

引文格式: 刘海波, 李文杰, 丁悦, 等. 面向串并联镜像加工装备的线激光安装位姿高精度标定方法[J]. 航空制造技术, 2025, 68(11): 14-20.

LIU Haibo, LI Wenjie, DING Yue, et al. High-precision line laser installation pose calibration method for serial-parallel mirror milling equipment[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(11): 14-20.

面向串并联镜像加工装备的线激光安装位姿高精度标定方法

刘海波¹, 李文杰¹, 丁悦², 王鹏飞¹, 梁润¹, 薄其乐¹, 谢福贵³, 肖世宏²

(1. 大连理工大学高性能精密制造全国重点实验室, 大连 116024;

2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

3. 清华大学机械工程系摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

[摘要] 针对现有串并联机床线激光传感器测量位姿准确标定难题, 提出一种适用于串并联机床的线激光安装位姿标定方法。基于标准球特性, 求取球心坐标后利用标准球球心不变性建立等式, 提出求取旋转矩阵的目标函数; 通过扫描标准球表面, 获取其点云数据并拟合出球心, 与球心坐标真值比较并建立平移矩阵的求取模型。与传统手眼标定方法相比, 所提方法沿 X 、 Y 、 Z 3 个方向的标定误差分别降低了 88.9%、83.6%、82.1%。所提方法无须改变串并联机构的姿态, 有效避免了串并联机床定位误差对测量位姿标定的影响, 提高了标定精度。

关键词: 串并联机床; 标准球; 线激光传感器; 位姿标定; 测量加工一体化

中图分类号: V26; TG5

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.11.014



刘海波

教授, 博士, 研究方向为高性能复杂构件智能加工基础理论、关键技术与装备。

镜像加工过程中, 需要对待加工件实际廓形进行在机扫描测量, 获取工件实际在机状态, 加工完成后对工件下陷、边窗等关键几何特征进行扫描测量, 评定加工尺寸精度。将线激光传感器等测量装备集成于镜像加工机床末端, 根据工件理论廓形由机床带动传感器进行扫描测量运动, 可实现大尺寸薄壁构件实际廓形和加工特征的快速扫描获取, 是保证此类零件加工质量的有效手段^[1-3]。串并联机床结合了串联机床和并联机床的优势, 展现出紧凑的结构、模块化的设计及优越的动态性能等优点^[4]。紧凑设计使其占用空间小且高效利用加工体积, 适合空间有限但性能要求高的场景。模块化设计使机床配置灵活, 能够根据需求调整支链数目、长度和角度, 满足定制化需求。此外,

并联机构具备快速加减速和高响应速度的卓越动态性能, 适用于复杂轨迹加工和高速切削任务^[5]。

在实际应用中, 线激光传感器的安装误差不可避免, 导致基于理论模型构建的测量系统运动链发生偏离, 从而造成工件表面形态测量结果存在系统性误差^[6]。这些误差会在后续加工过程中累积, 严重影响加工精度。因此, 必须在线激光传感器安装后对传感器安装位姿进行标定, 获取表征其安装位置和姿态的平移矩阵和旋转矩阵, 才能有效消除系统性误差, 保证加工精度。

针对线激光位姿标定问题, 王英男等^[7]提出了一种定点变位姿方法, 依据标准球球心不变求解表征线激光安装姿态的平移矩阵与旋转矩阵。Zhang 等^[8]扫描设计的校准块并重

建其特征,通过对重建的特征与设计的特征进行比较来识别激光轮廓仪的位置和方向,最后通过坐标偏移补偿位置和方向偏差。林玉莹等^[9]通过求取标准球的最大圆弧来直接获取球心在线激光坐标系的坐标,以此求取线激光的标定矩阵。李津容等^[10]针对数控机床激光测头安装位姿误差问题,提出了一种在机测量线激光传感器安装位姿标定方法,基于手眼标定原理给出了关于测头安装位姿参数的线性求解算法,完成了对测头安装误差的全局标定。叶柳康等^[11]提出一种以平面与球面为靶标的安装姿态标定方法,采用欧拉角描述测量系统的安装姿态,基于机构与传感器的装配关系,使用最小二乘法分析3个方向的欧拉角并解算姿态标定矩阵。王宇晗等^[12]从不同的方向扫描整个标准球采集扫描数据,根据三维点云数据提取不同扫描方向所对应的每一个点云的球心坐标,根据扫描方向和球心坐标计算出旋转和平移矩阵,得到线激光器相对于机床主轴的相对位置关系。

