

### 小尺寸零件的无标志点扫描测量方法

莫彩利 王立忠 任茂栋 赵建博 王森 周皓骏

#### Scanning measurement method of small size parts without marks

MO Cai-li, WANG Li-zhong, REN Mao-dong, ZHAO Jian-bo, WANG Sen, ZHOU Hao-jun

引用本文:

莫彩利, 王立忠, 任茂栋, 赵建博, 王森, 周皓骏. 小尺寸零件的无标志点扫描测量方法[J]. *中国光学*, 2024, 17(2): 409-422.

doi: 10.37188/CO.2023-0103

MO Cai-li, WANG Li-zhong, REN Mao-dong, ZHAO Jian-bo, WANG Sen, ZHOU Hao-jun. Scanning measurement method of small size parts without marks[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 409-422. doi: 10.37188/CO.2023-0103

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0103>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于线结构光传感器的轨道板几何形貌检测方法

A detection method based on line-structured light sensor for geometrical morphology of track slab

*中国光学 (中英文)*. 2018, 11(5): 841 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0841>

#### 超小自聚焦光纤探头的研究进展

Research progress on ultra-small self-focusing optical fiber probe

*中国光学 (中英文)*. 2018, 11(6): 875 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0875>

#### 采用五棱镜扫描法检测大口径平面镜的面形

Surface shape measurement of large flat mirrors using a scanning pentaprism method

*中国光学 (中英文)*. 2019, 12(4): 920 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0920>

#### 非零位凸非球面子孔径拼接检测技术研究

Research on non-null convex aspherical sub-aperture stitching detection technology

*中国光学 (中英文)*. 2018, 11(5): 798 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0798>

#### 无扫描激光三维成像雷达研究进展及趋势分析

Research progress and trend analysis of non-scanning laser 3D imaging radar

*中国光学 (中英文)*. 2018, 11(5): 711 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0711>

#### 用于智能移动设备的条纹反射法检测系统

Deflectometry measurement system for smart mobile devices

*中国光学 (中英文)*. 2017, 10(2): 267 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0267>

文章编号 2097-1842(2024)02-0409-14

## 小尺寸零件的无标志点扫描测量方法

莫彩利<sup>1,3</sup>, 王立忠<sup>1,2\*</sup>, 任茂栋<sup>3</sup>, 赵建博<sup>2,3</sup>, 王森<sup>1,3</sup>, 周皓骏<sup>2,3</sup>

(1. 新疆大学机械工程学院, 新疆乌鲁木齐 830046;

2. 西安交通大学机械工程学院机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西西安 710049;

3. 新拓三维技术(西安)有限公司创新实验室, 陕西西安 710086)

**摘要:**小尺寸零件的表面积小、结构复杂,传统标志点拼接方法需要在零件表面人工粘贴标志点,导致表面的测量数据缺失出现空洞。基于特征的点云拼接方法要求零件表面具有易区分的几何或距离特征,不适用于包含重复性特征的回转体零件。本文提出一种基于机械拼接的无标志点扫描测量方法,不需要粘贴标志点,不依赖于零件表面特征。首先,采用基于摄影测量的相机标定方法得到相机的高精度内外参数,重建标定板上靶点的高精度三维坐标,接着通过跟踪编码靶点的位置建立转台不同转角对应的旋转矩阵,进而解算出转轴方向向量和轴上定点坐标,实现转轴和相机的同步标定。在完成两个转轴位姿精确标定的基础上,利用转台转角构建旋转拼接矩阵,实现多视角点云粗配准。最后,基于法向迭代最近点算法(Normal Iterative Closest Point, NICIP)完成点云的精配准。实验结果表明:使用靶点跟踪法标定后的两转轴夹角误差较传统的标准球拟合法低 $0.023^\circ$ ,标定后测量标准球的整体平均尺寸误差小于 $0.012\text{ mm}$ ;在小尺寸零件自动化测量时,机械拼接方法在精配准后的点云拼接效果与标志点拼接方法相近,且拼接稳定性更高。机械拼接方法适用于无法粘贴标记点的小尺寸零件三维形貌测量场景。

**关键词:**结构光;机械拼接;小尺寸零件;转轴标定;NICP算法

中图分类号:TP391.7; TH741 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2023-0103

## Scanning measurement method of small size parts without marks

MO Cai-li<sup>1,3</sup>, WANG Li-zhong<sup>1,2\*</sup>, REN Mao-dong<sup>3</sup>, ZHAO Jian-bo<sup>2,3</sup>, WANG Sen<sup>1,3</sup>, ZHOU Hao-jun<sup>2,3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, School of Mechanical Engineering,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Innovation Lab, XTOP 3D Technology (Xi'an) Co. Ltd, Xi'an 710086, China)

\* Corresponding author, E-mail: wanglz@mail.xjtu.edu.cn

**Abstract:** Small-size parts have a small surface area and complex structure. The traditional mark splicing method needs to manually paste marks on the surface of parts, resulting in missing the measurement data of the surface and becoming holes. The feature splicing method requires the surface of parts to have easily distinguishable geometric or distance features, which are not suitable for rotating parts containing repetitive features. We propose a scanning measurement method without marks based on mechanical splicing, which does not need to paste marks or depend on the surface features of parts. Firstly, the camera calibration method based on photogrammetry is used to reconstruct the high-precision three-dimensional coordinates of the tar-

收稿日期:2023-06-19; 修订日期:2023-07-06

基金项目:国家重点研发计划(No. 2022 YFB4601802)

Supported by National Key Research and Development Program (No. 2022 YFB4601802)

get on the calibration board. By tracking the position of the coded target, the rotation matrix corresponding to different angles of the turntable is established, and the direction vector of the rotation axis and the fixed point coordinates on the axis are solved. Then the synchronous calibration of the rotation axis and the camera is completed. Secondly, based on the accurate calibration of poses of two rotation axes, the rotation mosaic matrix is constructed by using the turntable angle to realize the rough registration of multi-view point clouds. Finally, based on the Normal Iterative Closest Point (NICP) algorithm, the fine registration of the point clouds is completed. Experimental results show that the angle error between the two rotation axes calibrated by the target tracking method is  $0.023^\circ$  lower than that of the traditional standard ball fitting method. After calibration, the average size error of the standard ball is less than 0.012 mm. In the automatic measurement of small-size parts, the point cloud splicing effect of the mechanical splicing method after fine registration is similar to that of the mark splicing method, and the splicing stability is higher. The mechanical splicing method is suitable for the 3D topography measurement of small-size parts where the marks cannot be pasted.

**Key words:** structured light; mechanical splicing; small-size parts; axis calibration; NICP algorithm

## 1 引言

从工业 4.0 到中国制造 2025, 智能制造已经成为现代工业发展的焦点, 对制造产品的质量检测需求日益攀升。传统的接触式零件检测技术已无法满足先进制造的需求, 光学三维测量技术可对待测零件进行非接触式检测, 效率高、精度高, 且能实现在机检测<sup>[1]</sup>, 在逆向工程、文物修复、工业检测、医疗矫正等领域<sup>[2-5]</sup>得到广泛应用。基于相移和光栅投影的面结构光测量技术具有全场测量、重建点云密集等优点, 常用于复杂曲面零件的三维形貌测量<sup>[6-7]</sup>。在实际测量过程中, 由于视野遮挡、测量幅面限制等因素, 单次扫描只能获得零件的局部数据, 需要将不同角度扫描的多视角点云进行拼接, 以形成整体的三维点云<sup>[8]</sup>。

目前常用的点云拼接方法包括: 1) 基于标志点的拼接方法。通过在被测零件表面人工粘贴 3 个以上标志点实现多视角点云拼接<sup>[9-10]</sup>。该方法拼接精度高, 但测量前需要手动贴点, 大批量生产时效率低, 且对于小尺寸(直径小于 150 mm)零件易造成测量数据损失, 有些零件表面不允许粘贴标志点(如珍贵文物); 2) 基于迭代最近点算法 (Iterative Closest Point, ICP) 的拼接方法。文献 [11-12] 提出改进的 ICP 算法实现点云自动拼接, 该方法对初始位姿敏感, 容易陷入局部最优解, 适用于粗配准之后的精配准; 3) 基于特征的拼接方法。常用基于几何<sup>[13]</sup>或距离<sup>[14]</sup>特征的方法进行

