

引文格式: 陈泓宇, 戴宁, 王宏涛. 五轴3D打印设备系统标定方法研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(15): 113-120.

CHEN Hongyu, DAI Ning, WANG Hongtao. Research on calibration method of five-axis 3D printing equipment system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(15): 113-120.

五轴 3D 打印设备系统标定方法研究*

陈泓宇, 戴宁, 王宏涛

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 五轴 3D 打印设备可以实现多曲率变化的复杂曲面模型打印, 在航空航天领域具有重大作用, 其标定是保证打印精度的重要环节。为了对五轴 3D 打印设备进行快速标定并提高其打印精度, 提出一种利用标定物的五轴 3D 打印设备标定方法。基于旋量理论建立五轴 3D 打印设备机床坐标系和工件坐标系变换模型, 给出待标定量。设计一种包含 5 枚标定球的标定物, 结合球心最小二乘拟合法获得机床坐标系下标定球球心的坐标。基于标定坐标系和机床坐标系的变换关系建立方程, 对直线轴进行标定, 基于平面法向量求解和圆的最小二乘拟合法对旋转轴进行标定。根据标定结果进行 3D 打印试验。由点云拟合分析结果可知, 相较于标定前, 标定后五轴 3D 打印设备打印的样件平均偏差降低了 91.3%, 打印精度显著提高。

关键词: 五轴 3D 打印; 标定; 旋量; 最小二乘法; 点云拟合

中图分类号: V219; TP242 文献标志码: A DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.15.113

Research on Calibration Method of Five-Axis 3D Printing Equipment System

CHEN Hongyu, DAI Ning, WANG Hongtao

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Five-axis 3D printing equipment enables the printing of complex curved surfaces with varying curvatures, playing a significant role in the aerospace industry. Calibration is a crucial step in ensuring printing accuracy of such equipment. To achieve rapid calibration of five-axis 3D printing equipment and improve its printing precision, a calibration method utilizing a calibration object is proposed. Based on screw theory, a transformation model between the machine tool coordinate system and workpiece coordinate system of the five-axis 3D printing equipment is established, and the quantities to be calibrated are determined. A calibration object containing five calibration spheres is designed, and coordinates of the calibration spheres' centers in the machine tool coordinate system are obtained using the least squares fitting method for sphere centers. An equation for calibrating the linear axes is established based on transformation relationship between the calibration coordinate system and machine tool coordinate system, while the rotational axes are calibrated using plane normal vector solving and the least squares fitting method for circles. 3D printing experiments are conducted based on the calibration results afterwards. Point cloud fitting analysis reveals that the average deviation of the printed samples by the five-axis 3D printing equipment after calibration reduced by 91.3% compared with before, significantly enhancing printing accuracy.

Keywords: Five-axis 3D printing; Calibration; Screw; Least squares method; Point cloud fitting

* 基金项目: 国家自然科学基金(52275255)。

五轴 3D 打印设备自由度高,打印的零件表面质量较高,力学性能好且无须支撑,在航空航天零件制造领域具有广阔应用前景。目前,五轴 3D 打印设备大多是在三轴 3D 打印机上增加 1 台二维旋转平台^[1-3],需要对此类改造后的五轴打印设备进行运动轴标定。现有五轴 3D 打印设备的常用标定方法主要有试件加工测量和仪器测量两种。试件加工测量主要是通过对标准试件进行切削加工,通过标准试件的加工误差来体现机床的几何误差,如 Ibaraki 等^[4]通过阶梯形工件试加工与测头在机测量,结合空间误差模型推导出的误差辨识模型,对旋转轴进行标定,但是这种标定方法仅适用于减材加工,不具有普适性。仪器测量方法主要通过激光类传感器^[5-6]、球杆仪^[7-9]、R-test^[10] 测量仪进行标定。但上述设备价格较为昂贵且操作烦琐,因此有学者提出通过相机采用视觉方法进行标定,毕超等^[11]将长方体金属靶标固定在俯仰平台上,利用工业相机获取不同姿态的靶标图像,通过提取靶标几何特征实现五轴视觉测量系统的俯仰轴轴线标定;于森^[12]利用单相机对多轴 3D 打印设备进行伪双目视觉检测,基于平面最小二乘拟合法对旋转轴方向向量进行标定;杨洪涛等^[13]提出一种基于单目视觉的改进型基准轴标定方法,利用相机采集特征点数据,并基于最小二乘法对基准轴进行标定。采用视觉方法的标定成本较低,但标定时设备姿态需要多次变化,要求设备具有较大行程,但此方法不适用于行程较小的设备。此外,也有学者根据设备特点提出相应标定方法,刁怀东^[14]采用激光跟踪仪对 Delta3D 打印平台进行标定,通过试打印同心圆轨迹完成 AC 转台中心标定;刘磊^[15]针对自研五轴 3D 打印设备,提出了一种基于探针标定物的 AC 旋转轴标定方法,标定后的设备精度满足无支撑 3D 打印需求,但标定过程较为繁琐且标定物较为复杂,不易加工;肖仕彬等^[16]以线激光与五轴配合的测量系统为例,通过扫描标准球的表面并进行最优化搜索的方式,实现了对位移轴和转轴位姿的分步标定。

基于前人的研究基础,本文设计了一种标定球对称分布的十字形标定物,提出了一种利用该标定物实现的五轴 3D 打印机运动轴的标定方法,然后通过曲面样件打印试验验证本文所提五轴 3D 打印设备标定方法的标定效果。

1 机床坐标系和工件坐标系变换模型

五轴 3D 打印设备控制系统需要读取工件坐标系下的刀位文件,通过工件坐标系到机床坐标系的变换模型将刀位文件表示的各运动轴运动量转换成机床坐标系下的运动量,进而控制各运动轴的运动。本文基于旋