上述方法主要通过多次改变机床位姿,控制线激光传感器从不同角度对标靶进行测量,依据标靶特征位置在机床基坐标系下不变建立等式,求取表征线激光安装姿态的平移矩阵与旋转矩阵,以实现线激光传感器位姿的标定。然而,该方法主要适用于定位精度较高的串联机床。对于串并联机床,定位精度远低于串联机床^[13]。通过多次改变串并联机床测量姿态进行位姿标定,将引入串并联机床本身的定位误差,此定位误差不可忽略。因此,面向串并联机床的线激光传感器位姿标定,必须有效剥离串并联机床自身定位误差对姿态标定精度的影响。

针对上述问题,本文研究了面向串并联镜像加工装备的线激光安装位姿高精度标定方法。首先,基于位姿变换原理建立测量系统运动链模

型,之后利用球心在串并联机床基坐标系坐标不变建立等式,提出求取旋转矩阵的最优化模型;其次,对标准球表面进行测量,对点云进行处理后拟合球心并将其与真值坐标比较,提出平移矩阵的求取模型;最后,进行了标定误差检验试验并总结全文的主要贡献。

1 串并联镜像加工测量系统运动链建模

1.1 位姿变换原理

在建立串并联机床测量系统运动链模型过程中,会涉及空间中位姿描述与位姿变换等知识。本小节旨在简要介绍空间位姿描述与变换方法,为下文的测量系统运动链建模提供理论支持。

假设存在一个固定坐标系 $\{B\}$ 与一个活动坐标系 $\{A\}$,坐标系 $\{A\}$ 固联在刚体上,为了确定刚体在坐标系 $\{B\}$ 中的位姿,需要从位置与姿态两方面对其描述。

为了描述该刚体在坐标系 $\{B\}$ 中的位置,假设坐标系 $\{A\}$ 的原点在固定坐标系 $\{B\}$ 中的投影点坐标为 ${}^B_A P$ 。

$${}^B_A P = [p_x, p_y, p_z]^T \quad (1)$$

式中, p_x 、 p_y 、 p_z 分别为点 P 的3个坐标分量。

为了描述该刚体在坐标系 $\{B\}$ 中的姿态,假设坐标系 $\{A\}$ 的3个坐标轴的单位矢量在固定坐标系 $\{B\}$ 的投影向量分别为 $r_1=[r_{11}, r_{21}, r_{31}]^T$ 、 $r_2=[r_{12}, r_{22}, r_{32}]^T$ 、 $r_3=[r_{13}, r_{23}, r_{33}]^T$,将这3个投影向量组成1个 3×3 矩阵,记为旋转矩阵 ${}^B_A R$,

$${}^B_A R = [r_1 \ r_2 \ r_3] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由直角坐标系的正交性可知旋转矩阵是两两正交的,即

$$r_i^T r_j = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases} \quad (3)$$

也可以写成

$$R^T R = R R^T = I \quad (4)$$

对于右手坐标系,还可以得到

$$|R| = r_i^T (r_2 \times r_3) = 1 \quad (5)$$

则刚体上坐标系 $\{A\}$ 中的点 P_A 在坐标系 $\{B\}$ 中可以描述为 P_B 。

$$P_B = {}^B_A R P_A + {}^B_A P \quad (6)$$

式(6)也可表示为

$$\begin{bmatrix} P_B \\ 1 \end{bmatrix} = {}^B_A T \begin{bmatrix} P_A \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 ${}^B_A T = \begin{bmatrix} {}^B_A R & {}^B_A P \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,称为坐标系 $\{A\} \rightarrow \{B\}$ 的齐次变换矩阵。

1.2 测量系统运动链建模

串并联机床由加工侧和支撑侧组成。加工侧为五轴龙门加工机床,如图1(a)加工侧所示, X 、 Y 、 Z 方向沿其3个导轨方向;支撑侧由转台、横向导轨、斜向导轨、水平导轨与一个三轴并联机构组成,如图1(a)支撑侧所示。机床两侧坐标系一致,原点为回转台上表面的圆心。线激光传感器通过法兰安装于三轴并联支撑机构末端,与机床构成测量系统运动链,依据零件理论模型规划测量轨迹,对零件进行测量,测量数据通过上位机得到处理。由于线激光传感器获取的数据为测量坐标系下 X 、 Z 两方向的数据,因此需要对测量系统运动链进行建模,将测量数据转换到串并联机床基坐标系下,实现机床坐标数据和传感器数据的融合,进而获取大型薄壁零件的在机面形。

为了进行串并联镜像加工测量系统运动链建模,定义坐标系如下。

(1)线激光测量坐标系 $\{O_S: X_S, Y_S, Z_S\}$ 。线激光测量坐标系是指线激光传感器自身的坐标系,其原点位于线激光量程的中心, Z 轴沿激光面中垂线方向, X 轴在光面内垂直于 Z 轴, Y 轴遵循右手螺旋定则。

