

## 航天大视场遥感相机畸变测试方法

李重阳,董欣,岳丽清,马丽娜,张继友

(北京空间机电研究所 先进光学遥感技术北京市重点实验室,北京 100094)

**摘要:** 航天遥感相机的畸变作为相机的重要参数,其测试精度直接关系到相机获取图像后的图像处理精度。对于航天非测绘遥感相机,在设计之初往往对其光学系统的畸变设计要求没有测绘相机高,其光学系统的畸变一般会比较大会比较大,需要对此类遥感相机,特别是视场较大的遥感相机的畸变进行精确测试,为其在轨飞行检校提供比较精确的初始条件。文中在经典的精密测角方法的基础上,建立了针对大畸变航天遥感相机的数学模型,针对视场较大、弧形畸变较大的测试难点提出了合理可行的测试思路,完成了被测相机的高精度畸变测试,取得了理想的效果。实际测试结果表明:畸变测试精度优于  $1.8\mu\text{m}(1\sigma)$ ,可以满足被测相机的高精度畸变测试需求,对航天非测绘大视场遥感相机畸变测试有参考借鉴意义。

**关键词:** 非测绘; 大视场; 遥感相机; 畸变

**中图分类号:** TP79 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1117003

## Testing method of distortion for space remote sensing camera with large field of view

Li Chongyang, Dong Xin, Yue Liqing, Ma Lina, Zhang Jiyou

(Key Laboratory for Advanced Optical Remote Sensing Technology of Beijing, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The distortion of the space remote sensing camera was an important parameter, the test accuracy of which was directly related to the image processing precision after getting the image. For the space non-mapping remote sensing camera, the requirement for the distortion of the optical system was not as high as mapping remote sensing camera at the beginning of the design. So its distortion of the optical system was large in general. For this kind of remote sensing camera, especially those with large FOV, it's necessary to test distortion of the camera accurately. This can provide more accurate initial condition for the calibration in-orbit. Based on the precision of angle measuring method, the mathematical model of space remote sensing camera in view of the large distortion was established in this paper, and a reasonable and feasible test idea was proposed for the large FOV and arc distortion of the camera. The high accuracy test to the distortion of the under test camera was completed, and the results were ideal. The practical test results show that the accurate of distortion is better than  $1.8\mu\text{m}(1\sigma)$ . The test accuracy can meet the high requirements of test precision for under test camera. So this method has reference significance to the distortion test of the space non-mapping remote sensing camera.

**Key words:** non-mapping; large field of view; remote sensing camera; distortion

收稿日期:2018-06-05; 修订日期:2018-07-03

基金项目:国家重大科技专项工程

作者简介:李重阳(1987-),男,工程师,硕士,主要从事光学遥感器装调与测试等方面的研究。Email:julicy508@sina.com

## 0 引言

随着“高分重大专项”的顺利实施,多颗高分辨率航天遥感卫星相继成功发射,国内高分辨率对地观测能力有了显著提升。但除了资源三号 01 星和 02 星搭载的三线阵相机以及天绘一号搭载的遥感相机具备立体测绘能力<sup>[1-3]</sup>,其余在轨运行的均为非测绘类遥感相机,其光学系统的设计畸变相对较大,甚至可达毫米量级,需要在研制阶段以及在轨运行阶段对其畸变进行精确测试。国外的研究机构如德国柏林空间中心、瑞士 LH 实验室以及国内的多家科研院所如中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、北京空间机电研究所等对测绘类遥感相机的内方位元素与畸变实验室测试技术均进行了深入的研究<sup>[4-8]</sup>。目前,对于光电成像型遥感相机的畸变测试方法一般分为两大类:一类是基于自标定理论的测试方法<sup>[9-10]</sup>;另一类是基于精密测角理论的测试方法。前者适用于短焦(焦距一般为几十毫米)面阵相机,后者适用于长焦线阵相机以及面阵相机。一般情况下,高分辨率的航天对地遥感相机焦距较长,更适用基于精密测角理论的测试方法。所以国内外各研究机构进行畸变测试的基本原理均基于经典的精密测角法,且目前国际主流的测量技术水平可满足 1:10 000 比例尺航天测绘相机的研制需求。相对于测绘类遥感相机在摄影测量领域的重要应用价值,非测绘类遥感相机在资源普查、环境调查以及军事侦察等领域用途广泛<sup>[11]</sup>。对于这类非测绘遥感相机,需要对其畸变的高精度测试进行专门研究,但相关研究进展及成果暂未见报道。文中针对航天大视场非测绘遥感相机视场大、相对畸变大的特点,提出一种畸变测试方法,可为航天大视场非测绘遥感相机研制与测试人员提供参考。

