



深孔内表面检测点云拼接技术研究

邵新杰 潘硕 宋彬 李晓磊 唐香珺

Research on point cloud splicing for inner surface inspection of deep hole

Shao Xinjie, Pan Shuo, Song Bin, Li Xiaolei, Tang Xiangjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210210>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深孔内表面结构光三维重构

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

红外与激光工程. 2018, 47(11): 1117004–1117004(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1117004>

基于结构光标记的光场三维成像技术研究

Research on 3D imaging technology of light field based on structural light marker

红外与激光工程. 2020, 49(3): 0303019–0303019–6 <https://doi.org/10.3378/IRLA202049.0303019>

载人潜水器的深海地貌线结构光三维重建

3D reconstruction of deep sea geomorphologic linear structured light based on manned submersible

红外与激光工程. 2019, 48(5): 503001–0503001(9) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0503001>

图像融合在空间目标三维重建中的应用

Application of image fusion in 3D reconstruction of space target

红外与激光工程. 2018, 47(9): 926002–0926002(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0926002>

点源透射比测试的高性能光陷阱技术研究

Research on high performance light trap technology for PST test

红外与激光工程. 2017, 46(1): 117006–0117006(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0117006>

多鸽巢自适应排序的快速相位展开方法

Fast phase unwrapping method based on multiple pigeonhole adaptive sorting

红外与激光工程. 2020, 49(8): 20200032–1–20200032–7 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200032>

深孔内表面检测点云拼接技术研究

邵新杰, 潘 硕*, 宋 彬, 李晓磊, 唐香珺

(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, 河北 石家庄 050003)

摘要: 深孔内表面检测系统获取的单视角点云无法体现深孔零件内表面全貌, 为实现深孔内表面完整面形的三维重建, 提出了一种深孔内表面检测系统的位姿标定技术, 用于提供深孔内表面重建的点云拼接初值。首先, 介绍了深孔内表面检测技术原理, 分析并建立了深孔零件测量点云的坐标变换模型, 确定了坐标变换模型中需要标定的系统位姿参数; 然后, 分析了系统在内表面上的测量轨迹, 以旋转轴转角描述测量轨迹, 并对点云逆向重建; 之后以系统参数的求解误差作为损失函数优化测量轨迹模型, 实现了系统位姿参数标定; 最后, 对直圆筒和凹槽部分的点云拼接实验表明: 该方法适用于深孔内表面检测, 易于操作, 拼接误差不大于 0.08 mm, 与其他方法相比均有一定优势。

关键词: 光学测量; 三维重建; 坐标变换; 深孔检测

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210210

Research on point cloud splicing for inner surface inspection of deep hole

Shao Xinjie, Pan Shuo*, Song Bin, Li Xiaolei, Tang Xiangjun

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

Abstract: The single-view point cloud obtained by the deep hole inner surface inspection system cannot reflect the full picture of the inner surface of the deep hole part. In order to realize the three-dimensional reconstruction of the complete surface shape of the deep hole inner surface, a pose calibration technology for the deep hole inner surface inspection system was proposed, which was used to provide the initial value of the point cloud stitching for the reconstruction of the inner surface of the deep hole. Firstly, the principle of deep hole inner surface detection technology was introduced, the coordinate transformation model of deep hole parts measurement point cloud was analyzed and established, the system pose parameters that need to be calibrated in the coordinate transformation model were determined; Then, the measurement trajectory of the system was described by the rotation axis angle, and the point cloud was reconstructed inversely; Then the measurement trajectory model was optimized with the solution error of the system parameter as the loss function, and the system pose parameter calibration was realized; Finally, point cloud splicing experiments of the straight cylinder and the concave groove show that the method was suitable for the detection of the inner surface of the deep hole and easy to operate, the splicing error was not more than 0.08 mm. Compared with other methods, it has certain advantages.

Key words: optical measurement; three-dimensional reconstruction; coordinate transformation; deep hole inspection

收稿日期: 2021-03-31; 修订日期: 2021-07-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51305454)

作者简介: 邵新杰, 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事装备技术状态检测、故障诊断、视觉测量等方面的研究。

通讯作者: 潘硕, 男, 硕士生, 主要从事结构光三位重建方面的研究。

0 引言

火炮身管、反后坐装置、发动机气缸等深孔类零件长径比大、内部空间狭小,难以集成高精度测量仪器,其内表面精密检测一直是加工制造业的难题^[1]。近年来,结构光技术因其精度高,测量速度快,无损检测等优点^[2]被广泛应用于深孔零件的三维测量中^[3-4]。