理论建立机床坐标系和工件坐标系的变换模型^[17]。

定义喷头坐标系,设喷头坐标系在初始状态下与机床坐标系重合。五轴 3D 打印设备共有两条运动链:(1)从机床床身到喷头的喷头运动链;(2)从机床床身到工件的工件运动链。喷头运动链从机床床身开始,依次到 Y 轴、X 轴、喷头;工件运动链从机床床身开始,依次到 Z 轴、A 轴、C 轴、工作台;整体运动链则从工作台开始,依次到 C 轴、A 轴、Z 轴、机床床身、Y 轴、X 轴,最终到喷头。根据上述运动链分析结果,基于旋量理论可以得到喷头坐标系相对于机床坐标系的齐次变换矩阵 T_1 为^[18]

$$T_1 = e^{\hat{\xi}_y \theta_y} \cdot e^{\hat{\xi}_x \theta_x} \cdot [g_{bt}(0)] \quad (1)$$

工件坐标系相对于机床坐标系的齐次变换矩阵为^[18]

$$T_2 = [g_{bw}(\theta_z, \theta_a, \theta_c)] = e^{\hat{\xi}_z \theta_z} \cdot e^{\hat{\xi}_a \theta_a} \cdot e^{\hat{\xi}_c \theta_c} \cdot [g_{bw}(0)] \quad (2)$$

式中, ξ_a 、 ξ_c 分别为旋转轴 A、C 的旋量; θ_x 、 θ_y 分别为 X 轴、Y 轴的运动量; $g_{bt}(0)$ 为初始状态下喷头坐标系相对于机床坐标系的齐次变换矩阵; θ_z 、 θ_a 、 θ_c 分别为 Z 轴、A 轴、C 轴的运动量; ξ_x 、 ξ_y 、 ξ_z 分别为直线轴 X、Y、Z 的旋量; $g_{bw}(0)$ 表示初始状态下工件坐标系相对于机床坐标系的齐次变换矩阵。

对于旋转轴,其旋量为^[18]

$$\xi_i = \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix}, v_i = -\omega_i \times q_i \quad (i = a, c) \quad (3)$$

式中, v_i 为旋转轴旋转方向的单位矢量; ω_i 为旋转轴的方向向量; q_i 为旋转轴上的任一点。

对于直线轴,其旋量表示为

$$\xi_k = \begin{bmatrix} \omega_k \\ 0 \end{bmatrix} \quad (k = x, y, z) \quad (4)$$

式中, ω_k 为直线轴的方向向量。由式(3)和(4)可得

$$\xi_a = \begin{bmatrix} -\omega_a \times {}^d q_a \\ \omega_a \end{bmatrix}, \xi_c = \begin{bmatrix} -\omega_c \times {}^d q_c \\ \omega_c \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\xi_x = \begin{bmatrix} \omega_x \\ 0 \end{bmatrix}, \xi_y = \begin{bmatrix} \omega_y \\ 0 \end{bmatrix}, \xi_z = \begin{bmatrix} \omega_z \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中, ω_x 、 ω_y 、 ω_z 、 ω_a 、 ω_c 为各运动轴的方向向量; ${}^d q_a$ 、 ${}^d q_c$ 为旋转轴上一点在标定物坐标系中的坐标。由于初始状态下喷头坐标系和机床坐标系重合,所以有

$$g_{bt}(0) = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = I_{4 \times 4} \quad (6)$$

式中, $I_{3 \times 3}$ 表示 3×3 的单位矩阵。

$$[g_{bw}(0)] = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & \mathbf{w}_b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{w}_b = ({}^b x_0, {}^b y_0, {}^b z_0)^T$ 表示工件坐标系相对于机床

坐标系的偏置。

由式(1)和(2)可得机床坐标系和工件坐标系的变换模型为

$$T_3 = T_2^{-1} \cdot T_1 = [g_{bw}(0)]^{-1} \cdot e^{-\hat{\xi}_c \theta_c} \cdot e^{-\hat{\xi}_a \theta_a} \cdot e^{-\hat{\xi}_z \theta_z} \cdot e^{\hat{\xi}_y \theta_y} \cdot e^{\hat{\xi}_x \theta_x} \quad (8)$$

对 $\omega_x, \omega_y, \omega_z, \omega_a, \omega_c$ 和 ${}^d q_a, {}^d q_c$ 进行标定,得到 $\xi_x, \xi_y, \xi_z, \xi_a, \xi_c$ 即可求解机床坐标系和工件坐标系的变换模型。此外在安装标定物时,将标定物中心定位于工作台中心,令标定物坐标系和工件坐标系重合。

2 标定物球心坐标拟合

标定物由标定球和标定球固定板两部分组成,外形如图1所示。标定球半径为10 mm,为减重,将固定板设计成十字型,中间凸出一个直角用来测量工件坐标系和机床坐标系的偏置值。固定板尺寸如图2所示,其中 $\varnothing 8$ 孔位用于通过连杆固定标定球。以固定板下表面中心的 $\varnothing 8$ 孔心为标定物坐标系原点,确定标定物坐标系(图1)。中心标定球的球心距固定板下表面距离为60 mm,四周分布的其他4个标定球球心距固定板下表面的距离均为30 mm。

由此可得各待测点相对于标定物坐标系的坐标如表1所示,其中 D_0 用于测量机床坐标系和标定物坐标系的偏置量, $D_1 \sim D_5$ 为各标定球的球心坐标。

采用球面最小二乘法拟合球心在机床坐标系中的坐标。利用寻边器实测每个标定球球面上的多点坐标,完成标定球心的坐标拟合。已知寻边器球形测头的半径 r_1 为1 mm,标定球半径 r_2 为10 mm。测量时测得半径 $R=r_1+r_2$ 球面上的5点,拟合出该球球心作为标定球球心坐标。采用对径测量的“四加一”测点方案,即在球面的赤道平面上取4个间隔 90° 的点 P_1, P_2, P_3, P_4 ,