点云拼接。前者适用于几何形貌复杂的零件, 对于几何特征简单或含有对称性特征的回转体零件(如涡轮), 拼接效果不稳定。后者需要两个视角有较多重叠区域, 冗余数据多; 4) 基于精密运动机构的拼接方法。常用机械臂、转台等设备来辅助点云粗配准, 机械臂<sup>[15-16]</sup>多用于大尺寸零件测量, 单轴转台<sup>[17-18]</sup>用于小尺寸零件测量, 但由于单轴旋转的有限性, 难以获得复杂结构零件的完整点云数据。为此, 胡民政等<sup>[19]</sup>设计了两轴数控转台实现两个方向的旋转测量。结合转台的点云拼接方法不需要粘贴标志点, 不依赖于零件表面特征, 在工业自动化场景下应用广泛, 但点云拼接质量取决于转轴的标定精度。

现有的转轴标定方法包括基于辅助工具的方法和免工具方法。文献 [20-21] 分别将特制 L 型标定块、高精度直角平面作为标定工具, 利用多视角点云拟合平面, 根据平面交线计算转轴, 该方法需要标定物具有足够的精度, 加工成本高。文献 [19] 及文献 [22] 均采用标准球来辅助标定, 前者通过两个不同高度的标准球拟合圆来获得轴线, 但两个标准球的高度差会影响标定精度; 后者根据球心位置建立与转台相关的坐标系和近似平面, 利用最小二乘法计算转轴位姿; 但两种方法的相机标定和转轴标定均分步进行, 容易造成误差累计。吕海东等<sup>[23]</sup>提出一种基于 2D 靶标的相机和转轴同步标定方法, 但其标定过程需要进行多次形状拟合, 难以保证标定精度。Pang X F 等<sup>[24]</sup>

提出一种无工具的标定方法, 选取一对配准良好的点云计算初始转轴, 再迭代优化获得最佳轴线, 该方法依赖于对象的特征, 不适用于平坦或无明显特征的零件。

为了实现小尺寸复杂结构零件的无标志点扫描测量, 通过两轴数控转台来实现多视角点云拼接。同时, 采用精度要求较低的标定板作为辅助工具, 实现相机和转轴的同步标定。首先, 采用基于摄影测量的相机标定方法进行双目相机标定, 通过跟踪标定靶点建立不同转台转角对应的点云旋转变换矩阵, 利用该矩阵与转角的运算关系, 精确标定转轴的位姿。然后, 根据两个转轴的位姿和转动角度构建旋转矩阵, 利用旋转拼接原理完成点云的粗配准。随后再借助 NICP 算法进行补偿修正, 提高多视角点云的最终配准精度。最后, 通过转轴标定及点云拼接的测量实验, 验证了所提方法的可行性和测量精度。

## 2 无标志点扫描测量系统参数标定

图 1 为无标志点扫描测量方法的流程图。首先进行测量系统的参数标定, 基于标定结果和旋转拼接原理完成点云的粗配准, 然后再借助 NICP 算法实现稳健的点云精配准, 旨在保证系统拼接精度的同时, 不粘贴标记点, 提高点云的拼接稳定性和泛用性。

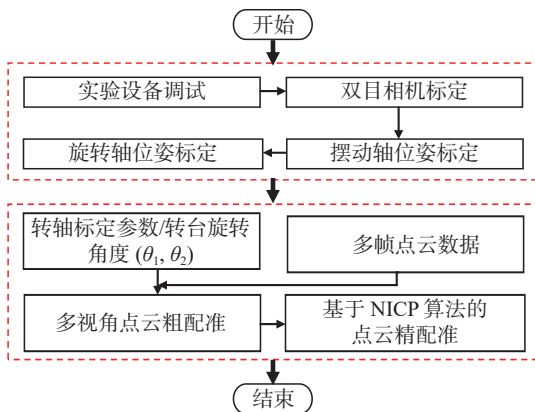


图 1 无标志点扫描测量方法的流程图

Fig. 1 Flowchart of the scanning measurement method without marks

### 2.1 基于摄影测量技术的双目相机标定

传统相机标定需要通过标定板已知的三维坐

标和图像对应关系来求解内外参数, 对标定板的加工精度要求极高, 这在实际使用过程很难保证。文中采用基于摄影测量技术的相机标定方法, 只需标定板上至少一对编码靶点的精确距离, 即可计算出高精度的内外参数, 保证三维测量精度。其基本数学模型为小孔成像模型, 物方点  $P$ 、投影中心  $S$  和像点  $p$  在一条直线上。但由于设备制造存在误差、相机镜头发生畸变等因素, 实际的成像模型如图 2 所示。

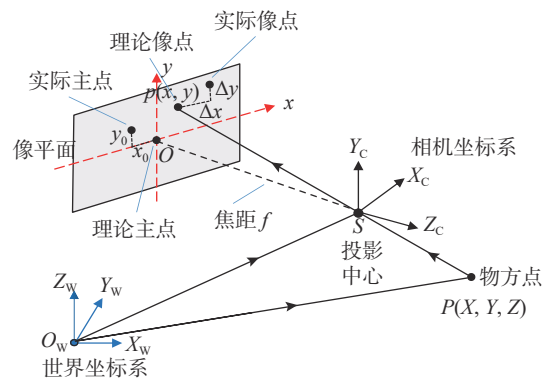


图 2 针孔相机成像模型

Fig. 2 Imaging model of pinhole camera

根据相机实际成像模型中物方点、投影中心和像点的对应关系, 推导双目相机测量系统的共线方程<sup>[25]</sup>为:

$$\begin{cases} x - x_0 + \Delta x = -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \\ y - y_0 + \Delta y = -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $(X, Y, Z)$  为物方点  $P$  在世界坐标系下的坐标;  $(x_0, y_0)$  为相机的主点偏差;  $(\Delta x, \Delta y)$  为镜头畸变造成的像点偏差;  $f$  为相机镜头焦距;  $(x, y)$  为像点  $p$  的像素坐标;  $(X_S, Y_S, Z_S)$  为投影中心  $S$  在世界坐标系下的坐标, 用于描述相机在世界坐标系下的位置;  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$  为世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵  $R_C$  内的元素。相机的外参数表示相机在世界坐标系下的位姿, 包含  $X_S, Y_S, Z_S, \varphi, \omega, \kappa$  共 6 个参数, 其中  $\varphi, \omega, \kappa$  为相机坐标系绕世界坐标系三个坐标轴的旋转角度, 用于描述相机在世界坐标系下的姿态。旋转矩阵  $R_C$  中的各个元素为  $\varphi, \omega, \kappa$  方向余弦的组合, 计算公式如下:

$$\mathbf{R}_C = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa + \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa & -\cos \varphi \cos \kappa + \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa & \sin \varphi \cos \omega \\ \cos \omega \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa & -\sin \omega \\ -\sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa & \sin \varphi \sin \kappa + \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa & \cos \varphi \cos \omega \end{bmatrix}. \quad (2)$$

为了提高标定精度,充分考虑相机镜头的径向畸变、切向畸变和像平面畸变,建立 10 参数畸变模型。

$$\begin{cases} \Delta x = K_1 \bar{x} r^2 + K_2 \bar{x} r^4 + K_3 \bar{x} r^6 + P_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2 \bar{x} \bar{y} + b_1 \bar{x} + b_2 \bar{y} \\ \Delta y = K_1 \bar{y} r^2 + K_2 \bar{y} r^4 + K_3 \bar{y} r^6 + P_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1 \bar{x} \bar{y} \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $K_1, K_2, K_3$  为镜头径向畸变系数;  $P_1, P_2$  为镜头偏心畸变系数;  $b_1, b_2$  为像平面畸变系数;  $r (r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2)$  为主点的径向距离, 其中  $\bar{x} = x - x_0$ ,  $\bar{y} = y - y_0$ ; 相机的内参数包括有  $(f, x_0, y_0, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, b_1, b_2)$ , 确定像空间坐标系下投影中心与像平面的相对位置。

将共线方程 (1) 线性化得到误差方程:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X}_1 + \mathbf{B}\mathbf{X}_2 + \mathbf{C}\mathbf{X}_3 - \mathbf{L}, \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{V}$  为像点坐标残差, 即重投影误差;  $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3$  分别为内参数、外参数和物方点坐标的改正数;  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$  分别是对应的偏导数矩阵;  $\mathbf{L}$  为观测值, 也即像点坐标。

然后, 通过空间前方交会、后方交会原理求解相机内外参数的初值, 再对所有的内外参数和标定板上靶点的三维坐标进行整体光束平差, 从而实现高精度的相机标定<sup>[26]</sup>。迭代过程使用的优化函数为:  $\min(\mathbf{V}^T \mathbf{V})$ , 其中,  $\mathbf{V}^T$  为  $\mathbf{V}$  的转置矩阵。