为获取深孔零件内表面完整点云信息,需要检测系统在被测零件内部旋转整周,通过点云拼接实现内表面整环三维重建^[5]。常用的点云拼接算法为迭代最近邻算法(ICP)^[6],该种算法依托“最近邻点”之间的约束关系对变换矩阵进行迭代优化,能够实现精细点云拼接,但该算法依赖于拼接初值的选取。近年来,国内外许多学者通过标志点法^[7-8],特征匹配法^[9-10]和旋转台法^[11]等不同方式^[11-12]获取拼接初值。标志点法通过在物体上粘贴标志点,获取不同位姿下的转换矩阵对测量点云进行匹配,由于标志点法容易造成测量点云空洞,并且在较长的深孔零件内部受空间限制无法粘贴,在深孔测量中很难应用。特征点法通过寻求不同点云重叠区域的特征点实现点云配准,但在变化不明显的内表面中无法提取有效的特征点,给点云拼接带来了困难。基于旋转台的拼接方法通过旋

转台标定确定被测物体或者测量系统空间运动的转换矩阵以提供拼接初值,在三维重建中有较大应用,但是对于复杂装配深孔零件的就地检测还需要更加简洁高效的拼接方法。

文中依托深孔零件内表面测量系统的单视角三维重构点云,力图实现内表面完整面形的三维重建。建立了检测系统的坐标转换模型,在该模型下提出了测量系统的位姿标定方法,并进行标定实验求解检测系统的位姿参数,通过精细点云拼接实现了深孔内表面三维重建。

1 测量原理

1.1 系统结构

文中使用的深孔零件检测系统如图 1 所示,系统由驱动系统和点云采集系统组成。在进行测量时,CCD 相机通过平面镜在深孔内表面上垂直成像,采集结构光发射器投射到深孔类零件内表面形成的多线结构光图像,生成表面点云。点云采集系统在测量时由步进电机牵引在被测零件中不断旋转,直至获取覆盖深孔类零件内表面的全部点云数据,测量系统的旋转角度由步进电机提供,最终通过点云拼接获取深孔零件内表面的完整点云。

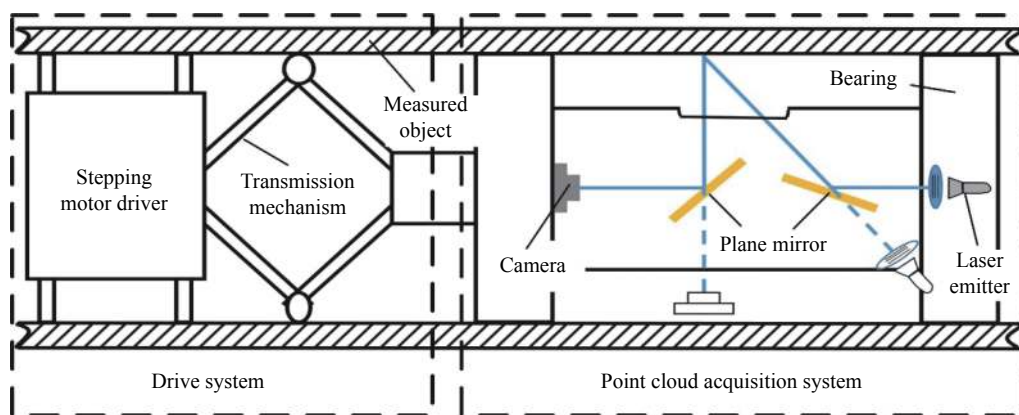


图 1 系统工作示意图

Fig.1 Diagram of system working

系统所用相机型号为 TXG03,分辨率为 656×494 pixel,镜头型号为 LM35JC10m,焦距为 35 mm,结构光源采用 BX-PT20V5 半导体绿光激光光源透过结构光栅产生多线结构光,驱动点云采集系统旋转的步进电机步距角为 0.1° 。

1.2 检测原理

文中使用的点云采集系统为多线结构光系统,其检测原理如图 2 所示,其中 $o-x_c y_c z_c$ 为相机坐标系, $o-x_w y_w z_w$ 为世界坐标系, $o-uv$ 为像素坐标系。

设世界坐标系中一被测点 $M \sim (x_w, y_w, z_w)^T$,其在图

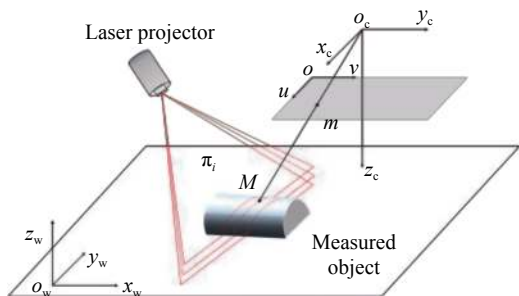


图 2 多线结构光测量原理

Fig.2 Multi-line structured light measurement principle

像坐标系中的对应点为 $m \sim (u, v)^T$, 它们对应的齐次表示为 $\tilde{M} \sim (x_w, y_w, z_w, 1)^T, \tilde{m} \sim (u, v, 1)^T$ 。根据针孔相机模型有^[13]:

$$s\tilde{m} = K [R, t] \tilde{M} \quad (1)$$

式中: s 为固定参数; K 为相机内部矩阵; $[R, t]$ 为世界坐标到相机坐标的旋转平移矩阵。在多线结构光系统中, 点 M 同时为光平面 π_i ($i=1, 2, \dots, n, n$ 为光平面的数量) 上一点, 光平面在世界坐标系中的方程为:

$$A_i x_w + B_i y_w + C_i z_w + D_i = 0 \quad (2)$$

式中: A_i, B_i, C_i, D_i 为光平面 π_i 参数。将相机坐标系建立在世界坐标系上, 联立公式 (1)、(2), 解算所有光平面上的点, 可以得到被测物体表面在相机坐标系中的测量点云^[14]。系统在直圆筒中的测试点云如图 3 所示。