## 1 测试基本原理

对于长焦距航天遥感相机的畸变,国内外通常采用精密测角法进行测试,其测试原理如图 1 所示。

$N'$  为被测相机镜头的后节点, $O$  为像面中心, $P$  为像面测量主点位置,角度  $\Delta W$  是测量主点和像面中心偏差所成的角度, $f$  为被测相机主距, $H_i$  为测量点, $H'_i$  为被测点的理想位置, $L_i$  为  $H_i$  距像面中心  $O$  点的距

离, $W_i$  为对应  $H_i$  点的偏角, $p$  为主点与中心的偏移量。

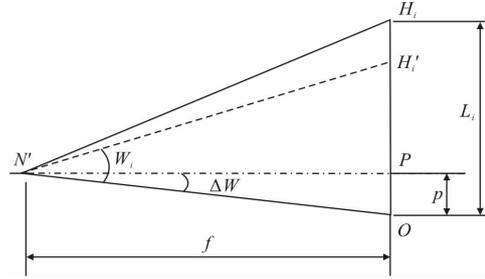


图 1 畸变一维测试原理

Fig.1 Test principle of distortion for one dimension

根据图中的几何关系, $H_i$  点的畸变计算公式为:

$$D_i = L_i - f \tan W_i + p \tan^2 W_i \quad (1)$$

为了求解该方程,一般令畸变的平方和最小,从而得到该超定方程的解<sup>[12]</sup>,求出主点和主距:

$$\begin{cases} f = \frac{(\sum_{i=1}^N L_i \tan^2 W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^3 W_i) - (\sum_{i=1}^N L_i \tan W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^4 W_i)}{(\sum_{i=1}^N \tan^3 W_i)^2 - (\sum_{i=1}^N \tan^2 W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^4 W_i)} \\ p = \frac{(\sum_{i=1}^N L_i \tan^2 W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^2 W_i) - (\sum_{i=1}^N L_i \tan W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^3 W_i)}{(\sum_{i=1}^N \tan^3 W_i)^2 - (\sum_{i=1}^N \tan^2 W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^4 W_i)} \end{cases} \quad (2)$$

相机的主点与像面中心位置的差别一般在像元级,可以忽略不计,即  $p=0$ ,可以得到:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^N L_i \cdot \tan W_i}{\sum_{i=1}^N \tan^2 W_i} \quad (3)$$

假设被测相机的主距值  $f$  已知,可以得到:

$$p = \frac{(\sum_{i=1}^N f \cdot \tan^3 W_i - \sum_{i=1}^N L_i \cdot \tan^2 W_i)}{\sum_{i=1}^N \tan^4 W_i} \quad (4)$$

将采集到的每个采样点的质心位移  $L_i$  以及对应的角量  $W_i$ ,代入到公式(2)中得到主点  $p$  和主距  $f$ ,再将主点  $p$  和主距  $f$  代入到公式(1)中求解每个采样点的畸变  $D_i$ 。

## 2 测试方法

### 2.1 被测相机的特点

文中讨论的被测相机采用离轴四反式光学系统,如图 2 所示。沿线阵方向( $X$  方向)的视场角为  $36^\circ$ ,采用四色线阵 CCD 器件。相机沿线阵方向( $X$  方向)的畸变较大,且垂直线阵方向( $Y$  方向)存在弧形