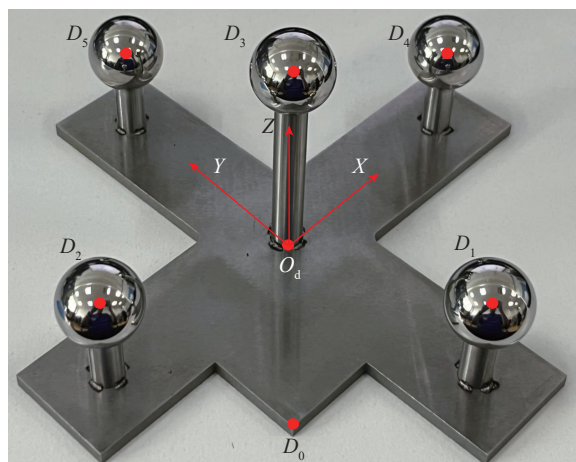


图1 标定物实物图
Fig.1 Calibration object

在球面的极地区域取一点 P_5 ,记该5点在机床坐标系下的坐标为 ${}^b P_j = ({}^b x_{P_j}, {}^b y_{P_j}, {}^b z_{P_j}) (j=1, 2, 3, 4, 5)$,如图3所示,采用对径测量可以消除偏心和抖动带来的误差^[19]。设待拟合球心坐标为 ${}^b D_i = ({}^b x_{D_i}, {}^b y_{D_i}, {}^b z_{D_i})$, i 为标定球个数 ($i=1, 2, 3, 4, 5$),可以得到待拟合球面在机床坐标系中的方程为

$$({}^b x_{P_j} - {}^b x_{D_i})^2 + ({}^b y_{P_j} - {}^b y_{D_i})^2 + ({}^b z_{P_j} - {}^b z_{D_i})^2 = R^2 \quad (9)$$

利用最小二乘法拟合球面球心,目标函数为

$$F({}^b x_{D_i}, {}^b y_{D_i}, {}^b z_{D_i}) = \sum_{j=1}^5 ({}^b x_{P_j}^2 + {}^b y_{P_j}^2 + {}^b z_{P_j}^2 - 2{}^b x_{P_j} {}^b x_{D_i} - 2{}^b y_{P_j} {}^b y_{D_i} - 2{}^b z_{P_j} {}^b z_{D_i} + {}^b x_{D_i}^2 + {}^b y_{D_i}^2 + {}^b z_{D_i}^2 - R^2)^2 \quad (10)$$

由式(10)可得

$$\frac{\partial F}{\partial {}^b x_{D_i}} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial {}^b y_{D_i}} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial {}^b z_{D_i}} = 0 \quad (11)$$

求解式(11),得到机床坐标系下标定球的球心坐标。

3 直线轴标定

设机床坐标系 $X-Y-Z$ 中存在一单位向量 i ,在 XOY 平面上的投影为 i_1 ,设 i 与 Z 轴的夹角为 β , i_1 与 X 轴的夹

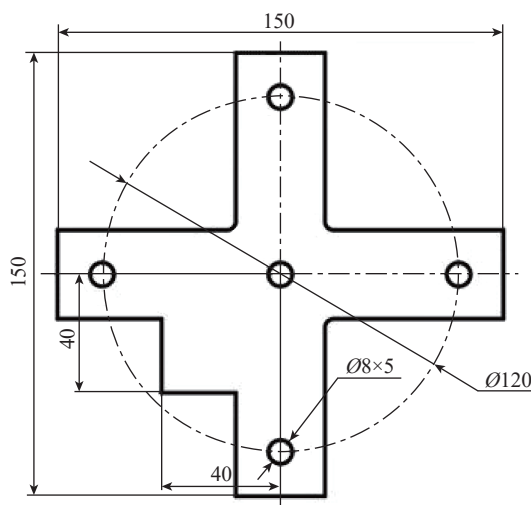


图2 标定球固定板
Fig.2 Fixation plate of calibration spheres

表1 各待测点在标定物坐标系中的坐标
Table 1 Coordinates of each point to be measured in coordinate system of calibration

待测点	D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
${}^d x$	-40	0	-60	0	60	0
${}^d y$	-40	-60	0	0	0	60
${}^d z$	4	30	30	60	30	30

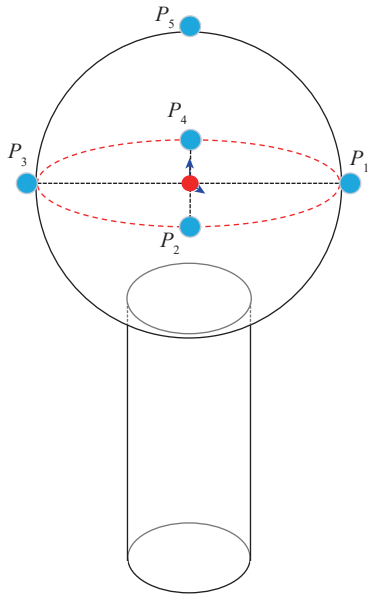


图3 “四加一”测点方案
Fig.3 “Four plus one” measuring scheme

角为 γ , 则该单位向量 \mathbf{i} 可以表示为

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} \sin \beta \cdot \cos \gamma \\ \sin \beta \cdot \sin \gamma \\ \cos \beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

同理, 五轴 3D 打印设备直线轴的 3 个方向向量 ($\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$) 在标准机床坐标系下可表示为