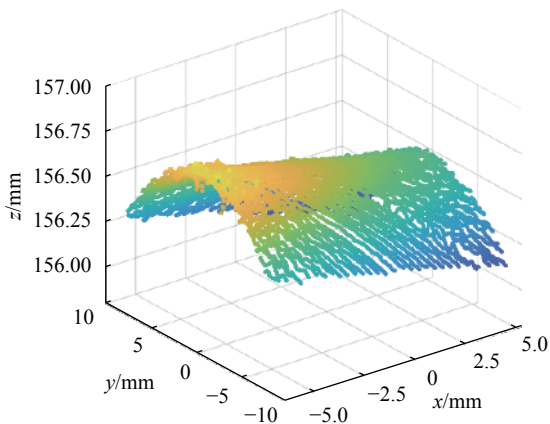


图 3 光滑圆筒区域采集点云

Fig.3 Point cloud of the smooth cylinder region

2 点云拼接原理

2.1 坐标转换模型

在理想的设计模型中, 旋转轴与深孔内表面中心

轴重合, 相机光轴经反光镜作用与旋转轴相互垂直。由于装配误差存在, 实际系统测量的空间位置如图 4 所示, 旋转轴、深孔中心轴与相机光轴在测量系统中实际为一般位置的空间直线, 均不在同一平面上。在测量过程中, 文中作如下假设:

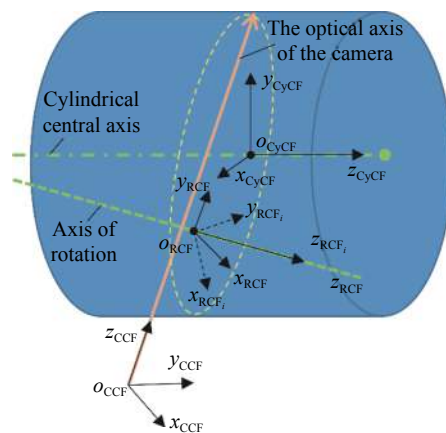


图 4 坐标转换模型

Fig.4 Coordinate transformation model

(1) 相机光轴与旋转轴之间的位置关系由装配关系决定, 检测系统装配之后的相对位置关系不变, 因此在测量过程中相机光轴与旋转轴之间的位置关系固定不变;

(2) 在旋转测量过程中, 旋转轴线与深孔类零件内表面轴线位置误差是由轴承与被测零件之间间隙造成, 在实际测量过程中轴承间隙往往在固定的一侧, 忽略在旋转过程中的跳动误差, 测量时旋转轴和深孔类零件的中心轴的位置固定不变。

基于以上假设, 建立图 4 所示坐标系:

$o - x_{CCF}y_{CCF}z_{CCF}$: 相机坐标系 (CCF), 坐标原点在镜头中心, z 轴为相机光轴, 固定在相机上。

$o - x_{RCF_i}y_{RCF_i}z_{RCF_i}$: 点云旋转坐标系 (RCF_i), 原点建立在旋转轴上某个定点, 在旋转测量过程中与 CCF 拥有固定的位置关系, 其 z 轴与旋转轴重合, 空间位置随系统测量姿态旋转变化, i 为不同测量位置的点云旋转坐标系。

$o - x_{RCF}y_{RCF}z_{RCF}$: 全局旋转坐标系 (RCF), 原点建立在 RCF_i 原点上, z 轴与旋转轴重合, 与 RCF_i 存在固定的旋转关系, 在旋转测量过程中空间位置固定不变。