畸变,光学设计的畸变图如图 3 所示。

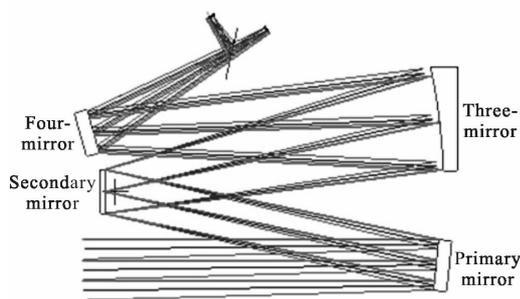


图 2 被测相机光学系统

Fig.2 Optical system of the camera under test

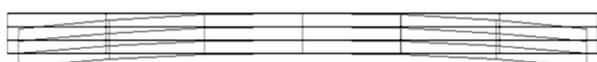


图 3 被测相机的光学系统畸变网格诊断图

Fig.3 Distorted grid diagnosis of the camera's optical system under test

该相机采用的线阵 CCD 四个谱段在  $Y$  方向的光敏区宽度约为  $2\text{ mm}$ , 将该相机光学系统 CODE-V 模型代入 CODE-V 软件中计算发现, 边缘视场在  $Y$  方向的畸变约为  $1.9\text{ mm}$ 。这就意味着边缘视场的像点位置与中心视场相比, 其视场在  $Y$  方向偏离了约  $0.5^\circ$ , 这就为该相机的畸变测试带来了很大的困难。经典的精密测角法进行畸变测试需要平行光管提供点目标或者线目标, 而大多数长焦距、大口径平行光管的有效视场一般在  $15'$  左右, 尤其是离轴反射式平行光管<sup>[13]</sup>。如果用来对该相机进行光学畸变测试, 需要多次在相机视场的  $Y$  方向平移平行光管或者被测相机, 这很容易引入非常大的误差。即便有大视场的平行光管可以使用也需要考虑平行光管自身的畸变<sup>[14]</sup>, 这是由于当采集被测相机边缘视场靶标像时, 参与成像的靶标区域已经不是平行光管中心视场了, 若平行光管有较大的畸变, 会对测试结果带来额外误差。

### 2.1 测试系统的组成

为了摆脱研制定位精度需要达到亚像元级的平移设备的依赖, 测试人员采用大视场、近似无畸变镜头来实现待测相机的高精度畸变测试。项目组在某预研项目中完成了某型镜头的装调工作, 该镜头采用透射式准远心系统, 与待测相机焦距之比大于 7, 有效通光口径之比大于 4, 视场角大于  $5^\circ$ , 焦距、口

径和视场角均可满足待测相机的需求, 且绝对畸变小于  $2\ \mu\text{m}$ , 相比于待测相机毫米量级的畸变可忽略不计。根据该思路, 搭建如图 4 所示的测试系统。

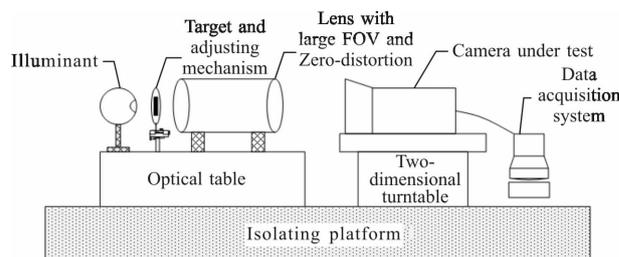


图 4 测试系统示意图

Fig.4 Test system schematic

### 2.2 测试过程

大视场近似无畸变镜头的焦面位置安装定制矩形靶标, 靶标的线视场应不小于  $20\text{ mm}$ , 保证可覆盖被测相机垂直线阵方向在边缘视场的畸变偏离量。靶标安装在多维调整机构上, 用五棱镜法确定靶标的理想位置。被测相机安装在二维转台上, 安装相机时保证相机光学系统的入瞳位于转轴中心处, 确保在测试过程中平行光管的出射光始终能覆盖被测相机的入瞳。

利用被测相机光轴基准镜, 通过调整相机位置使相机视轴与大视场无畸变镜头的视轴同轴。调整二维转台俯仰角, 使矩形靶标的中心成像在 CCD 上的 B1 谱段。转动转台方位角, 每隔一定角度使靶标依次在 CCD 的 B1 谱段成像, 采集到的图像通过亚像元质心计算软件计算得到靶标像的质心位置, 记录每个成像点的转台角度  $W_i$ , 其中  $i=1, 2, 3, \dots$ 。完成 B1 谱段的数据采集后调节二维转台的俯仰角, 依次完成所有谱段的数据采集。

### 2.3 数学模型及数据处理

对于测绘相机, 其最大相对畸变一般要求在  $0.03\%$  以下, 实际设计值往往更小, 其量级一般在微米级<sup>[15]</sup>。所以, 在解算其畸变的时候一般选择全视场畸变平方和最小为求解条件, 在此条件下, 会解算出一个经过最佳规划的主距。但对于全视场最大畸变在毫米量级的非测绘相机, 若将规划后的主距代入数学模型进行计算, 得到的相机畸变会比真实畸变小, 直接使用得到的畸变数据对在轨所获图像进行校正会有一些的误差<sup>[16]</sup>。为此, 对于畸变较大的相