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \sin \beta_x \cdot \cos \gamma_x \\ \sin \beta_x \cdot \sin \gamma_x \\ \cos \beta_x \end{bmatrix}, \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \sin \beta_y \cdot \cos \gamma_y \\ \sin \beta_y \cdot \sin \gamma_y \\ \cos \beta_y \end{bmatrix}, \mathbf{z} = \begin{bmatrix} \sin \beta_z \cdot \cos \gamma_z \\ \sin \beta_z \cdot \sin \gamma_z \\ \cos \beta_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, β_n ($n=x, y, z$) 分别为 $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ 与机床坐标系 Z 轴的夹角; γ_n ($n=x, y, z$) 分别为 $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ 在机床坐标系 XOY 平面上的投影与 X 轴的夹角。

工件坐标系相对于机床坐标系的偏置量为 $\mathbf{w}_b = ({}^b x_0, {}^b y_0, {}^b z_0)^T$, 由于标定物坐标系和工件坐标系重合, 则机床坐标系任一点 ${}^b \mathbf{P} = ({}^b x_p, {}^b y_p, {}^b z_p)$ 变换到标定物坐标系的变换关系为

$${}^d \mathbf{P} = \mathbf{x} \cdot {}^b x_p + \mathbf{y} \cdot {}^b y_p + \mathbf{z} \cdot {}^b z_p + \mathbf{w}_b \quad (14)$$

令 $\mathbf{G} = [\mathbf{x} \ \mathbf{y} \ \mathbf{z}]$, 则式(14)为

$${}^d \mathbf{P} = \mathbf{G} \cdot {}^b \mathbf{P} + \mathbf{w}_b \quad (15)$$

式中, ${}^d \mathbf{P} = ({}^d x_p, {}^d y_p, {}^d z_p)$ 为机床坐标系中的点 ${}^b \mathbf{P} = ({}^b x_p, {}^b y_p, {}^b z_p)$ 在标定物坐标系中的坐标。

由式(13)和(14)可以看出, 式(15)中的机床坐标系与标定物坐标系间的变换模型共包含 $\{\beta_x, \gamma_x, \beta_y, \gamma_y, \beta_z, \gamma_z, x_0, y_0, z_0\}$ 9 个待求解量, 至少需要已知 3 个不同的

目标点分别在标定物坐标系和机床坐标系中的坐标才能求解这 9 个未知量。

任取标定物上 3 个标定球, 已知其球心在标定物坐标系下的坐标分别为 ${}^d \mathbf{D}_1 = ({}^d x_{D1}, {}^d y_{D1}, {}^d z_{D1})^T, {}^d \mathbf{D}_2 = ({}^d x_{D2}, {}^d y_{D2}, {}^d z_{D2})^T, {}^d \mathbf{D}_3 = ({}^d x_{D3}, {}^d y_{D3}, {}^d z_{D3})^T$, 在机床坐标系下对应的坐标分别为 ${}^b \mathbf{B}_1 = ({}^b x_{B1}, {}^b y_{B1}, {}^b z_{B1})^T, {}^b \mathbf{B}_2 = ({}^b x_{B2}, {}^b y_{B2}, {}^b z_{B2})^T, {}^b \mathbf{B}_3 = ({}^b x_{B3}, {}^b y_{B3}, {}^b z_{B3})^T$, 则根据式(15)得到

$$\begin{cases} {}^d \mathbf{D}_1 = \mathbf{G} \cdot {}^b \mathbf{B}_1 + \mathbf{w}_b \\ {}^d \mathbf{D}_2 = \mathbf{G} \cdot {}^b \mathbf{B}_2 + \mathbf{w}_b \\ {}^d \mathbf{D}_3 = \mathbf{G} \cdot {}^b \mathbf{B}_3 + \mathbf{w}_b \end{cases} \quad (16)$$

利用牛顿迭代法求解式(16)^[20], 即可得到机床坐标系直线轴的 3 个方向向量 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 及标定物坐标系相对于机床坐标系的偏置量 $\mathbf{w}_b = ({}^b x_0, {}^b y_0, {}^b z_0)^T$ 。

4 旋转轴标定

旋转轴的标定包括标定旋转轴在机床坐标系中任一点 ${}^b q_j = ({}^b x_{qj}, {}^b y_{qj}, {}^b z_{qj})$ ($j=a, c$) 在标定物坐标系中的坐标 ${}^d q_j = ({}^d x_{qj}, {}^d y_{qj}, {}^d z_{qj})$ ($j=a, c$) 及旋转轴的方向向量 ω_a, ω_c 。如图 4 所示, 设有一点 Q_1 按固定角度沿以 q_j 为圆心的圆随旋转轴转动, 得到圆上各点 Q_2, Q_3, \dots, Q_n , 任取其中连续 3 点可确定两个向量 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$, 可得法向量 $\omega_j = \mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2$ (即待标定的旋转轴方向向量)。利用 Q_1, Q_2, \dots, Q_n 在机床坐标系中的坐标 ${}^b Q_i = ({}^b x_{Qi}, {}^b y_{Qi}, {}^b z_{Qi})$ ($i=1, 2, \dots, n$) 可以拟合得到 ${}^b q_j = ({}^b x_{qj}, {}^b y_{qj}, {}^b z_{qj})$, 进而得到该点在标定物坐标系下的坐标 ${}^d q_j = ({}^d x_{qj}, {}^d y_{qj}, {}^d z_{qj})$ 。

以 Q_2 为原点, 以 ω_j 为 Z 方向, \mathbf{e}_1 为 X 方向, 则 $\omega_j \times \mathbf{e}_1$ 为 Y 方向, 建立坐标系 N, 得到机床坐标系到坐标系 N 的变换关系

$${}^N Q_i = \mathbf{M}^{-1} \cdot {}^b Q_i \quad (17)$$

式中, ${}^N Q_i = ({}^N x_{Qi}, {}^N y_{Qi}, {}^N z_{Qi})$ ($i=1, 2, \dots, n$) 表示 Q_i 在坐标系 N 中的坐标; \mathbf{M} 为变换矩阵, 即