$o - x_{CyCF}y_{CyCF}z_{CyCF}$: 全局圆柱坐标系 (CyCF), 原点

建立在深孔类零件内表面中心轴线上一定点,其 z 轴与身管中心轴线重合,在旋转测量过程中空间位置固定不变。

为了完成测量点云的整环拼接,在相机测量过程中将整体坐标系建立在 $CyCF$ 上,将不同角度获取的点云数据转换到 $CyCF$ 上完成身管轴线的三维重建,测量过程中的转换过程为 $CCF \rightarrow RCF_i \rightarrow RCF \rightarrow CyCF$ 。坐标系之间的转换关系分别为:

$$\begin{bmatrix} x_{RCF_i} \\ y_{RCF_i} \\ z_{RCF_i} \\ 1 \end{bmatrix} = [R_1 \quad T_1] \begin{bmatrix} x_{CCF} \\ y_{CCF} \\ z_{CCF} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_{RCF} \\ y_{RCF} \\ z_{RCF} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{RCF_i} \\ y_{RCF_i} \\ z_{RCF_i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_{CyCF} \\ y_{CyCF} \\ z_{CyCF} \\ 1 \end{bmatrix} = [R_2 \quad T_2] \begin{bmatrix} x_{RCF} \\ y_{RCF} \\ z_{RCF} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过公式 (3)、(4)、(5) 可得:

$$\begin{bmatrix} x_{CyCF} \\ y_{CyCF} \\ z_{CyCF} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_{11} \\ r_{14} & r_{15} & r_{16} & t_{12} \\ r_{17} & r_{18} & r_{19} & t_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_{21} \\ r_{24} & r_{25} & r_{26} & t_{22} \\ r_{27} & r_{28} & r_{29} & t_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{CCF} \\ y_{CCF} \\ z_{CCF} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: R_1, R_2, T_1, T_2 为固定参数的旋转位移矩阵; $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{19}$ 为 R_1, R_2 内的参数; $t_{21}, t_{22}, \dots, t_{29}$ 为 T_1, T_2 内的参数,在进行整环测量时需要对这些参数进行标定求解; θ 为系统的旋转角度,在实际测量中可以通过高精度的步进电机控制得到。在实际坐标转换过程中, R_1, R_2, T_1, T_2 中参数的数值大小与系统装配关系有关,在检测系统不变的情况下为固定值,公式 (6) 化为:

$$\begin{bmatrix} x_{CyCF} \\ y_{CyCF} \\ z_{CyCF} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1(\theta) & t_2(\theta) & t_3(\theta) & t_4(\theta) \\ t_5(\theta) & t_6(\theta) & t_7(\theta) & t_8(\theta) \\ t_9(\theta) & t_{10}(\theta) & t_{11}(\theta) & t_{12}(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{CCF} \\ y_{CCF} \\ z_{CCF} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

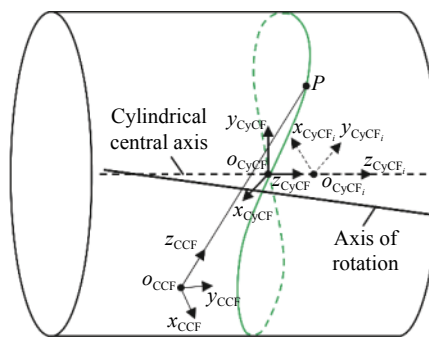
式中: $t_i(\theta) = a_i \sin(\theta) + b_i \cos(\theta) + c_i, i = 1, 2, \dots, 12$ 为 $CCF \rightarrow CyCF$ 的旋转平移矩阵的内部参数; a_i, b_i, c_i 为与 $CCF \rightarrow RCF_i$ 和 $RCF \rightarrow CyCF$ 有关的旋转平移参数运算而来的系统位姿参数。在获取系统位姿参数后,便可以通过步进电机的旋转角度在公式 (7) 下完成深孔类零件多视角下的点云拼接。

2.2 逆向重建模型

实际测量得到的 CCF 点云由于装配误差存在,如图 3 所示测量直圆筒点云,点云轮廓的不同倾斜程度反映了不同的测量位置。对 CCF 中的点云进行圆柱拟合,依托拟合的圆柱方程建立点云圆柱坐标系 ($CyCF_i$),其空间位置如图 5 (a) 所示, $CyCF_i$ 原点为相机光轴与测量点云交点在深孔类零件内表面中心轴线上的投影点, z 轴与 $CyCF$ 的 z 轴重合,为测量深孔

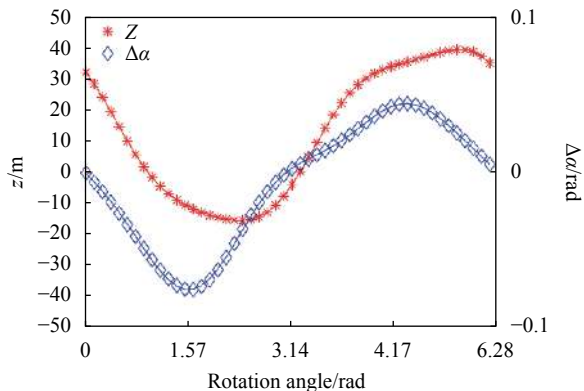
内表面的中心轴线,因此不同位置的 $CyCF_i$ 与 $CyCF$ 之间仅存在 z 轴上的位移和旋转变换关系,通过圆柱拟合求测量点云在 $CyCF_i$ 中的坐标可以重建不同位置的测量点云在 $CyCF$ 中的位置。