机,文中提出采用近轴主距结合畸变测试数学模型来获取被测相机各视场的畸变是比较合理的。

对于每个测试点  $M_i$ ,均对应一个角度值  $W_i$  和质心位移  $L_i$ 。由于光学系统存在很大的畸变,每个测试点  $M_i$  的主距  $f_i$  与光学系统理想的主距是不同的。每一个测试点的主距均可表示为:

$$f(L_i)=L_i/\tan(W_i) \quad (5)$$

将每个像元所对应的主距用关于像元质心位移  $L_i$  的高次多项式表示如下:

$$f(L_i)=a(n)(L_i)^n+a(n-1)(L_i)^{n-1}+a(n-2)(L_i)^{n-2}+\dots+a(1)(L_i)+a(0) \quad (6)$$

利用高次多项式对取得的数据进行拟合,一般情况,如果在测试中环境控制得当,测试设备以及靶标像质心细分算法的精度较高,当  $n$  取 4 时,拟合多项式的  $R^2$  值可达 0.99 以上。令质心位移  $L_i=0$ ,得到该相机的近轴主距  $f_0$ ,将主点  $p$  和近轴主距  $f_0$  代入到公式(1)中求解每个采样点的畸变  $D_i$ 。

### 2.4 测试误差分析

畸变的测量误差  $\delta_D$  包括三个来源,即靶标像质心位移测量误差  $\delta_L$ ,角度测量误差  $\delta_w$ ,主距测量误差  $\delta_f$ ,畸变测量误差的表达式为:

$$\delta_D=\sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial L}\right)^2 \cdot \delta_L^2+\left(\frac{\partial D}{\partial W}\right)^2 \cdot \delta_w^2+\left(\frac{\partial D}{\partial f}\right)^2 \cdot \delta_f^2+\left(\frac{\partial D}{\partial p}\right)^2 \cdot \delta_p^2} \quad (7)$$

式中:  $\delta_f = \sqrt{\left(\frac{1}{\sum \tan^2 W_i}\right)^2 \cdot \delta_L^2 + \frac{\sum L_i^2 \sec^4 W_i}{(\sum \tan^2 W_i)^2} \cdot \delta_w^2}$  ;  
 $\left(\frac{\partial D}{\partial W}\right)^2 = (-f \cdot \sec^2 W_i - 2p \cdot \tan W_i \cdot \sec^2 W_i)^2 \approx f^2 \cdot \sec^4 W_i$  ;  
 $\left(\frac{\partial D}{\partial P}\right)^2 = \tan^4 W_i$  ;  $\left(\frac{\partial D}{\partial L}\right)^2 = 1$  ;  $\left(\frac{\partial D}{\partial f}\right)^2 = \tan^2 W_i$ 。

测试使用的二维转台经过精确标定,其精度较高,30°内的视值误差 PV 值为 0.5",被测相机所用 CCD 像元尺寸为 13 μm,靶标像质心位移测量精度优于 0.1 个像元。取  $\delta_w=0.5$ , $\delta_L=0.1 \cdot \text{pix}$ ,其中 pix 为 CCD 的像元宽度,单位为 μm。将上述数据其代入公式(7)中,经过计算可得,该相机畸变测试的精度为 1.9 μm。

### 3 测试结果

文中用上述的测试和数据处理方法对被测相机进行了实际测试,测试现场照片如图 5 所示。测试时全视场共取 29 个测试点,进行了三次有效测试,经过数据处理得到各谱段线阵方向(X 方向)畸变如

图 6 所示,对应的各谱段最大相对畸变见表 1。



图 5 测试现场照片

Fig.5 Photo of testing field

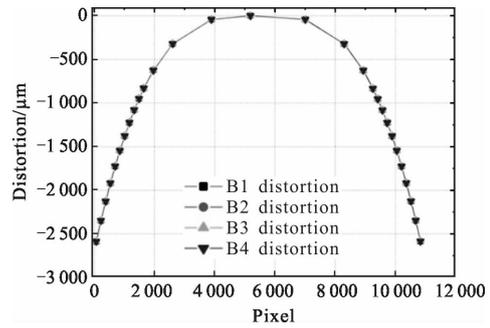


图 6 被测相机畸变曲线

Fig.6 Distortion curve of the camera under test

表 1 被测相机各谱段线阵方向最大相对畸变

Tab.1 Maximum relative radial distortion at all spectrums of the camera under test

Spectrum	B1	B2	B3	B4
Maximum relative radial distortion	3.699%	3.7%	3.696%	3.699%