在实际标定过程中, 系统控制两个转轴运动到不同的位置, 获得不同视角的测量数据, 可以一次性完成相机标定和转轴标定。相机标定主要包括以下 6 个步骤:

(1) 利用课题组开发的 XJTUDP 系统<sup>[27]</sup> 计算标定板上所有编码靶点和非编码靶点的三维空间坐标, 并识别编码靶点的编码值。

(2) 将标定板放置在相机前标准测量距离的转台平面上, 控制转轴运动到多个不同位姿, 两个相机同步采集每个姿态的标定板图像。图 3(a)~3(f) 中摆动轴处于初始位姿, 旋转轴分别运动到  $30^\circ, 90^\circ, 150^\circ, 210^\circ, 270^\circ, 330^\circ$  六个位置; 图 3(g)~3(l) 中旋转轴处于初始位姿, 摆动轴分别运动到  $-45^\circ, -30^\circ, -15^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  六个位置。

(3) 采用鲁棒的靶点检测算法<sup>[28]</sup> 识别编码靶点和非编码靶点, 计算其中心二维坐标, 并解码得到编码靶点的编码值, 如图 4 (彩图见期刊电子版) 所示。

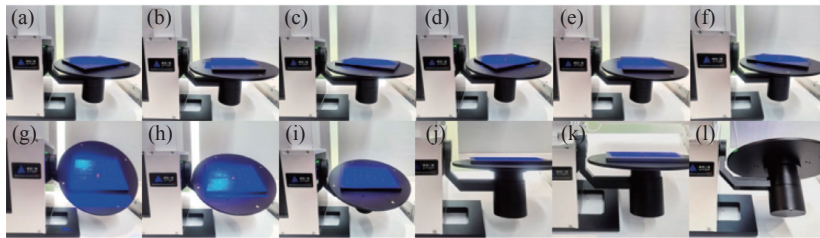
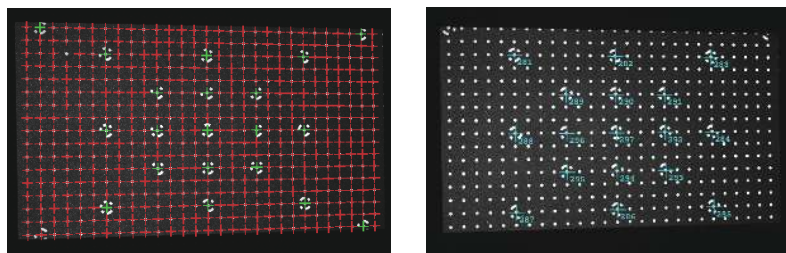


图 3 相机标定过程图

Fig. 3 Camera calibration process diagram



(a) 靶点检测效果图  
(a) Effect of target detection

(b) 编码靶点点集  
(b) Coded target point set

图 4 标定板图像

Fig. 4 Images of calibration board

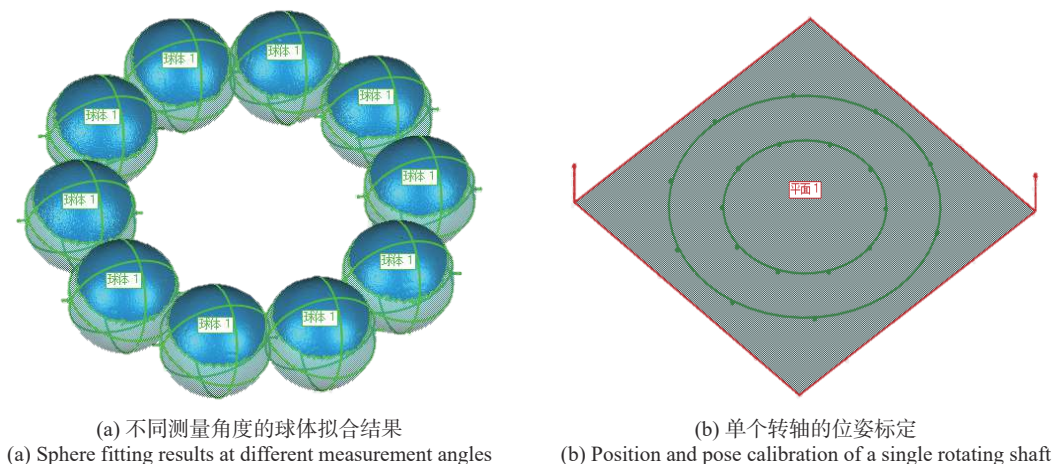
(4) 基于共面约束条件完成两组图像的相对定向, 重建编码靶点的三维坐标。

(5) 采用直接线性变换方法 (Direct Linear Transformation, DLT)<sup>[28]</sup> 定向出其他组图像位置, 重建非编码靶点的三维坐标。

(6) 通过光束平差算法<sup>[26]</sup> 对相机内外参数及靶点三维坐标进行整体迭代优化, 实现高精度的相机标定。

## 2.2 基于编码靶点的转轴位姿标定

传统转轴校准多采用标准球拟合法<sup>[22]</sup>, 即将一对具有精确直径和中心距的标准球固定在转台上, 转台以一定间隔角度旋转一周, 获得不同位置的球体中心。拟合球心所在平面, 并计算平面的中心及其法向量, 从而标定出转轴的位姿, 如图 5 所示。



(a) 不同测量角度的球体拟合结果  
(a) Sphere fitting results at different measurement angles

(b) 单个转轴的位姿标定  
(b) Position and pose calibration of a single rotating shaft

图 5 标准球拟合法单个转轴位姿标定

Fig. 5 Position and pose calibration of single rotation axis using standard ball fitting method

由于摆动轴和旋转轴的独立性, 下面只介绍旋转轴位姿的标定过程, 此标定原理同样适用于摆动轴。

如图 3(a)~3(f) 所示, 当旋转轴转动到不同角度时, 在每个测量位置均可得到一个由编码靶点的三维坐标组成的点集。利用任意两个不同的点集均可计算出一个旋转轴向量  $\overrightarrow{ON_{mn}}$ 。对于  $t$  个测量位置, 共可计算出  $t \times (t-1)/2$  个旋转轴向量, 其中  $t=6$ 。通过对所有旋转轴向量求取平均值, 最终确定一个精确的旋转轴位姿, 即旋转轴方向矢量和轴上一定点坐标, 完成旋转轴标定。

假设  $P = \{p_i\}$  和  $Q = \{q_j\}$  分别为旋转前后对应的编码靶点的集合, 其中  $p_i, q_j (i, j = 1, 2, \dots, 21)$  都是  $3 \times 1$  的列向量。理论上, 两者之间的关系为:

本文提出一种利用标定板上的编码靶点分别标定两个转轴的新方法。通过跟踪 3 对以上不共线的编码靶点, 确定不同视角位置的旋转变换关系, 利用该关系可以解算出转轴的多个位置。再对多个位置的转轴进行优化, 最终确定一个准确的转轴位姿。同标准球拟合法相比, 本文提出的靶点跟踪法在转轴标定中的优势在于: (1) 误差源较少: 靶点跟踪法的转轴标定误差只来自于相机标定时靶点的二维图像检测精度, 仅有一次误差; 而标准球拟合法需要对标准球进行多次形状拟合, 存在三维拟合误差累计, 精度损失更多; (2) 标定效率更高: 靶点跟踪法的转轴标定和相机标定同步进行, 节省了系统标定时间; 标准球拟合法的转轴和相机均单独标定, 效率不足。

$$q_j = R_{ij} p_i + T_{ij} \quad (5)$$

式中:  $R_{ij}$  为  $3 \times 3$  的旋转矩阵,  $T_{ij}$  为  $3 \times 1$  的平移向量;  $i$  和  $j$  为标定板上编码靶点的序号。

在实际测量中, 由于误差的存在, 不可能存在相同的  $R_{ij}$  和  $T_{ij}$  使得两集合中的对应编码靶点都满足式 (5)。为了使结果更加精确, 需最小化目标函数  $F$ :

$$(R_{ij}, T_{ij}) = \arg \min F = \arg \min \sum_{i=1, j=1}^{21} \|(R_{ij} p_i + T_{ij}) - q_j\|^2 \quad (6)$$

采用奇异值分解 (Single Value Decomposition, SVD) 优化方法<sup>[29]</sup> 可以求解到最佳的旋转矩阵  $R_{mn}$  和平移矩阵  $T_{mn}$ 。此时的  $R_{mn}$  还可以通过  $R(\overrightarrow{ON_{mn}}, \omega)$  来表达, 也即:

$$R_{mn} = R(\overrightarrow{ON_{mn}}, \omega) \quad (7)$$

式中:  $R_{mn}$  为任意两个测量位置之间的旋转矩阵;  $m$  和  $n$  为测量位置的序号;  $R(\overrightarrow{ON_{mn}}, \omega)$  表示绕着转轴向量  $\overrightarrow{ON_{mn}}$  转动  $\omega$  角形成的旋转矩阵。