如图 5 (a) 所示,旋转测量时相机光轴在深孔内



(a) 逆向重建坐标系图示

(a) Reverse reconstruction coordinate system diagram



(b) 测量轨迹描述示意图

(b) Schematic diagram of measurement track description

图 5 逆向重建模型

Fig.5 Reverse reconstruction model

表面的测量轨迹实际为不同轴的单叶双曲面和圆柱的交线,其轨迹与系统位姿参数有关^[14]。测量轨迹上一点对应的 CyCF_i 在 CyCF 中的位置随系统旋转角度 θ 不断变化, CyCF_i 与 CyCF 之间在 z 轴上的位移 $\Delta z = |o_{\text{CyCF}} o_{\text{CyCF}_i}|$ 和旋转角 α 与系统旋转角度 θ 之间存在一定的函数关系。旋转轴与深孔中心轴相对位置不变,旋转一周后测量点重新回到起始位置,为关于 θ 的周期变化函数。

为准确描述测量轨迹,设被测内表面为中心轴为 z 轴,直径为 155 mm 的圆柱,旋转轴为过定点 (10,0,0),方向为 $(-0.123\ 1, 0.123\ 1, 0.984\ 7)^T$ 的空间直线,初始位置的光轴为过定点 (40,15,15),方向为 $(0.951\ 3, 0.264\ 3, 0.158\ 6)^T$ 的空间直线,旋转测量中由测量轨迹确定的 CyCF_i 与 CyCF 之间的相对位移 Δz 和角度差值 $\Delta\alpha = \alpha - \theta$ 在等间隔的旋转角度在 50 个点的分布如图 5(b) 所示,对测量点进行傅里叶级数拟合,当拟合阶数为 3 时,拟合的曲线能够大致符合测量的形状,拟合的 RMSE 分别为 0.142\ 7, 3.9×10^{-4} 。将 CyCF 建立在旋转测量时所有 CyCF_i 的起始位置时,设位置变换参数关系为:

$$\alpha(\theta) = \theta + \sum_{k=1}^3 (P_k \sin k\theta + Q_k \cos k\theta) \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha(\theta) & -\sin \alpha(\theta) & 0 & 0 \\ \sin \alpha(\theta) & \cos \alpha(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\text{CyCF}_i} \\ y_{\text{CyCF}_i} \\ z_{\text{CyCF}_i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1(\theta) & t_2(\theta) & t_3(\theta) & t_4(\theta) \\ t_5(\theta) & t_6(\theta) & t_7(\theta) & t_8(\theta) \\ t_9(\theta) & t_{10}(\theta) & t_{11}(\theta) & t_{12}(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\text{CCF}} \\ y_{\text{CCF}} \\ z_{\text{CCF}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

CCF 点云数据在 CyCF_i 中的坐标在 2.2 节中求出,为求得系统位姿参数 a_i, b_i, c_i ,实验过程中旋转 n 次采集光滑圆筒内壁的点云数据,通过 SDV 分解求出在不同角度测量位置的转换矩阵,转换矩阵的值随测量角度 θ 变化,最少需要 3 个不同角度测量位置的变换方程才能求解出系统位姿参数。为确保点云覆盖圆筒整环,使用最优化算法通过式进行参数求解。其中 P_k, Q_k, p_k, q_k 为变量,利用优化算法求解 $t_i(\theta)$ 中的系统位姿参数,在不同角度的测量过程中,系统位姿参数固定不变,因此设代价函数为:

$$\min E(P_k, Q_k, p_k, q_k) = \sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^n |t_j^i - \hat{t}_j|^2 \quad (12)$$

式中: t_j^i 为第 i 组点云数据求取的 t_j , \hat{t}_j 为通过最小二

$$\Delta z(\theta) = \sum_{k=1}^3 (p_k \sin k\theta + q_k \cos k\theta) \quad (9)$$

式中: P_k, Q_k, p_k, q_k 为固定参数,数值大小与测量系统旋转轴和被测内表面中心轴的空间位置有关。因此,测量系统在不同的旋转角度下得出 CyCF_i 与 CyCF 的转换关系可描述为:

$$\begin{bmatrix} x_{\text{CyCF}} \\ y_{\text{CyCF}} \\ z_{\text{CyCF}} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha(\theta) & -\sin \alpha(\theta) & 0 & 0 \\ \sin \alpha(\theta) & \cos \alpha(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\text{CyCF}_i} \\ y_{\text{CyCF}_i} \\ z_{\text{CyCF}_i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

参数 $P_k, Q_k, p_k, q_k, k=1, 2, 3$ 为逆向重建模型中的未知量,当重建参数符合测量系统位姿实际情况时,可以确定不同旋转角度的点云在全局圆柱坐标系中的位置。