通过对该相机光学系统 CODE-V 模型的畸变网络诊断可知,该相机线阵方向(X 方向)最大相对畸变设计值为 3.729%,垂直线阵方向(Y 方向)最大实际像高差不超过 5 μm。经过对比可以看出,文中提出的测试方法取得的测试结果与理论设计值吻合较好。三次重复测试,各采样点畸变测试的均方根为 1.8 μm,说明测试过程中随机误差较小,测试精度高。同时,也证明了该相机镜头装调阶段公差控制比较严格,可作为评价遥感相机整机性能的依据。

### 4 结论

文中介绍了一种航天非测绘大视场遥感相机畸变测试方法。用视场较大的近似无畸变光学镜头提供较大视场的目标,解决了光学系统有较大畸变的非测绘遥感相机畸变的精确测试。建立了针对大畸变光学系统畸变解算的数学模型,实现了较好的测试结果。实测结果显示,对被测相机可实现 1.8 μm(1σ)的畸变测试精度,表明该方法合理可行,

可以应用到光学系统具有较大畸变的航天遥感相机的畸变测试中,可为航天非测绘类遥感相机特别是视场较大的相机在研制过程中的畸变测试提供参考。

### 参考文献:

- [1] Li Deren. China's first civilian three-line-array stereo mapping satellite: ZY-3[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3): 317-322. (in Chinese)  
李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星--资源三号测绘卫星[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 317-322.
- [2] Liu Jiangwei, Huang Haile, Li Wu. Research on method for the in-flight calibration of Mapping Satellite-1 high-resolution camera, multispectral camera and three-line-array nadir camera's intersection angle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 662-667. (in Chinese)  
刘姜伟, 黄海乐, 李五. 天绘一号卫星高分辨、多光谱相机与三线阵正视相机夹角在轨标定方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 662-667.
- [3] Yu Da, Liu Jinguo, Zhou Huaide, et al. Design of LMCCD stereo mapping imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3393-3396. (in Chinese)  
余达, 刘金国, 周怀得, 等. LMCCD 立体测绘成像设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3393-3396.
- [4] Ohlhof T, Kornus W. Geometric calibration of digital three-line CCD cameras[C]//International Archives of Photogrammetry and Remote sensing, Como, Italy, 1994, 30: 71-81.
- [5] Pacey R E, Walker A S, Scheldt M. Calibration of analog and digital airborne sensors at LH systems[C]//ASPRS Annual Conference, 1999:950-956.
- [6] Schuster R. Sensor calibration and geometric calibration of a three line stereo camera [C]//International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1994, 30: 265-271.
- [7] Zhang Jiyou. Simulation of geometric measurement method for stereo mapping camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(3): 48-54. (in Chinese)  
张继友. 传输型立体测绘相机几何精度仿真分析[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(3): 48-54.
- [8] Wu Guodong, Han Bing, He Xu. Calibration of geometric parameters of line-array CCD camera based on exact measuring angle in lab [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(10): 1628-1632. (in Chinese)  
吴国栋, 韩冰, 何煦. 精密测角法的线阵 CCD 相机几何参数实验室标定方法 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1628-1632.
- [9] Zhang Jiyou, Wang Dongjie, Ma Lina. The self-calibration technology of camera intrinsic parameters calibration methods [J]. *Imaging Science and Photochemistry*, 2016, 34 (1): 15-22. (in Chinese)  
张继友, 王东杰, 马丽娜. 摄像机内方位元素标定中的自标定技术[J]. 影像科学与光化学, 2016, 34(1): 15-22.
- [10] Liu Feng, Wang Xiangjun, Xu Wei, et al. Self-calibration method for the parallel tracking platform based on the monocular vision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 175-179. (in Chinese)  
刘峰, 王向军, 许薇, 等. 并联跟踪台单目视觉自标定方法 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 175-179.
- [11] Yue Tao, Li Bo, Chen Xiaoli, et al. The current and future development of space optics [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 1-9. (in Chinese)  
岳涛, 李博, 陈晓丽, 等. 空间光学发展现状和未来发展 [J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(5): 1-9.
- [12] Fu Ruimin, Zhang Yuanming, Zhang Jiyou. Study on geometric measurement methods for line-array stereo mapping camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(6): 62-67. (in Chinese)  
伏瑞敏, 张元明, 张继友. 传输型线阵测绘相机几何精度标定方法[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(6): 62-67.
- [13] Che Chicheng, Li Yingcai, Fan Xuewu, et al. Optical design of the parallel optical tube of the axial mirror [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2008, 37(9): 1793-1796. (in Chinese)  
车驰骋, 李英才, 樊学武, 等. 离轴二镜平行光管的 optical 设计[J]. 光子学报, 2008, 37(9): 1793-1796.
- [14] Chen Zhiling. Manufacture of wide view collimator for distortion calibration [J]. *Optical Instruments*, 2010, 32(1): 71-74. (in Chinese)  
陈志凌. 用于畸变标定的大视场平行光管的研制[J]. 光学仪器, 2010, 32(1): 71-74.
- [15] Guo Jiang, Liu Jinguo, Wang Guoliang, et al. Technology of off-axis TMA aerospace mapping camera [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(S): 17-21. (in Chinese)  
郭疆, 刘金国, 王国良, 等. 测绘用离轴三反光学系统技术 [J]. 遥感学报, 2012, 16(S): 17-21.
- [16] Wu Xu, Fan Tianquan, Luo Mingrong, et al. Constraint least square optimization for distortion of an ultra-wide-angle optical lens [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(1): 26-31. (in Chinese)  
吴旭, 范天泉, 罗名容, 等. 超广角光学镜头畸变的约束最小二乘优化[J]. 光电工程, 2004, 31(1): 26-31.