利用已知的  $\omega$  角和公式 (7) 将旋转矩阵  $R_{mn}$  转换为方向向量  $\overrightarrow{ON_{mn}}$ , 然后求解平均向量  $\overrightarrow{ON}$ , 并将其作为旋转轴的方向矢量, 如公式 (8) 所示。

$$\overrightarrow{ON} = \frac{2}{t(t-1)} \sum_{m=1, n=m+1}^t \frac{\overrightarrow{ON_{mn}}}{|\overrightarrow{ON_{mn}}|} \quad (8)$$

将摆动轴和旋转轴放于初始位置, 利用重建的标定板上所有编码靶点的三维坐标, 拟合标定板平面  $P_m$ 。计算方向向量  $\overrightarrow{ON}$  与平面  $P_m$  的交点  $C_m$ , 即为转轴上的定点坐标。

### 3 无标志点扫描测量方法的原理

#### 3.1 基于旋转拼接算法的点云粗配准

##### 3.1.1 旋转拼接的基本原理

三维测量时, 任意测量视角的变换都是通过零件绕世界坐标系下两个转轴的转动来实现的, 每一个视角位置相对于初始位置都对应一个旋转变换关系, 该关系与转轴位姿及转台转动角度有关。旋转拼接的基本思想是通过反向旋转变换实现点云数据的拼接, 就是将转轴作为多视角点云变换的媒介, 通过标定旋转轴线, 确定其在相机坐标系中的位姿, 然后利用反向转动确定旋转拼接矩阵, 最后将不同视角的点云数据变换到初始位置, 完成点云拼接。

假设在测量过程中, 被测零件绕摆动轴  $N_2$  逆时针转动  $\alpha$  角, 摆动轴带动旋转轴从  $N_1$  位置运动到  $N'_1$  位置, 然后再绕旋转轴  $N'_1$  逆时针转动  $\beta$  角, 如图 6(a) 所示。在旋转拼接时, 点云首先绕旋转轴  $N'_1$  顺时针转动  $\beta$  角, 然后再绕摆动轴  $N_2$  顺时针转动  $\alpha$  角, 并带动旋转轴从  $N'_1$  位置运动到  $N_1$  位置, 实现两幅点云在初始位置的拼接, 如图 6(b) 所示。

##### 3.1.2 旋转拼接的算法实现

假设  $N_{C0}$  是空间任意转轴的方向向量, 轴线上有一点  $X_0(x_0, y_0, z_0)$ , 空间中任意一点  $P_c(x_c, y_c, z_c)$  绕该转轴顺时针旋转  $\theta$  角后得到点  $P'_c(x'_c, y'_c, z'_c)$ , 如图 7 所示。

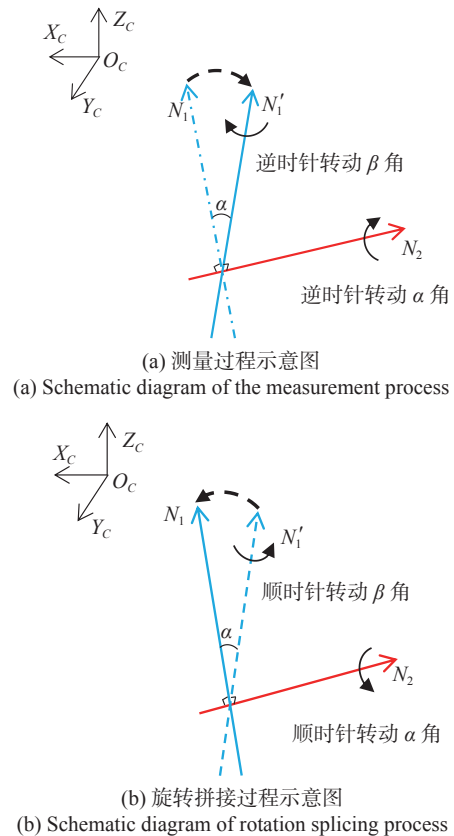


图 6 多视角点云旋转拼接原理图  
Fig. 6 Schematic diagram of multi-view point cloud rotation splicing

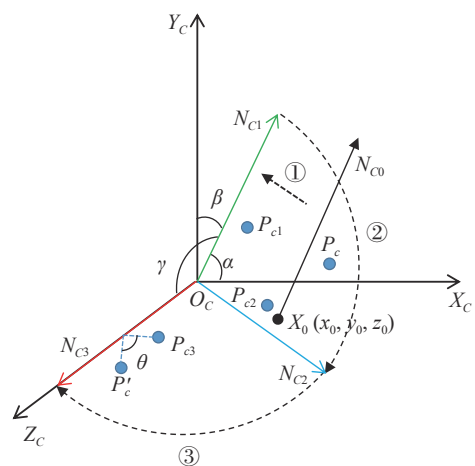


图 7 绕空间任意转轴的旋转变换关系  
Fig. 7 The rotation transformation relation around any rotation axis in space

点  $P_c$  与点  $P'_c$  之间进行三维旋转变换的流程为:

(1) 将点  $P_c$  与转轴  $N_{C0}$  一同平移, 使得轴线上的一点  $X_0$  与世界坐标系的原点  $O_c$  重合, 对应的平移

转换关系为:

$$P_{c1} = T_l P_c \quad (9)$$

式中:  $P_c$  为初始位置点;  $P_{c1}$  为平移后的点;  $T_l$  表示点  $P_c$  与点  $P_{c1}$  之间的变换矩阵, 且有

$$T_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。记平移后的转轴向量为$$

$N_{c1}(a, b, c)$ ,  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为该轴与世界坐标系之间的方向角, 则  $a = \cos \alpha$ ,  $b = \cos \beta$ ,  $c = \cos \gamma$ , 且  $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ 。

(2) 将点  $P_{c1}$  随着转轴  $N_{c1}$  绕  $X_C$  轴逆时针旋转  $\phi$  角至  $X_C O_C Z_C$  面, 得到向量  $N_{c2}$ , 点  $P_{c1}$  变为点  $P_{c2}$ , 具体变换关系为:

$$P_{c2} = T_{r1} P_{c1} \quad (10)$$

式中:  $T_{r1}$  表示点  $P_{c1}$  与点  $P_{c2}$  之间的变换矩阵,

$$且 有 T_{r1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, 其中 \cos \phi = \frac{c}{\sqrt{b^2 + c^2}}, \sin \phi = \frac{b}{\sqrt{b^2 + c^2}}。$$

(3) 将点  $P_{c2}$  随着转轴  $N_{c2}$  绕  $Y_C$  轴顺时针旋转  $\varphi$  角至与  $Z_C$  轴重合, 此时的转轴向量记为  $N_{c3}$ , 点记为  $P_{c3}$ , 具体变换关系为:

$$P_{c3} = T_{r2} P_{c2} \quad (11)$$

式中:  $T_{r2}$  表示点  $P_{c2}$  与点  $P_{c3}$  之间的变换矩阵,

$$R(\overrightarrow{O_C N_{c1}}, \theta) = \begin{bmatrix} a^2(1 - \cos \theta) + \cos \theta & ab(1 - \cos \theta) - c \sin \theta & ac(1 - \cos \theta) + b \sin \theta \\ ab(1 - \cos \theta) + c \sin \theta & b^2(1 - \cos \theta) + \cos \theta & bc(1 - \cos \theta) - a \sin \theta \\ ac(1 - \cos \theta) - b \sin \theta & bc(1 - \cos \theta) + a \sin \theta & c^2(1 - \cos \theta) + \cos \theta \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $R(\overrightarrow{O_C N_{c1}}, \theta)$  表示绕着转轴向量  $\overrightarrow{O_C N_{c1}}$  转动  $\theta$  角形成的旋转矩阵。

$$P'_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(\overrightarrow{O_C N_{c1}}, \theta) & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P_c = \begin{bmatrix} R(\overrightarrow{O_C N_{c1}}, \theta) & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I - R(\overrightarrow{O_C N_{c1}}, \theta) \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} P_c \quad (16)$$