2.3 基于优化算法的系统位姿自标定技术

在坐标转换模型中, $t_i(\theta)$ 的系统位姿参数 a_i, b_i, c_i 在旋转测量过程中不发生变化,系统位姿参数被确定之后,在测量过程中通过步进电机旋转的角度可以将不同检测位置的 CCF 点云转换到 CyCF 中,实现高精度点云拼接。

为求取系统位姿参数,结合点云逆向重建,通过公式 (7)、(10) 可以得到:

乘求解出 a_i, b_i, c_i 的期望值。在优化计算过程中,不同的重建参数求出的系统位姿参数的变化值不同,当代价函数趋于最小时,系统位姿参数趋于稳定,与检测系统的位姿参数接近,将此时的 a_i, b_i, c_i 值作为最终的标定结果,完成系统测量位姿参数标定。在点云拼接过程中,测量系统通过不同测量姿态的 θ 实现点云拼接。

3 实验与分析

文中搭建系统如图 6 所示,标定实验中使用精密加工的 304 不锈钢标定筒,内径 155 mm,外径 175 mm,加工精度为 0.02 mm,内表面粗糙度 Ra 为 0.4 μm 。

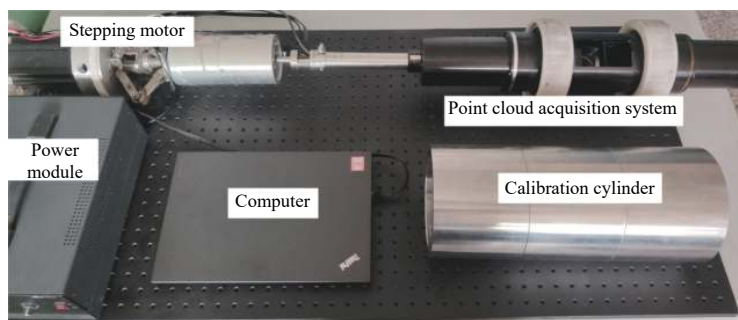


图 6 试验装置图

Fig.6 Experimental setup

3.1 标定实验

为验证文中算法,使用标定筒对检测系统位姿进行标定时。标定步骤如图 7 所示。首先以固定步长旋转深孔类零件测量系统,对固定内径的直圆筒进行三维重构,由点云采集系统获取不同角度测量区域在 CCF 中的单视角点云;然后,对 CCF 中的点云进行圆柱拟合,求取 CCF 中 z 轴与柱面交点在柱面中心轴线的投影点作为 CyCF_i 的原点,将点云通过坐标变换转换到 CyCF_i 中;然后,结合逆向重建模型建立 CyCF_i→CyCF 中的坐标转换关系,并通过 CCF 点云坐标和 CyCF 中的点云坐标关系求解系统位姿参数,在求解过程中不断调整逆向重建参数,求取损失函数接近最小值收敛时的系统位姿参数。最后,在实际测量中通过标定的系统位姿参数对不同位置的测量点云进行点云拼接,完成深孔的三维重建。

在标定实验中,为提高重建误差模型参数的拟合精度,尽量密集得采集深孔内表面点云,以 8°为步长采集标定筒内表面的点云数据,增加重叠区域。按照

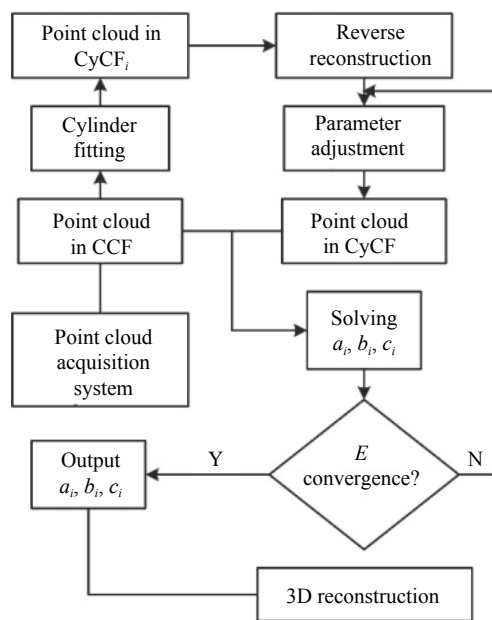


图 7 标定实验流程

Fig.7 Calibration experiment process

上述步骤进行系统位姿参数标定实验,标定结果如表 1 所示。

表 1 系统位姿参数标定结果

Tab.1 The calibration results of the system pose parameters

$t_1(\theta)$			$t_2(\theta)$			$t_3(\theta)$		
a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2	a_3	b_3	c_3
0.0014	0.0250	0.0062	0.9996	0.0078	0.0024	-0.0078	0.9993	0
$t_4(\theta)$			$t_5(\theta)$			$t_6(\theta)$		
a_4	b_4	c_4	a_5	b_5	c_5	a_6	b_6	c_6
1.2186	-79.1166	-0.0280	0.0386	-0.0038	-0.0013	0.0078	-0.9986	0
$t_7(\theta)$			$t_8(\theta)$			$t_9(\theta)$		
a_7	b_7	c_7	a_8	b_8	c_8	a_9	b_9	c_9
0.9997	0.0079	0.0025	-79.1178	-1.2321	-0.1902	0	0	0.9986
$t_{10}(\theta)$			$t_{11}(\theta)$			$t_{12}(\theta)$		
a_{10}	b_{10}	c_{10}	a_{11}	b_{11}	c_{11}	a_{12}	b_{12}	c_{12}
-0.0145	-0.0020	-0.0029	0	0.0020	-0.0318	-4.7672	-5.9891	4.9857