## 深孔内表面结构光三维重构

丁超<sup>1</sup>, 唐力伟<sup>1</sup>, 曹立军<sup>1</sup>, 邵新杰<sup>2</sup>, 邓士杰<sup>1</sup>

(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 Chao<sup>1</sup>, Tang Liwei<sup>1</sup>, Cao Lijun<sup>1</sup>, Shao Xinjie<sup>2</sup>, Deng Shijie<sup>1</sup>

(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<sup>[1]</sup>。传统针对深孔内表面几何参数的测量, 主要依靠塞规法<sup>[2]</sup>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<sup>[3-5]</sup>。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

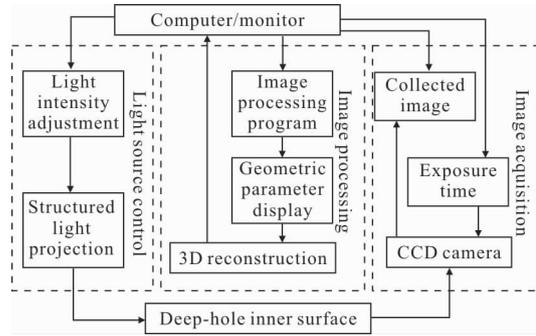


图 1 检测系统构成

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 $\mu\text{m}$ , 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<sup>[9]</sup>将结构光栅以  $2\alpha$  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  $2\alpha$  角度斜射到深孔内表面以减小 SDD 的径向尺寸; 同时将漫反射后垂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。

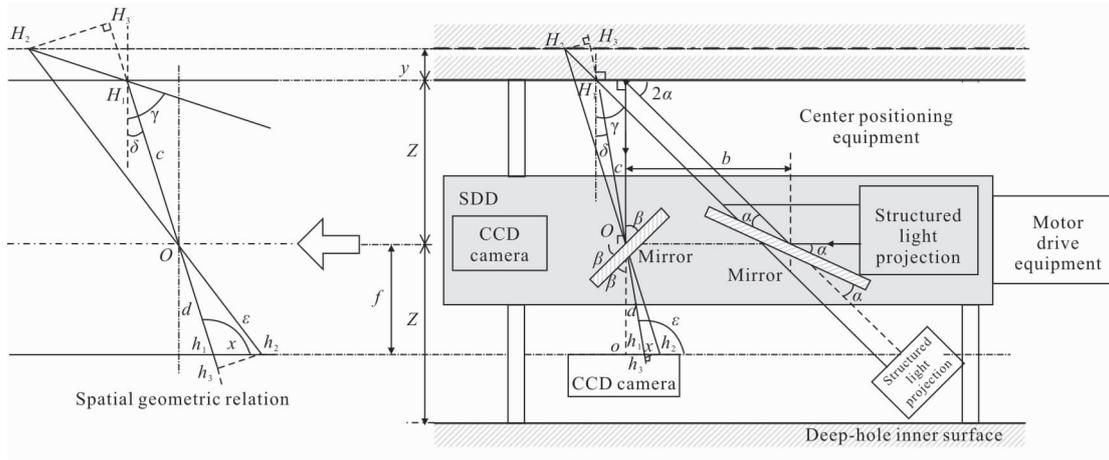


图 2 系统检测原理

Fig.2 Principle of system detection

分析图中空间几何关系<sup>[10]</sup>, 针对  $\Delta H_2H_3O$  与  $\Delta h_2h_3O$  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  $x=k \times u$ , 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。