对于两轴数控转台而言, 假设其两个转轴的方向向量分别为  $N_1(N_{x1}, N_{y1}, N_{z1})$  和  $N_2(N_{x2}, N_{y2}, N_{z2})$ , 两轴上各存在一定点, 其坐标分别为  $X_1(x_1, y_1, z_1)$  和  $Y_2(x_2, y_2, z_2)$ , 空间点  $P_m(x_m, y_m, z_m)$  分别

$$P_m = \begin{bmatrix} R(\overrightarrow{N_2}, -\theta_2) & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I - R(\overrightarrow{N_2}, -\theta_2) \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(\overrightarrow{N_1}, -\theta_1) & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I - R(\overrightarrow{N_1}, -\theta_1) \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} P'_m \quad (17)$$

$$且 T_{r2} = \begin{bmatrix} \cos(-\varphi) & 0 & \sin(-\varphi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-\varphi) & 0 & \cos(-\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, 其中有$$

$$\sin(-\varphi) = -\sin \varphi = \frac{-a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}, \cos(-\varphi) = \cos \varphi = \frac{\sqrt{b^2 + c^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}。$$

(4) 将点  $P_{c3}$  绕着转轴  $N_{c3}$  即  $Z_C$  轴顺时针旋转  $\theta$  角后得到  $P'_c$ , 相应的变换关系为:

$$P'_c = T_{r3} P_{c3} \quad (12)$$

其中,  $T_{r3}$  表示点  $P_{c3}$  与点  $P'_c$  之间的变换矩阵,

$$且 T_{r3} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

(5) 最后, 依次执行前三步变换的逆过程, 将点  $P'_c$  随着转轴  $N_{c3}$  绕  $Y_C$  轴逆时针旋转  $\varphi$  角, 然后绕  $X_C$  轴顺时针旋转  $\phi$  角, 再将转轴连同变换后的点平移到初始位置, 得到点  $P_c$  绕转轴  $N_{c0}$  旋转  $\theta$  角后的点  $P'_c$ , 具体变换关系如下:

$$P'_c = T_l^{-1} T_{r1}^{-1} T_{r2}^{-1} T_{r3} T_{r2} T_{r1} T_l P_c \quad (13)$$

式中: 矩阵  $T_l^{-1}$ 、 $T_{r1}^{-1}$  和  $T_{r2}^{-1}$  分别为变换矩阵  $T_l$ 、 $T_{r1}$  和  $T_{r2}$  的逆矩阵。

令  $T_r = T_{r1}^{-1} T_{r2}^{-1} T_{r3} T_{r2} T_{r1}$ , 则有

$$T_r = \begin{bmatrix} R(\overrightarrow{O_C N_{c1}}, \theta) & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

然后, 将公式 (14) 代入公式 (13), 可得:

绕两个转轴旋转  $\theta_1$  和  $\theta_2$  角后得到  $P'_m(x'_m, y'_m, z'_m)$ 。由于旋转拼接是三维测量的逆过程, 分别将转动角度  $\theta_1$  和  $\theta_2$  取其相反数, 得到点云拼接的变换关系:



式中:  $R(\vec{N}_2, -\theta_2)$  表示绕着转轴向量  $\vec{N}_2$  转动  $-\theta_2$  角度形成的旋转矩阵;  $R(\vec{N}_1, -\theta_1)$  表示绕着转轴向量  $\vec{N}_1$  转动  $-\theta_1$  角度形成的旋转矩阵;  $P_m'$  为测量过程获取的零件表面点的坐标;  $P_m$  为旋转拼接后的点坐标。

由上述分析可知, 对于任意扫描角度  $(\theta_1, \theta_2)$ , 若已知两个转轴在世界坐标系下的精确位姿, 可以通过旋转变换将不同视角的点云拼接到同一个坐标系, 也就实现了转台上零件表面点云的粗配准。因此, 对两个转轴位姿的精确标定将直接影响点云旋转拼接的精度。

### 3.2 基于 NICP 算法的点云精配准

虽然旋转拼接后的点云已经非常接近, 但由于转台运动存在定位误差, 粗配准后的点云还需进行精配准。常用的点云精配准方法为 ICP 及其变种, 考虑到扫描对象可能包含薄壁结构, 查找最邻近点过程仅考虑欧氏距离会导致薄壁件分叉。为了有效避免此问题, 采用 NICP 算法<sup>[30]</sup> 对点云进行精配准, 综合考虑点云之间的欧氏距离、法向量相似性和曲率相似性。整体 NICP 算法流程如图 8 所示。

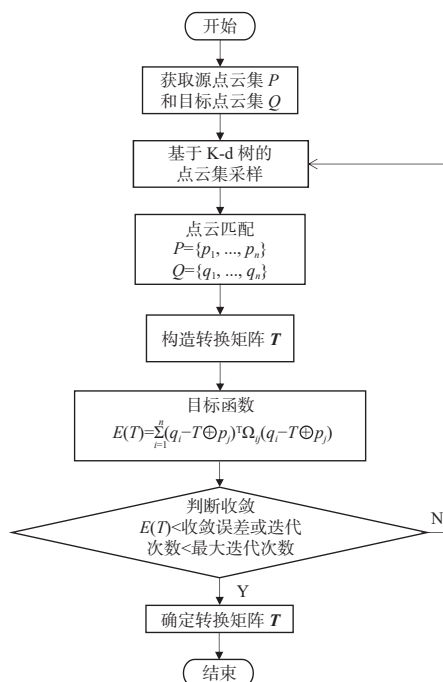


图 8 NICP 算法流程图

Fig. 8 Flowchart of NICP algorithm

算法的基本步骤包括: (1) 预设迭代次数、精配准误差判断阈值, 然后在目标点云集  $Q$  中取点集  $q_i \in Q$  并建立 K-d 树索引, 以便进行最邻近点查

找; (2) 遍历源点云集  $P$ , 并根据目标点云建立的 K-d 树找出对应  $q_i \in Q$  的最近邻点集  $p_i \in P$ ; (3) 依次判断遍历源点云所得到的最近邻点与当前点是否同时满足欧氏距离阈值、法向量相似和曲率相似, 若满足则作为一对对应点, 反之不作为对应点对; (4) 使用 2.2 节介绍的方法计算步骤 (3) 所得到的对应点对之间的旋转、平移矩阵, 并将源点云进行坐标变换; (5) 完成依次迭代后, 判断是否满足迭代终止条件, 若不满足, 则返回步骤 (2), 直至满足收敛条件。

## 4 实验与分析

### 4.1 实验平台组成

实验所用测试平台为新拓三维技术(西安)有限公司的 XTOM-TransForm-ROT 产品, 主要包括 1 台蓝光三维扫描仪、三自由度数控转台及配套的 XTOM 三维扫描测量软件, 如图 9(a) 所示。扫描仪包括 2 个高分辨率的工业 CCD 相机和 1 个 DLP 投影仪, 相机用于获取高质量的图像数据, 投影仪用于投射光栅条纹。其标准测量距离为 370 mm, 扫描幅面为 200 mm×150 mm, 单次扫描时间小于 1 s, 相机分辨率为 2448×2048, 镜头焦距为 16 mm, 采样点距为 0.08 mm, 单次扫描误差为  $\pm 0.015$  mm, 能够满足实验需求。所用标定板尺寸为 200 mm×150 mm, 其表面均匀分布有 21 个编码靶点和 269 个非编码靶点。

图 9(b) 是测量系统的示意图, 三根轴均采用伺服电机控制, 升降轴用于调节扫描仪的高度, 保证零件处在标准测量距离。测量开始后, 升降轴的位置不再变化。摆动轴和旋转轴用于改变零件的姿态, 确保扫描点云的完整性。扫描仪通过 USB 与计算机连接, 转台通过网线与计算机连接, 均采用串行通信进行控制。转台的绝对定位精度为  $0.01^\circ$ , 最大转动速度为  $20^\circ/\text{s}$ 。旋转轴和摆动轴分别设置有初始位置, 转台可以绕旋转轴做  $360^\circ$  转动, 绕摆动轴做  $-120^\circ \sim 120^\circ$  转动, 数字控制单元可实时反馈摆动轴和旋转轴的精确转动角度。

然后, 基于搭建好的实验场景进行测量系统参数的标定, 采用第 2.1 节所述的相机标定方法, 对该扫描系统的两个相机进行校准。标定后两个相机的内、外参数如表 1, 表 2 所示, 标定重投影误差为 0.0275 pixel, 满足实验条件。

