationale A V. Shape measurement by a multi-view methodology based on the remote tracking of a 3D optical scanner [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(3): 380-390.
- [6] Li Wei, Sha Aimin, Sun Chaoyun, et al. Joint faulting three-dimension detection method on cement concrete pavement with line-structure light [J]. *Journal of Tongji University Natural Science*, 2015, 43(7): 1039-1044. (in Chinese)
- [7] Wang Ying, Zhang Rui. In-pipe surface circular structured light 3D vision inspection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 891-896. (in Chinese)
- [8] Leng Huiwen, Xu Chunguang, Xiao Dingguo, et al. A method for measuring complicated deep-hole profile using line-structured-light sensor [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(2): 139-143. (in Chinese)
- [9] Zhang Jinmin. The measurement system of objects' three-dimension figure based on the laser triangulation [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [10] Long Xulin. Research on gun barrel bore detecting system based on laser displacement sensor [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015. (in Chinese)
- [11] Ding Chao, Tang Liwei, Cao Lijun, et al. The measurement test of the barrel rifling based on the structured light [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4): 1077-1085. (in Chinese)