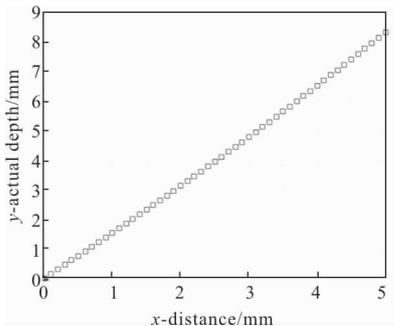


图 3 距离  $\mu$  与实际深度  $x$  关系

Fig.3 Relationship between distance  $\mu$  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。

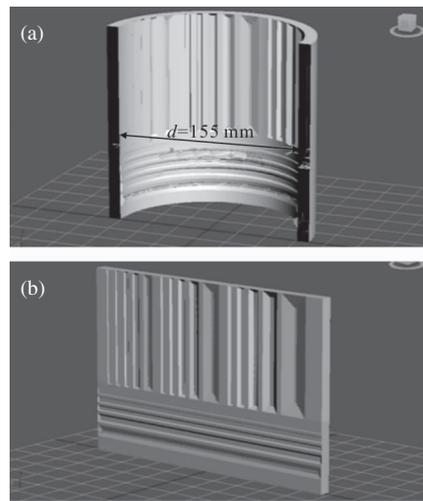


图 4 深孔内表面模型搭建

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。

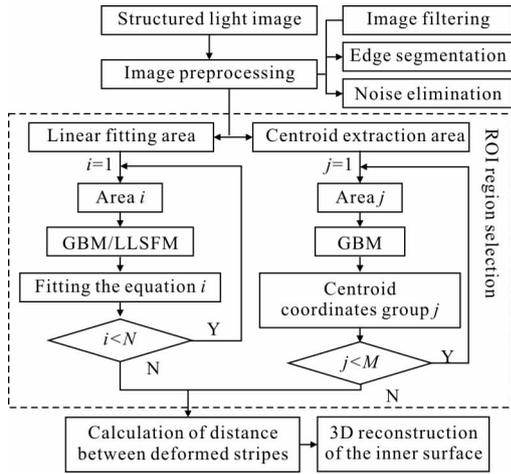


图 5 深孔内表面三维检测流程

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

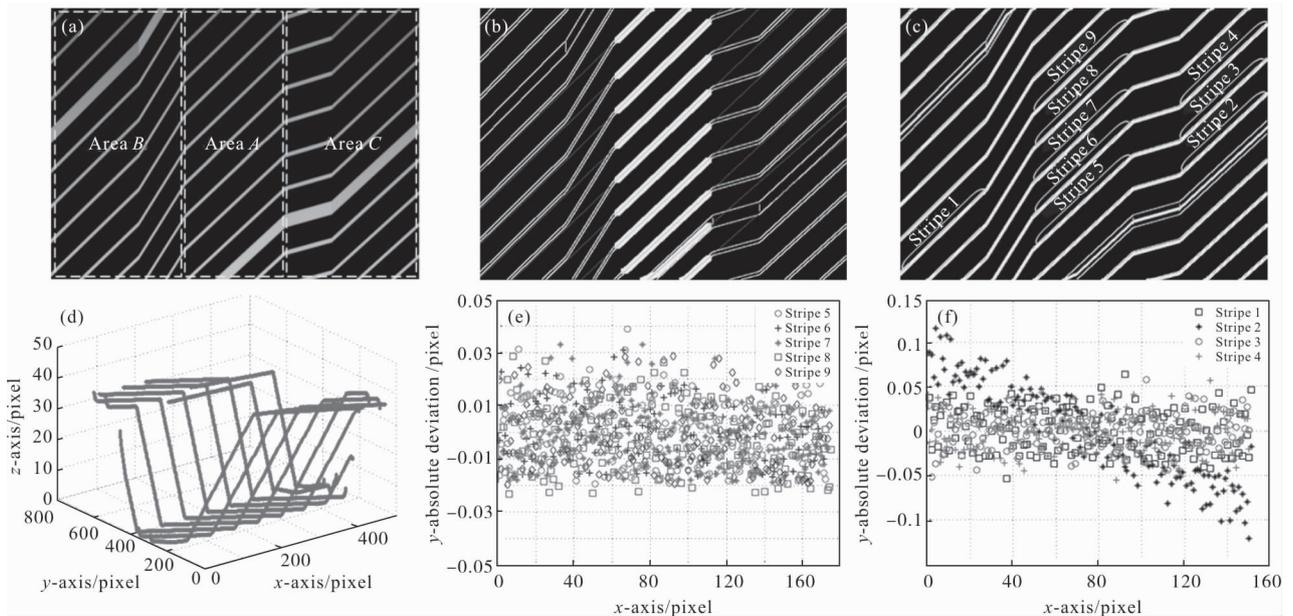


图 6 DIPM 模型内表面检测

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