3.2 精度评价

为评估文中点云拼接方法的性能,使用表 1 中的标定数据对标定筒内表面进行独立的测量实验,在精度评估实验中,每 10°采集标定筒其他区域的内表面点云数据进行拼接,其拼接结果及细节如图 8 (a)、(b) 所示。将两片点云重叠区域到全局坐标系 z 轴的径向距离差值作为拼接误差,对点云拼接的重叠区域拼接误差计算结果如图 8 (c) 所示。由图 8 (c) 可知,

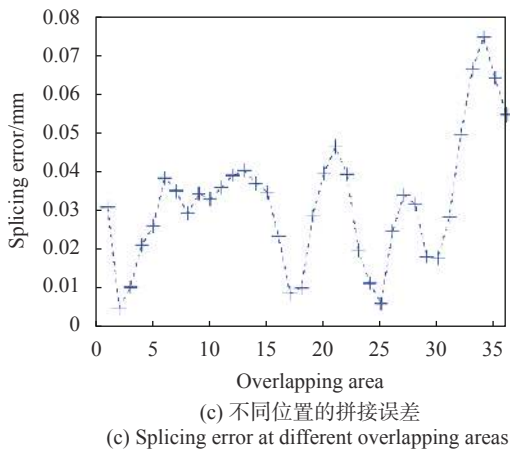
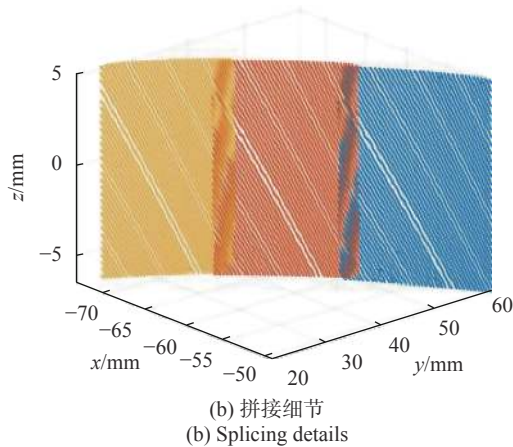
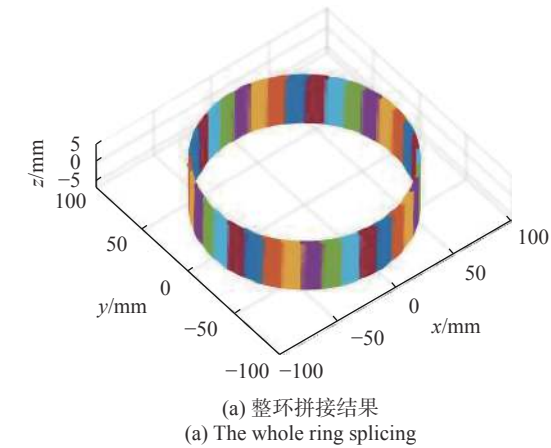


图 8 点云拼接结果

Fig.8 Result of the point cloud splicing

在 155 mm 直径的深孔类零件测量条件下,点云拼接的多数重叠区域拼接误差要低于 0.05 mm,最大误差在 0.08 mm 以下,说明文中提出算法有效,拼接精度满足实际要求。将拼接的点云结果向 xoy 平面投影,拟合平面圆周求取测量直圆筒的直径为 154.957 mm,能够对深孔内表面的关键参数提取的精度要求。参考文献 [11] 测量圆柱内径的点云拼接精度为 0.12 mm,参考文献 [15] 在测量拼接 60 mm 直径圆柱点云时重叠误差在 0.05 mm 以下,文中提出的拼接方法精度与之相比均有明显优势。