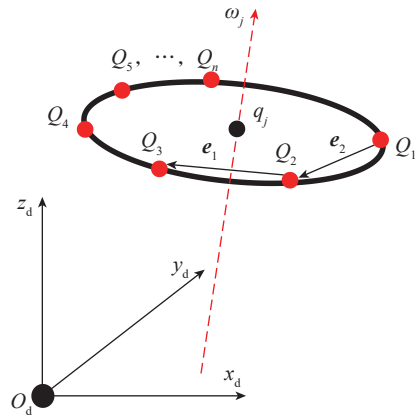


图4 旋转轴标定示意图
Fig.4 Schematic diagram of rotary axis calibration

$$M = \begin{bmatrix} e_1 & \omega_j \times e_1 & \omega_j & {}^b Q_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

由式(17)可得 ${}^b Q_1$ 、 ${}^b Q_2$ 、 \dots 、 ${}^b Q_n$ 在坐标系 N 中的坐标 ${}^N Q_1$ 、 ${}^N Q_2$ 、 \dots 、 ${}^N Q_n$ 。

在坐标系 N 内,圆的方程为

$$({}^N x_{Q_i} - {}^N x_{q_j})^2 + ({}^N y_{Q_i} - {}^N y_{q_j})^2 = r_3^2 \quad (19)$$

式中, ${}^N Q_i = ({}^N x_{Q_i}, {}^N y_{Q_i}, 0)$ ($j=a, c$) 为圆心 q 在坐标系 N 中的坐标; r_3 为圆半径。利用最小二乘法拟合其圆心, 目标函数为

$$F_1({}^N x_{q_j}, {}^N y_{q_j}, C) = \sum_{i=1}^6 ({}^N x_{Q_i}^2 + {}^N y_{Q_i}^2 - 2{}^N x_{Q_i} {}^N x_{q_j} - 2{}^N y_{Q_i} {}^N y_{q_j} + C)^2 \quad (20)$$

式中, $C = {}^N x_{q_j}^2 + {}^N y_{q_j}^2 - r_3^2$, 由式(20)得到

$$\frac{\partial F_1}{\partial {}^N x_{q_j}} = 0, \quad \frac{\partial F_1}{\partial {}^N y_{q_j}} = 0, \quad \frac{\partial F_1}{\partial C} = 0 \quad (21)$$

求解式(21)可得 ${}^N x_{q_j}$ 、 ${}^N y_{q_j}$ 、 r_3 。

圆心在机床坐标系中的坐标 ${}^b q_j = ({}^b x_{q_j}, {}^b y_{q_j}, {}^b z_{q_j})$ 为

$${}^b q_j = M \cdot {}^N q_j \quad (22)$$

由式(15)可知, 圆心 ${}^b q_j = ({}^b x_{q_j}, {}^b y_{q_j}, {}^b z_{q_j})$ 在标定物坐标系下的坐标 ${}^d q_j = ({}^d x_{q_j}, {}^d y_{q_j}, {}^d z_{q_j})$ 为

$${}^d q_j = G \cdot {}^b q_j + w_b \quad (23)$$

以 A 轴标定为例, 将标定物置于工作台正中心, 使标定物坐标系和工件坐标系重合。令点 Q 按角度 α 旋转, 得到 A 轴标定所需的 6 个点 $Q_1 \sim Q_6$, 如图 5 所示。采用上述标定方法得到 A 轴的方向向量和旋转轴上任

一点在标定物坐标系下的坐标, 又由于工件坐标系和标定物坐标系重合, 因此得到旋转轴上任一点在工件坐标系下的坐标和 A 轴的方向向量。

5 试验验证

标定流程如图 6 所示, 标定采用的标定物见图 1。寻边器选择 mach3 3D 测头, 重复定位精度为 $5 \mu\text{m}$ 。首先需要安装标定物和寻边器, 利用螺纹夹将标定物固定在设备的工作台上, 防止标定物在标定过程中产生相对位移。

测量直线轴标定所需点的坐标。保持标定物静止, 依据“四加一”的测点方式测得标定球 $D_1 \sim D_5$ 表面的 5 点, 共测 25 个点。

测量旋转轴标定所需点的坐标。首先测量标定 C 轴所需的点, 在标定物坐标系内 Z 方向高度为 30 mm 的标定球中任取一个标定球, 设初始球心位置为 Q_1 , 令 C 轴每次旋转 60° , 带动该球亦旋转 60° , 旋转 5 次, 并依次测得该球面上 5 点, 共测 25 个点。其次测量标定 A 轴所需的点, 为防止在标定 A 轴时寻边器与标定物产生干涉, 取标定物坐标系内 Z 方向高度为 60 mm 的标定球, 其初始球心为 D_3 , 此处设为 Q_3 , 令 A 轴每次旋转 15° , 带动该球亦旋转 15° , 旋转 5 次, 并依次测定该球面 5 点, 共测 25 个点。

将上述测得的所有点坐标代入球心最小二乘算法, 得到直线轴标定所需的 5 个标定球球心坐标 $({}^b x_{D_i}, {}^b y_{D_i}, {}^b z_{D_i})$ ($i=1, 2, \dots, 5$), 结果见表 2; 得到标定 C 轴所需的标定球球心坐标 $({}^b x_{Q_1}, {}^b y_{Q_1}, {}^b z_{Q_1})$, 结果见表 3; 得到标定 A 轴所需的标定球球心坐标 $(x_{Q_3}, y_{Q_3}, z_{Q_3})$, 结果见表 4。