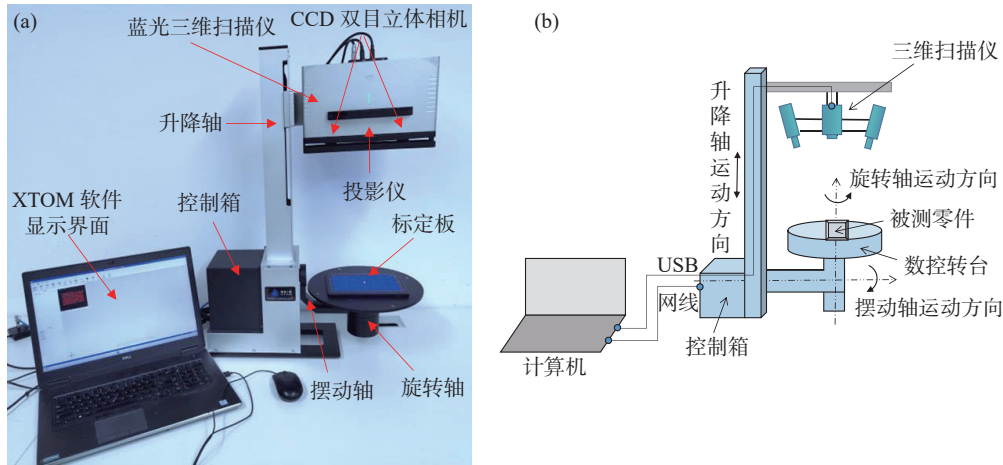


图 9 桌面式数控转台光学测量系统 (a) 实物图及 (b) 示意图

Fig. 9 (a) Physical setup and (b) its schematic diagram of tabletop CNC turntable optical measurement system

表 1 相机标定内参数

Tab. 1 Camera calibration internal parameters

内参数	左相机	右相机
$f/\text{pixel}$	4666.2300	4666.5600
$x_0/\text{pixel}$	47.6090	-14.4401
$y_0/\text{pixel}$	10.2786	-14.5546
$K_1$	$-3.4003 \times 10^{-9}$	$-4.1734 \times 10^{-9}$
$K_2$	$1.1598 \times 10^{-15}$	$1.8279 \times 10^{-15}$
$K_3$	$1.8523 \times 10^{-22}$	$-2.2075 \times 10^{-23}$
$P_1$	$-7.4732 \times 10^{-8}$	$1.5797 \times 10^{-8}$
$P_2$	$1.0306 \times 10^{-8}$	$-2.0569 \times 10^{-9}$
$b_1$	$1.2749 \times 10^{-4}$	$2.4643 \times 10^{-6}$
$b_2$	$-2.2662 \times 10^{-5}$	$3.9066 \times 10^{-5}$

表 2 相机标定外参数

Tab. 2 Camera calibration external parameters

相机编号	$R_C$		$T_C$	
左相机	1	0	0	0
	0	1	0	0
	0	0	1	0
右相机	0.8992	-0.0098	0.4374	176.2110
	0.0063	0.9999	0.0094	-0.1690
	-0.4374	-0.0057	0.8992	-40.5125

4.1.1 转轴标定精度验证

转轴标定精度是关系点云拼接的重要指标,也是保证三维测量数据质量的关键。为了验证文

中提出的转轴标定方法的可行性和准确性,在相同的实验条件下,分别采用标准球拟合法和靶点跟踪法标定两个转轴,获得转轴的方向向量。然后,计算两个转轴向量之间的夹角和向量点积,共计进行了 10 次试验,结果如表 3 所示。分析可知,使用靶点跟踪法标定后的两转轴夹角误差较标准球拟合法低 0.023° (名义夹角为 90°),两个转轴的标定精度更高,点云拼接效果会更好。

表 3 标准球拟合法与本文方法的性能对比

Tab. 3 Comparison between standard ball fitting method and the proposed method

实验编号	标准球拟合法 <sup>[29]</sup>			本文方法		
	夹角/(°)	点积	夹角误差/(°)	夹角/(°)	点积	夹角误差/(°)
1	89.938	0.001078	0.062	89.962	0.000666	0.038
2	89.923	0.001341	0.077	89.949	0.000883	0.051
3	89.934	0.001145	0.066	89.962	0.000658	0.038
4	89.939	0.001072	0.061	89.955	0.000786	0.045
5	89.940	0.001048	0.060	89.961	0.000686	0.039
6	89.929	0.001245	0.071	89.965	0.000604	0.035
7	89.938	0.001079	0.062	89.952	0.000838	0.048
8	89.938	0.001085	0.062	89.947	0.000922	0.053
9	89.939	0.001058	0.061	89.965	0.000606	0.035
10	89.940	0.001048	0.060	89.967	0.000583	0.033
平均	89.936	0.001120	0.064	89.959	0.000723	0.041

4.1.2 基于标准计量球的精度验证实验

通过标准计量球验证拼接对实际扫描

模型精度的影响。图 10(a) 为所采用的标准计量球, 左球直径为 15.0047 mm, 右球直径为 15.0023 mm, 球心距为 60.0106 mm。首先, 在初始位置扫描并拟合球体, 获取两个球心坐标。然后, 控制两转轴运动到两个不同位姿, 拟合球心坐标。最后, 分别使用 4.1.1 节由不同方法标定出的平均转轴位姿计算旋转变换矩阵, 将不同位置的

球心坐标变换到初始位置, 再对变换后的点云进行精配准。为了避免偶然误差, 分别开展 10 次实验, 每次运动位姿各不相同, 以保证转轴的运动范围足够大。点云的机械拼接效果如图 10(b)~图 10(c) 所示。可见, 基于标准球拟合法的点云存在分层数据, 采用靶点跟踪法的点云拼接效果更好。

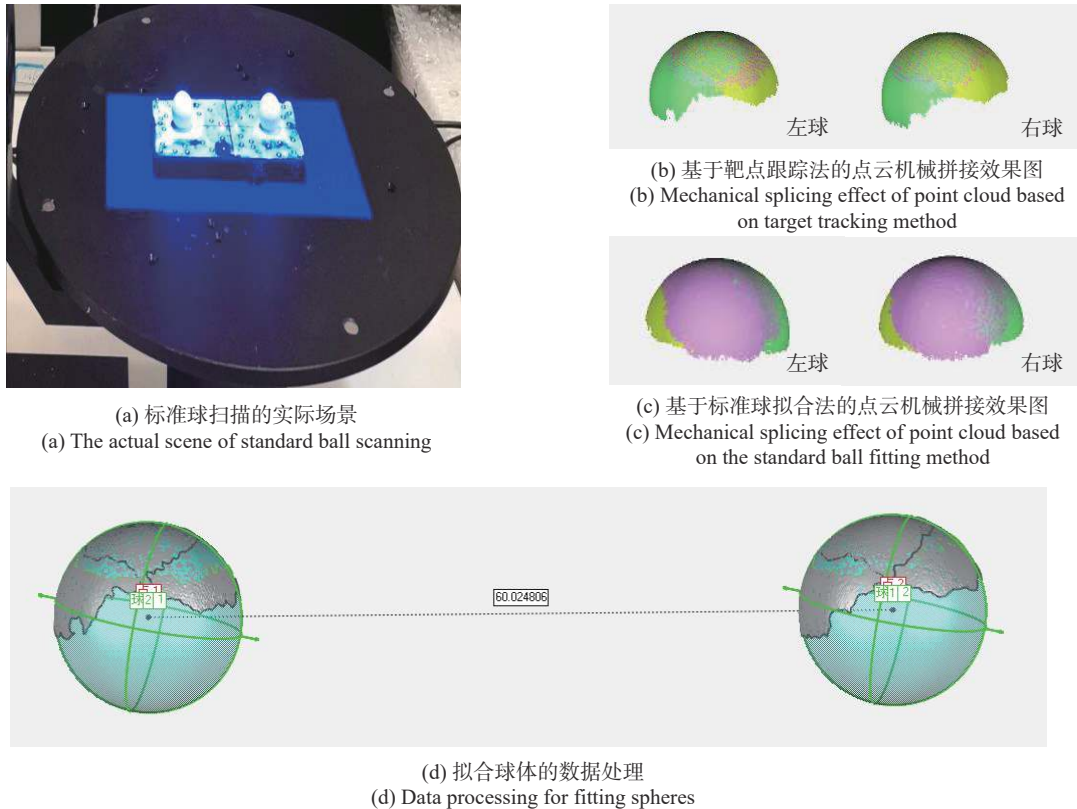
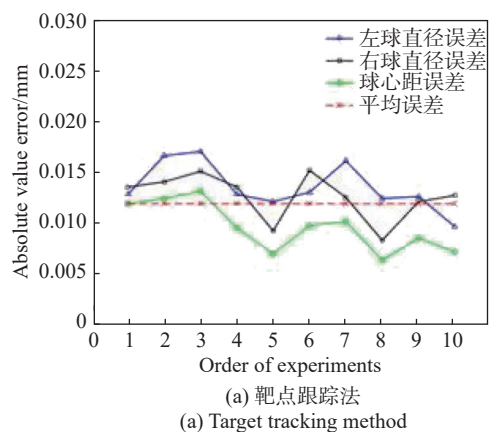