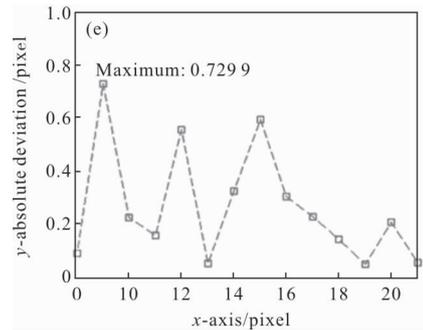
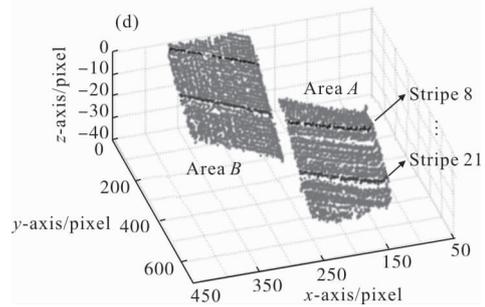
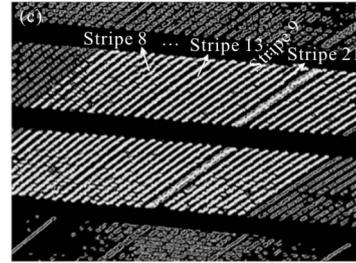
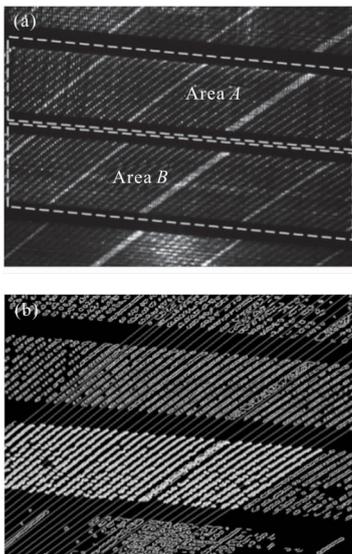


图 7 DIM 模型实物内表面检测

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。

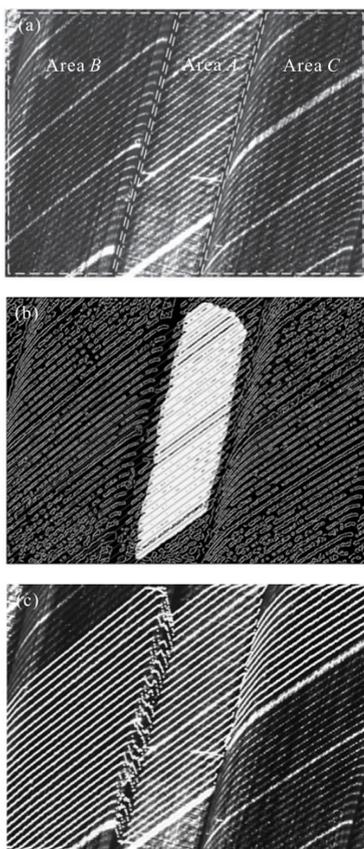


图 8 实际深孔内表面尺寸检测

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, 提取区域内部条纹的质心坐标, 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。

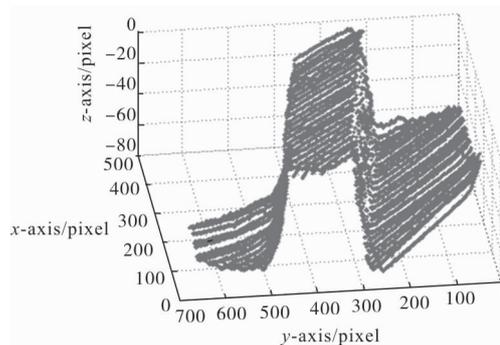


图 9 内表面三维重构

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)