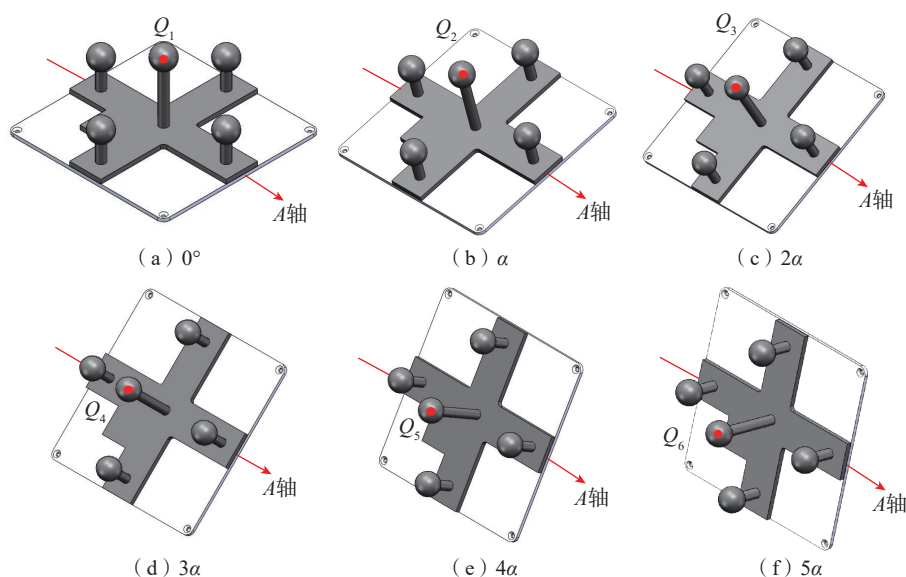


图 5 A 轴标定示意图

Fig.5 Schematic diagram of A -axis calibration

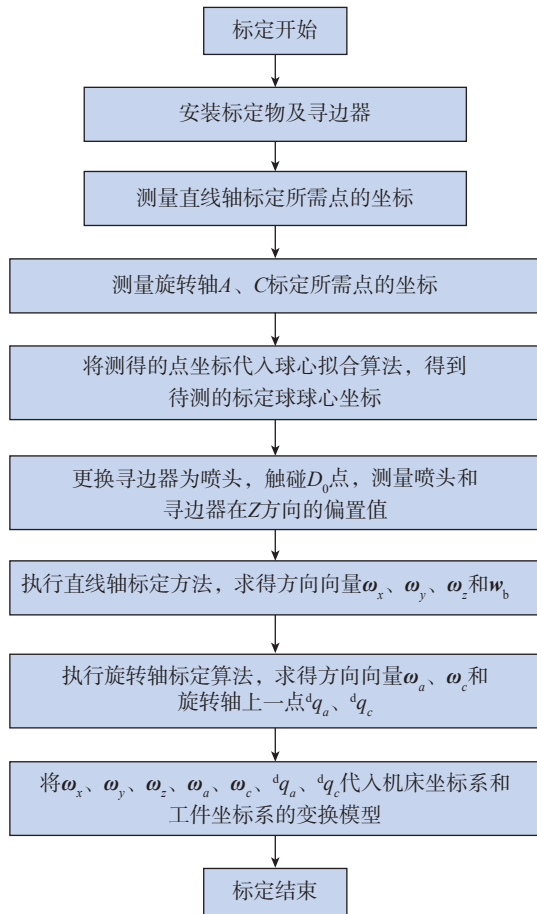


图6 标定流程图

Fig.6 Flowchart of calibration

将表2中的球心坐标代入直线轴标定算法,求解得到方向向量 ω_x 、 ω_y 、 ω_z 和 w_b 。将表3和4中的球心坐标代入旋转轴标定算法,求解得到方向向量 ω_a 、 ω_c 和旋转轴上任一点 q_a 、 q_c ,标定结果如表5所示。

因为寻边器与打印喷头长度不同,最终打印时需要用喷头替换寻边器,所以需要进行长度补偿。利用喷头末端触碰 D_0 ,以获得实际机床坐标系和工件坐标系的偏置量。由于标定物和喷头均为金属,当两者接触时即成为连通导体,因此可以利用万用电表检测喷头末端是否接触到待测点。将电表拨通至欧姆档,黑表笔利用胶带固定在标定物上,手持红表笔抵住喷头,在触点时,肉眼观察喷头末端位置,尽量使末端中心和 D_0 的尖点接触,如图7所示。当电表参数跳动或蜂鸣器报警,记录此时的坐标值。

将标定得到的结果代入式(6),可得各运动轴对应的旋量,将所得旋量代入式(5)可得机床坐标系和工件坐标系的变换模型,从而实现将工件坐标系下的刀位文件转换成各运动轴在机床坐标系下的运动量,以控制打印设备的运动。

表2 标定直线轴所需球心坐标

Table 2 Sphere center coordinates for calibrating linear axis

球心坐标	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
${}^b x_{D_i}$	129.087	69.135	129.162	189.154	129
${}^b y_{D_i}$	178.701	118.714	117.958	118.66	58.789
${}^b z_{D_i}$	89.435	91.373	61.037	90.693	92.557

表3 标定旋转轴C所需球心坐标

Table 3 Sphere center coordinates for calibrating rotation axis C

球心坐标	$Q_1(0^\circ)$	$Q_1(60^\circ)$	$Q_1(120^\circ)$	$Q_1(180^\circ)$	$Q_1(240^\circ)$	$Q_1(300^\circ)$
${}^b x_{Q_1}$	129.087	180.893	181.089	129.158	77.005	76.808
${}^b y_{Q_1}$	178.701	148.675	88.458	58.206	88.001	148.183
${}^b z_{Q_1}$	89.435	89.991	91.393	92.546	91.923	90.481