图 10 基于标准球的精度验证实验

Fig. 10 Accuracy verification experiment based on standard ball

在使用不同的转轴位姿进行点云旋转拼接后, 分别统计拟合球体的表面尺寸与标准值的偏差, 结果如图 11 所示。图 11(a) 中使用靶点跟踪法来标定转轴, 拟合球体的球心的平均绝对值误差为 0.0097 mm, 左球直径的平均绝对值误差为 0.0135 mm, 右球直径的平均绝对值误差为 0.0126 mm, 整体平均尺寸误差为 0.0119 mm。图 11(b) 为使用标准球拟合法标定转轴结果, 拟合球体的球心的平均绝对值的误差为 0.0143 mm, 左球直径的平均绝对值误差为 0.0179 mm, 右球直径的平均绝对值误差为 0.0188 mm, 整体平均尺寸误差为 0.0170 mm。可以看出, 使用靶点跟踪法标定转轴位姿后, 扫描标准计量球的球体表

面尺寸偏差值更小, 测量精度更高, 可满足实际使用要求。



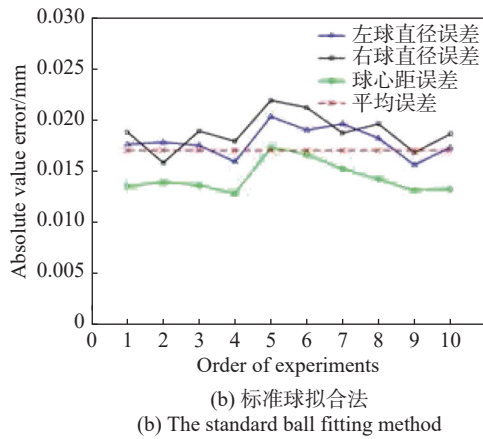


图 11 标准球机械拼接绝对值误差统计结果

Fig. 11 Statistical results of absolute value error of standard ball mechanical splicing

此外,由图 11 可以看出,球心距的测量误差明显低于两个球体直径的测量误差,原因是扫描标准计量球前需要在球面喷涂白色显像剂,扩大

了球面直径,由于球面显像剂较均匀,因此对球心位置影响较小,使得球心距测量精度显著高于两个球体直径测量精度。

#### 4.2 应用实验

为了验证所提点云机械拼接方法在小尺寸零件自动化扫描测量中的有效性和稳定性,采用 4.1 节相机标定和 4.1.1 节靶点跟踪法的转轴标定结果,将小尺寸的注塑件、假牙、涡轮零件分别固定在转台上,控制摆动轴以 60° 为间隔自 -90° 转动到 90°, 且在每个摆动轴位姿下保证转动轴以 40° 间隔旋转一周,获得 36 个不同角度的局部三维点云数据。然后,在相同的实验条件下,分别运用文中的点云粗配准及精配准方法、特征拼接方法、标志点拼接方法,对获得的点云数据进行测试。不同零件对应的点云拼接效果如图 12 所示。

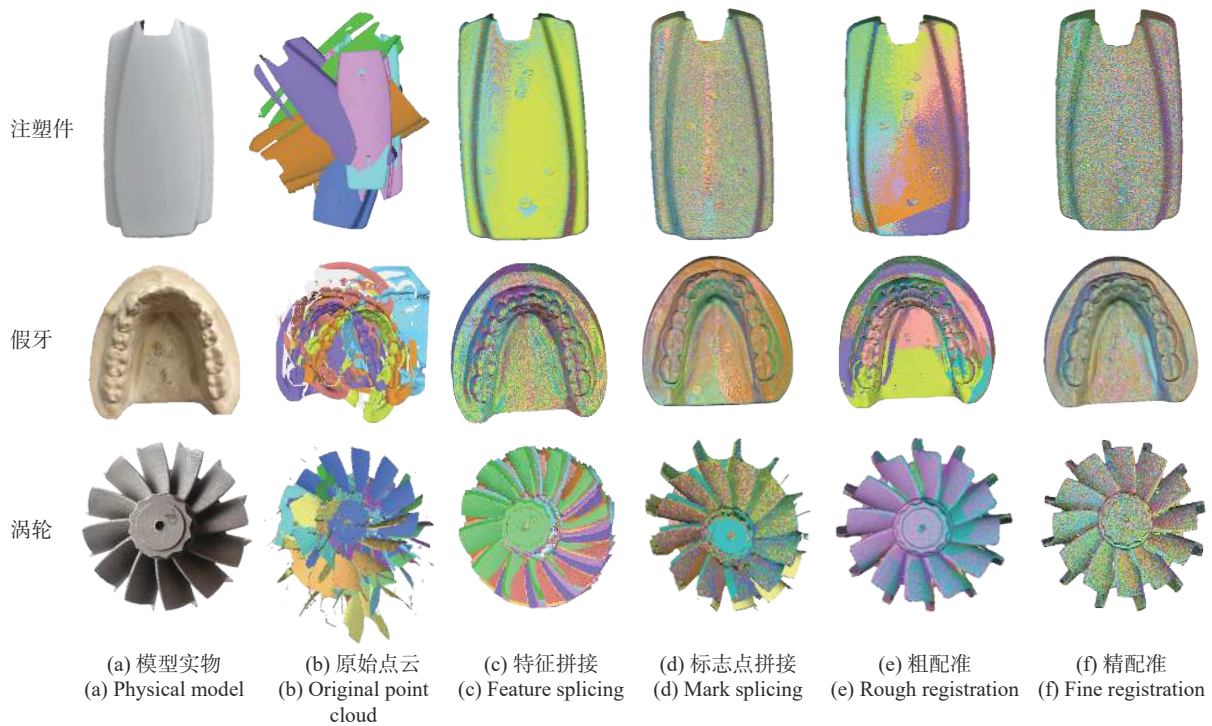


图 12 小尺寸零件的点云拼接效果图

Fig. 12 Point cloud splicing effect diagrams of small-size parts

从图 12 可以看出,机械拼接方法在精配准后与标志点拼接方法效果接近。为了进一步验证点云的拼接精度,采用配准后对应点对的均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 作为评价指标,对比分析不同点云拼接方法的精度,结果如

表 4 所示。其中,均方根误差的表达式为:

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (18)$$

式中:  $d_i$  为配准后第  $i$  组对应点之间的欧氏距离;  $n$  为对应点的数目。

表 4 不同点云拼接方式的精度对比  
**Tab. 4 Accuracy comparison of different point cloud splicing methods** (mm)

实验对象	特征拼接 <sup>[13]</sup>	标志点拼接 <sup>[9-10]</sup>	机械拼接	
			粗配准	精配准
注塑件	0.0116	0.0098	0.1135	0.0102
假牙	0.0124	0.0106	0.1213	0.0113
涡轮	0.6845	0.0129	0.1265	0.0123
平均误差	0.2362	0.0111	0.1204	0.0113

从拼接稳定性的角度考虑,标志点和特征拼接方法在自动化测量时易出现拼接失败的问题。标志点拼接是通过求解对应点对的刚体变换矩阵来实现点云配准,每一个扫描视角需观察到足够数量的标志点,相邻视角需包含 3 对以上公共标志点。特征拼接是通过几何特征点匹配来实现点云配准,零件表面需包含明显且易区分的几何形貌信息。但对于图 12(a) 中的涡轮零件,型面呈自由曲面状态,曲率变化较大,存在遮挡及死角区域,使用标志点拼接时由于部分视角识别不到足够的公共标志点,导致拼接失败,见图 12(d)。由于涡轮表面叶片的几何特征相似,呈中心对称分布,使用特征拼接效果较差,见图 12(c)。而机械拼接可以稳定得到如图 12(e) 所示的点云拼接效果。

## 5 结 论

针对小尺寸或重复特征零件在传统点云拼接

方法中存在的问题,将结构光学三维测量系统与三自由度桌面式数控转台相结合,提出一种基于机械拼接的无标志点扫描测量方法,并完成零件测量实验。主要结论如下:

(1) 通过跟踪标定板上编码靶点的方式,构建旋转矩阵,解算两个转轴的位姿,测量系统可一次性完成相机标定和转台标定,节省系统标定时间,减少多次扫描带来的误差累积。采用此标定方法的两轴平均夹角误差比传统的标准球拟合法小 $0.023^\circ$ ,标定精度更高,因此,点云拼接效果更好。