3.3 沟槽区域重建

对实际零件进行实验验证,使用深孔类零件内表面检测系统对图 9 (a) 所示带有凹槽的深孔类零件进

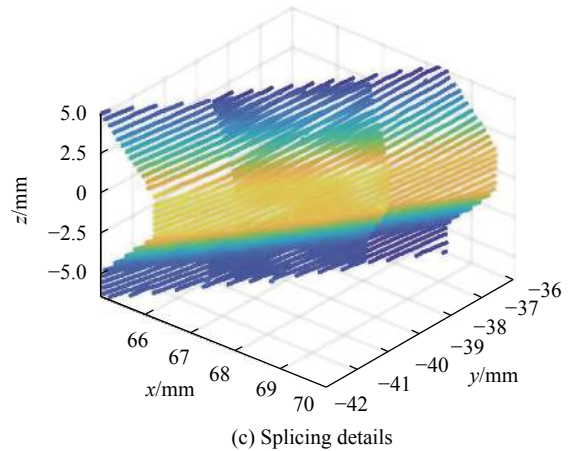
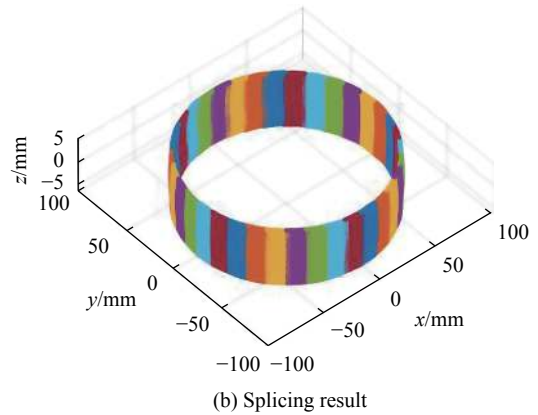
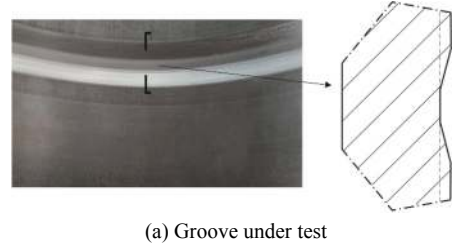


图 9 凹槽区域重建结果

Fig.9 Splicing results of groove regions

行测量,在实验过程中同样以 10° 为步长旋转采集点云数据。对凹槽部分进行点云拼接实验,重建结果及细节如图 9(b) 所示,拼接重叠处过渡光滑,拼接精度满足需求。

4 结 论

文中基于深孔类零件检测场景,通过对旋转轴和深孔类零件中心轴的位置分析建立了深孔类零件点云拼接数学模型,并提出了该种转换模型的标定方法,解决了在深孔类零件内表面检测中的点云拼接问题。该方法仅利用旋转机构旋转的角度便能够实现点云的高精度拼接,鲁棒性好,能够为 ICP 算法提供准确、稳定的初值。与传统的粗拼接方法相比,不需要粘贴标志点和特征匹配就能实现较高精度的点云拼接,能够应用到一般的深孔类零件内表面检测系统中。同时文中提出的坐标转换模型以测量系统的一般空间位置为基础,对系统安装位置要求少,对深孔零件检测装置的安装位置具有较强的适用性。最后通过实验证明,文中算法的拼接误差不大于 0.08 mm 。

参考文献:

- [1] Zhu Ye, Wang Lianpo, Gu Yonggang, et al. Three-dimensional inner surface inspection system based on circle-structured light [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018, 140(12): 121007.
- [2] Liu Xiaoli, He Dong, Chen Hailong, et al. Techniques of structured light measurement network with 3D sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303007. (in Chinese)
- [3] Shao Xinjie, Xie Xiangrong, Cao Lijun, et al. Design and realization of inner diameter measurement system for gun barrel based on structure light [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2019, 31(1): 5-10. (in Chinese)
- [4] Ding Chao, Tang Liwei, Cao Lijun, et al. Image distortion correction algorithm for complicated deep-hole profile using structured-light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1217008. (in Chinese)
- [5] Ding Chao, Tang Liwei, Cao Lijun, et al. 3D reconstruction of deep-hole inner surface using structured light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1117004. (in Chinese)
- [6] Besl P J, Mckay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14: 239-256.
- [7] Chua C S, Jarvis R. Point signatures: A new representation for 3D object recognition [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 25: 63-85.
- [8] Luo Xianbo, Zhong Yuexian, Li Renju. Data registration in 3-D scanning systems [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(8): 1104-1106. (in Chinese)
- [9] Huang Yuan, Da Feipeng, Tao Haiji. An automatic registration algorithm for point cloud based on feature extraction [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0308002. (in Chinese)
- [10] Liu Jian, Bai Di. 3D point cloud registration algorithm based on feature matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1215005. (in Chinese)
- [11] Lang Wei, Xue Junpeng, Li Chenghang, et al. Splicing of multi-view point clouds based on calibrated parameters of turntable [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1104003. (in Chinese)
- [12] Wang Shuai, Sun Huayan, Guo Huichao. Overlapping region extraction method for laser point clouds registration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): S126002. (in Chinese)
- [13] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [14] Zhang Guangjun, Liu Zhen, Sun Junhua, et al. Novel calibration method for a multi-sensor visual measurement system based on structured light [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(4): 043602.
- [15] Ma Guoqing, Liu Li, Yu Zhenglin, et al. Three-dimensional point cloud splicing technology of complex surfaces based on iGPS [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0204003. (in Chinese)