表4 标定旋转轴A所需球心坐标

Table 4 Sphere center coordinates for calibrating rotation axis A

球心坐标	$Q_3(0^\circ)$	$Q_3(15^\circ)$	$Q_3(30^\circ)$	$Q_3(45^\circ)$	$Q_3(60^\circ)$	$Q_3(75^\circ)$
${}^b x_{Q_3}$	129.162	129.339	129.352	129.375	129.354	129.319
${}^b y_{Q_3}$	117.958	133.553	148.591	161.595	171.822	178.309
${}^b z_{Q_3}$	61.037	62.589	68.313	77.691	90.22	104.834

表5 标定结果

Table 5 Calibration results

标定项目	X	Y	Z
ω_x	0.99998	-0.00029	-0.00568
ω_y	0.00059	-0.99966	-0.02601
ω_z	0.00057	0.02618	-0.99965
ω_a	0.99984	0.00900	-0.01521
ω_c	-0.00110	0.00039	-0.99999
q_a	0.01181	-1.21801	0.05605
q_c	0.34231	0.22440	-0.00028
w_b	-128.796	117.558	176.298

为检验运用本文标定方法后3D打印设备的精度是否达到需求,分别使用本文标定方法和方形标定物(图8)的标定方法^[21]标定同一3D打印设备,并打印图9所示的口盖曲面进行对比验证。对于口盖曲面,需要先利用三轴轨迹打印支撑基底,在基底上使用五轴轨迹打印多自由度曲面。方形标定物标定法为课题组的前期工作,通过直接测量标定物上角点对应的3个面

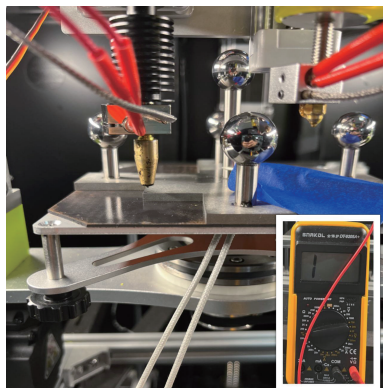


图7 电表检测
Fig.7 Multimeter testing



图8 方形标定物
Fig.8 Square calibration object

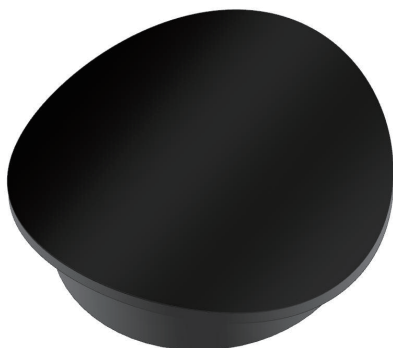


图9 曲面打印零件
Fig.9 Curved-surface printed part

的位置获得角点坐标,得到角点坐标后,通过几何方法直接计算旋转轴中心及直线轴和旋转轴的方向向量,相较于本文提出的方法,方形标定物标定法没有点的拟合过程。

两种方法的曲面打印对比如图10所示,其中,使用方形标定物标定方法的曲面打印实物如图10(a)所示,其点云拟合结果如图10(c)所示,使用本文标定方法的曲面打印实物如图10(b)所示,其点云拟合结果如图10(d)所示。采用点云拟合方法进行打印质量的对

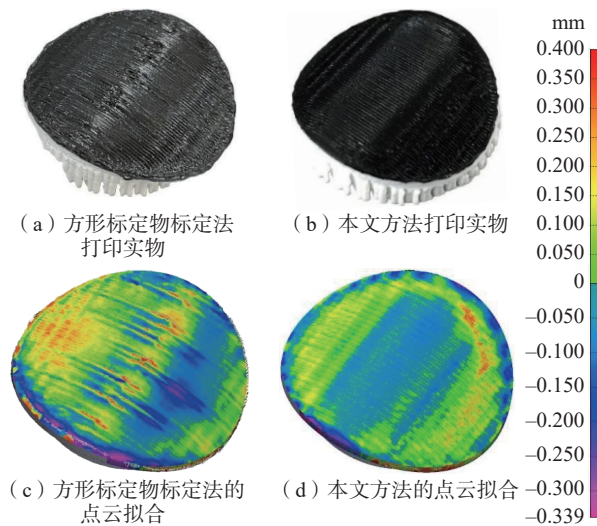


图10 曲面打印结果对比图
Fig.10 Comparison diagram of curved-surface printing results

比,通过平均偏差和标准偏差两个指标评价打印精度。点云颜色越深表明点云数据和理想模型偏差越大,设置拟合的最大距离为 ± 0.4 mm。使用方形标定物标定方法打印的曲面,其平均偏差为0.023 mm,标准偏差为0.139 mm,点云数据和理想模型偏差较大,多处区域达到最大偏差值,曲面打印效果较差。而使用本文标定方法打印的曲面,平均偏差为0.002 mm,标准偏差为0.089 mm,点云数据和理想模型拟合较好。相较于方形标定物的标定方法,采用本文标定方法标定后打印曲面的平均偏差降低了91.3%,打印位置精度提升较高,标准偏差降低了35.97%,打印表面质量也有所提升,综合打印精度有明显改善。上述结果表明,本文提出的标定方法可有效提高3D打印设备的精度。

6 结论

本文设计了一种5枚标定球对称分布的标定物,提出了利用该标定物的五轴3D打印设备系统的标定方法,并通过打印曲面样件对标定后五轴3D打印设备的打印效果进行验证,主要结论如下。