(2) 通过标定的转轴位姿和读取的转台旋转角度,构建旋转矩阵,实现多视角点云的粗配准。再使用 NICP 算法对其进行迭代优化,从而实现点云的精配准。采用靶点跟踪法标定转轴后,测量标准球的整体平均尺寸误差为 $0.0119\text{ mm}$ ,优于标准球拟合法的测量球体表面尺寸偏差,可以满足实际测量的精度要求。

(3) 通过对小尺寸的假牙、注塑件和涡轮零件开展自动化测量实验,结果显示,采用机械拼接方法的零件点云配准效果与标志点拼接方法接近,优于特征拼接方法。此外,由于机械拼接方法不需要公共标志点,不依赖于零件表面特征,在自动化测量过程中更加稳定可靠。

综上所述,提出的无标志点扫描测量方法效率高,零件测量精确,且拼接效果稳定可靠,能够达到小尺寸复杂曲面零件扫描测量的要求。

## 参考文献:

- [1] 吕虹毓,李茂月,蔡东辰,等.光栅投影在机三维形貌检测技术研究进展[J].中国光学(中英文),2023,16(3):500-513.  
LV H Y, LI M Y, CAI D CH, *et al.*. Research progress of grating projection on machine 3D topography inspection technology[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(3): 500-513. (in Chinese)
- [2] HELLE R H, LEMU H G. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control[J]. *Materials Today:Proceedings*, 2021, 45: 5255-5262.
- [3] YANG X X, ZHU SH SH. Application of 3D laser scanner in digitization of movable cultural relics[C]. *2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications*, Shenyang, IEEE, 2021: 550-553.
- [4] 李茂月,刘泽隆,赵伟翔,等.面结构光在机检测的叶片反光抑制技术[J].中国光学,2022,15(3):464-475.  
LI M Y, LIU Z L, ZHAO W X, *et al.*. Blade reflection suppression technology based on surface structured light on-machine detection[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 464-475. (in Chinese)
- [5] MEZA J, CONTRERAS-ORTIZ S H, PEREZ L A R, *et al.*. Three-dimensional multimodal medical imaging system based on freehand ultrasound and structured light[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(5): 054106.
- [6] 王永红,张倩,胡寅,等.显微条纹投影小视场三维表面成像技术综述[J].中国光学,2021,14(3):447-457.  
WANG Y H, ZHANG Q, HU Y, *et al.*. 3D small-field surface imaging based on microscopic fringe projection

- profilometry: a review[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 447-457. (in Chinese)
- [7] 任明阳,王立忠,赵建博,等.复杂曲面零件面结构光扫描视点规划[J].中国光学(中英文),2023,16(1):113-126.  
REN M Y, WANG L ZH, ZHAO J B, *et al.*. Viewpoint planning of surface structured light scanning for complex surface parts[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 113-126. (in Chinese)
- [8] 杨鹏程,杨朝,孟杰,等.基于法向量和面状指数特征的文物点云棱界配准方法[J].中国光学(中英文),2023,16(3):654-662.  
YANG P CH, YANG ZH, MENG J, *et al.*. Aligning method for point cloud prism boundaries of cultural relics based on normal vector and faceted index features[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(3): 654-662. (in Chinese)
- [9] 马国庆,刘丽,于正林,等.大型复杂曲面三维形貌测量及应用研究进展[J].中国光学,2019,12(2):214-228.  
MA G Q, LIU L, YU ZH L, *et al.*. Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 214-228. (in Chinese)
- [10] LIN X B, ZHOU Y W, LIN CH. Study on 3D data mosaic method of point cloud data in reverse engineering[C]. *2021 Asia-Pacific Conference on Communications Technology and Computer Science*, IEEE, 2021: 143-147.
- [11] QIN L, CHEN X, GONG X. An improved 3D reconstruction method for weak texture objects combined with calibration and ICP registration[C]. *2023 IEEE 6th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems*, IEEE, 2023: 1-5.
- [12] XIANG J, FAN W Q, LIU P, *et al.*. Point cloud alignment method based on improved ISS-ICP algorithm[C]. *2022 5th International Conference on Information Communication and Signal Processing*, IEEE, 2022: 249-253.
- [13] LI J L, CHEN B R, YUAN M, *et al.*. Matching algorithm for 3D point cloud recognition and registration based on multi-statistics histogram descriptors[J]. *Sensors*, 2022, 22(2): 417.
- [14] ZOU Z S, WANG R, ZOU J L, *et al.*. Robust descriptor for key-point detection and matching in color images with radial distortion[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2022, 31(2): 023038.
- [15] 何成刚,郑衡,丁克,等.基于机械臂辅助的多视角三维点云拼接算法研究[J].激光与光电子学进展,2023,60(20):2015001.  
HE CH G, ZHENG H, DING K, *et al.*. Research on multi-view 3D point cloud stitching algorithm based on robot arm assistance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(20): 2015001. (in Chinese)
- [16] SILVA M Z, BRITO T, LIMA J L, *et al.*. Industrial robotic arm in machining process aimed to 3D objects reconstruction[C]. *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology*, IEEE, 2021: 1100-1105.
- [17] CAI X Q, ZHONG K J, FU Y J, *et al.*. Calibration method for the rotating axis in panoramic 3D shape measurement based on a turntable[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(3): 035004.
- [18] YE J, XIA G S, LIU F, *et al.*. 3D reconstruction of line-structured light based on binocular vision calibration rotary axis[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(27): 8272-8278.
- [19] 胡民政,刁俊通.面向结构光三维测量的两轴转台标定[J].上海交通大学学报,2010,44(4):506-511.  
HU M ZH, XI J T. Two-axis turntable calibration in three-dimensional structured light measurement system[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2010, 44(4): 506-511. (in Chinese)
- [20] YE Y P, SONG ZH. An accurate 3D point cloud registration approach for the turntable-based 3D scanning system[C]. *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, IEEE, 2015: 982-986.
- [21] 李杨,许志闻,宋展,等.面向全自动三维扫描系统的多视角三维数据自动配准技术[J].吉林大学学报(理学版),2014,52(2):319-325.  
LI Y, XU ZH W, SONG ZH, *et al.*. Automated multi-view 3D data registration for fully-automated 3D scanning system[J]. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 2014, 52(2): 319-325. (in Chinese)
- [22] LI W L, WU A, LI Z CH, *et al.*. A new calibration method between an optical sensor and a rotating platform in turbine blade inspection[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(3): 035009.
- [23] 吕海东,任永潮,戴士杰,等.基于2D靶标的摄像机与转台中心轴同步标定方法[J].传感器与微系统,2019,38(7):23-27.  
LV H D, REN Y CH, DAI SH J, *et al.*. Synchronization calibration method of camera and turntable center axis based on 2D target[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2019, 38(7): 23-27. (in Chinese)
- [24] PANG X F, LAU R W H, SONG ZH, *et al.*. A tool-free calibration method for turntable-based 3D scanning systems[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2016, 36(1): 52-61.
- [25] 陈仁虹,梁晋,叶美图,等.柔性复合薄膜成形极限曲线的视觉测定方法[J].中国光学,2022,15(1):22-33.

- CHEN R H, LIANG J, YE M T, *et al.*. Visual method for measuring forming limit curve of pliable composite film[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 22-33. (in Chinese)
- [26] 任明阳, 王立忠, 付白强, 等. 高温数字图像相关法变形测量中玻璃介质误差校正[J]. *中国光学*, 2022, 15(2): 327-338.
- REN M Y, WANG L ZH, FU B Q, *et al.*. Error correction of glass mediums in high-temperature digital image correlation deformation measurement[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 327-338. (in Chinese)
- [27] ZHANG D H, LIANG J, GUO C, *et al.*. Exploitation of photogrammetry measurement system[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(3): 037005-16.
- [28] HU H, LIANG J, XIAO Z Z, *et al.*. A four-camera videogrammetric system for 3-D motion measurement of deformable object[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(5): 800-811.
- [29] ZHU K, GONG L, GU D J, *et al.*. An analytic calibration method for turntable-based 3D scanning system[C]. *2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, IEEE, 2019: 495-500.
- [30] SERAFIN J, GRISSETTI G. NICP: Dense normal based point cloud registration[C]. *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2015: 742-749.

通讯作者:



王立忠(1968—),男,山东梁山人,博士,教授,博士生导师,2004年于西安交通大学获得博士学位,主要从事三维光学测量技术的研究。E-mail: [wanglz@mail.xjtu.edu.cn](mailto:wanglz@mail.xjtu.edu.cn)