(1)设计了一种包含5枚标定球的标定物,结合球心最小二乘拟合法获得机床坐标系下标定球球心的坐标。

(2)基于标定坐标系和机床坐标系的变换关系建立方程,对直线轴进行标定,基于平面法向量求解和圆的最小二乘拟合法对旋转轴进行标定。

(3)点云拟合结果显示,相较于方形标定物的标定方法,所提方法标定后的曲面打印平均偏差降低了91.3%,表明所提标定方法可以有效提高五轴3D打印设备的打印精度。

参考文献

- [1] HONG F, HODGES S, MYANT C, et al. Open5x: Accessible 5-axis 3D printing and conformal slicing[C]//CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New Orleans: ACM, 2022: 1–6.
- [2] HONG F, LAMPRET B, MYANT C, et al. 5-axis multi-material 3D printing of curved electrical traces[J]. Additive Manufacturing, 2023, 70: 103546.
- [3] G L S, PAWEL M, MARIUS L, et al. Supportless 5-axis 3D-printing and conformal slicing: A simulation-based approach[C]//2023 24th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE). Graz: IEEE, 2023: 1–7.
- [4] IBARAKI S, OTA Y. A machining test to calibrate rotary axis error motions of five-axis machine tools and its application to thermal deformation test[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 86: 81–88.
- [5] 曾靖超, 伍剑波. 双摆台五轴磁流变机床结构参数标定方法研究[J]. 制造技术与机床, 2022(7): 141–146.
- ZENG Jingchao, WU Jianbo. Research on the calibration method of structural parameters of five-axis magnetorheological machine tool with double swing table[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022(7): 141–146.
- [6] 徐兆华, 盛辉, 谷睿宇, 等. 基于双激光跟踪仪的五轴联动激光机床空间精度检测[J]. 机电工程技术, 2023, 52(12): 213–216.
- XU Zhaohua, SHENG Hui, GU Ruiyu, et al. Spatial accuracy detection for five-axis laser machine tool based on dual laser tracker[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(12): 213–216.
- [7] 梁小冰, 卢耀安, 王成勇. 双转台五轴机床旋转轴位置无关几何误差的辨识[J]. 中国机械工程, 2023, 34(21): 2585–2591.
- LIANG Xiaobing, LU Yaoan, WANG Chengyong. Identification of position-independent geometric errors for rotary axes of five-axis table-tilting machine tools[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(21): 2585–2591.
- [8] KIM J W, SHIN C R, KIM H S, et al. Error model and kinematic calibration of a 5-axis hybrid machine tool[C]//2006 SICE-ICASE International Joint Conference. Busan: IEEE, 2006: 3111–3115.
- [9] 张文斌, 刘焕宇, 王宇林, 等. 双转台五轴数控机床旋转轴位置无关几何误差辨识[J]. 中国机械工程, 2024, 35(6): 1023–1033.
- ZHANG Wenbin, LIU Huanlao, WANG Yulin, et al. Identification of rotary axes PIGEs of five-axis CNC machines with double rotary tables[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(6): 1023–1033.
- [10] 邵圳, 蒲耀洲, 曹利, 等. 基于 R-test 的旋转轴安装误差辨识[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(5): 71–74.
- SHAO Zhen, PU Yaozhou, CAO Li, et al. Identification of installation errors of rotary axis based on R-test[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022(5): 71–74.
- [11] 毕超, 赵源, 郝雪, 等. 俯仰轴轴线位置的视觉标定方法研究[J]. 计量学报, 2022, 43(4): 457–463.
- BI Chao, ZHAO Yuan, HAO Xue, et al. Research on vision calibration method of the pitch axis position[J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(4): 457–463.
- [12] 于森. 多方向FDM 3D打印关键技术及工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
- YU Miao. Research on key issues and craft of multi-directional FDM 3D printing[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
- [13] 杨洪涛, 刘士萍, 刘月琪, 等. 线扫描齿轮测量机转台基准轴标定方法[J]. 应用激光, 2024, 44(3): 115–123.
- YANG Hongtao, LIU Shiping, LIU Yueqi, et al. A calibration method for rotary table reference axis of line scan gear measuring machine[J]. Applied Laser, 2024, 44(3): 115–123.
- [14] 刁怀东. 五轴熔融沉积成型三维打印装备及关键工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- DIAO Huaidong. Research on equipment design and critical technique of 5-axis fused deposition modelling process[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [15] 刘磊. 面向无支撑 3D 打印的五轴 FDM 系统关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- LIU Lei. Research on key technologies of five-axis FDM system for unsupported 3D printing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [16] 肖仕彬, 李琛, 李泽骁, 等. 线激光五轴运动系统的轴系标定方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(3): 1–13.
- XIAO Shibin, LI Chen, LI Zexiao, et al. Research on axis calibration method for line laser five-axis motion system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(3): 1–13.
- [17] 理查德·摩雷, 李泽湘, 夏恩卡·萨思特里. 机器人操作的数学导论[M]. 徐卫良, 钱瑞明, 译. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- MURRAY Richard, LI Zexiang, SASTRY Shankar. A mathematical introduction to robotic manipulation[M]. XU Weiliang, QIAN Ruiming, trans. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [18] 杨吉祥, 陈幼平. 五轴数控机床的运动控制建模及精度提高方法研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 123.
- YANG Jixiang, CHEN Youping. Research on motion control modeling and accuracy improvement of five-axis NC machine tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 123.
- [19] 丁锋, 俞朴. 四点测球法在球坑自动检测中的应用[J]. 计量学报, 2001, 22(3): 178–180.
- DING Feng, YU Pu. Application of 4-point method in the automatic measurement of spherical socket[J]. Acta Metrologica Sinica, 2001, 22(3): 178–180.
- [20] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 5版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- LI Qingyang, WANG Nengchao, YI Dayi. Numerical analysis[M]. 5th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [21] LI Y H, CHEN Y X, WANG H T, et al. Research on kinematic parameter identification method of five-axis equipment for melting deposition[C]//Proceedings of the 10th International Academic Conference For Graduates. Nanjing: NUAA, 2022.

通信作者: 戴宁, 教授, 研究方向为智能数字化设计。

(责编 向阳)