(2)支撑侧末端坐标系 $\{O_E: X_E, Y_E, Z_E\}$ 。支撑侧末端坐标系是一个原点在串并联机构正解末端点的坐标系,在支撑侧正解末端 A_2 、 B_2 角为0时各轴线与基坐标系轴线平行。

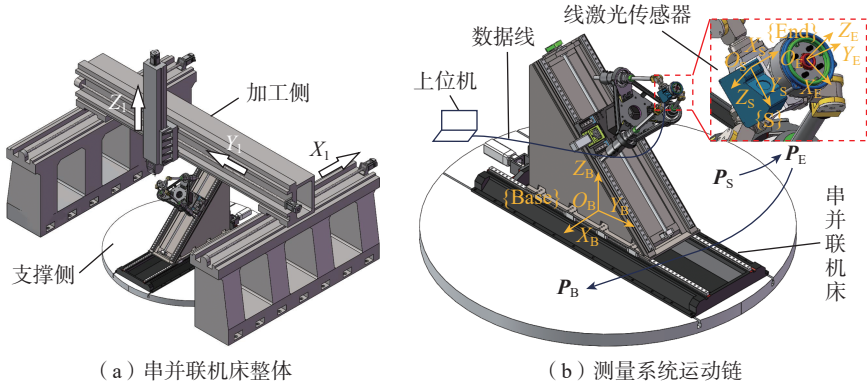


图1 串并联机床及测量系统运动链示意图

Fig.1 Schematic of the serial-parallel machine tool and measurement system kinematic chain

(3) 机床基坐标系 $\{O_B: X_B, Y_B, Z_B\}$ 。机床基坐标系原点是回转台上表面的圆心, XYZ 方向与加工侧导轨方向一致。

(4) 各坐标系下坐标表示。线激光测量坐标系下的点坐标 P_S , 机床支撑侧末端坐标系下的点坐标 P_E , 机床基坐标系下的点坐标 P_B 。

在机床基坐标系下的点坐标 P_B 可表示为

$$\begin{bmatrix} P_B \\ 1 \end{bmatrix} = {}^B E T \begin{bmatrix} P_E \\ 1 \end{bmatrix} = {}^B S T {}^S E T \begin{bmatrix} P_S \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, ${}^S E T$ 为 $\{O_S: X_S, Y_S, Z_S\} \rightarrow \{O_E: X_E, Y_E, Z_E\}$ 的齐次变换矩阵, ${}^B S T = \begin{bmatrix} {}^B E R & {}^B E t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, ${}^B E R$ 为 $\{O_S: X_S, Y_S, Z_S\} \rightarrow \{O_E: X_E, Y_E, Z_E\}$ 的旋转矩阵, ${}^B E t$ 为 $\{O_S: X_S, Y_S, Z_S\} \rightarrow \{O_E: X_E, Y_E, Z_E\}$ 的平移矩阵; ${}^B E T$ 为 $\{O_E: X_E, Y_E, Z_E\} \rightarrow \{O_B: X_B, Y_B, Z_B\}$ 的齐次变换矩阵, ${}^B E T = \begin{bmatrix} {}^B E R & {}^B E t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, ${}^B E R$ 为 $\{O_E: X_E, Y_E, Z_E\} \rightarrow \{O_B: X_B, Y_B, Z_B\}$ 的旋转矩阵, ${}^B E t$ 为 $\{O_E: X_E, Y_E, Z_E\} \rightarrow \{O_B: X_B, Y_B, Z_B\}$ 的平移矩阵。

2 串并联机构测量系统标定

2.1 线激光传感器空间姿态标定

2.1.1 旋转矩阵的最优化模型求解

借助标准球进行标定, 获取线激光测量坐标系与机床基坐标系之间的变换关系。借助刀柄将标准球固定在加工侧主轴上, 确保其在线激光测量

范围内, 保证球心坐标在串并联机床基坐标系下不变, 改变串并联机床支撑侧末端坐标, 多次测量可得

$${}^B E T_1 {}^S E T_1 \begin{bmatrix} P_{S1} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^B E T_2 {}^S E T_2 \begin{bmatrix} P_{S2} \\ 1 \end{bmatrix} = \dots = {}^B E T_n {}^S E T_n \begin{bmatrix} P_{Sn} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, ${}^S E T$ 为 $\{O_S: X_S, Y_S, Z_S\} \rightarrow \{O_E: X_E, Y_E, Z_E\}$ 的齐次变换矩阵, ${}^S E T = \begin{bmatrix} {}^S E R & {}^S E t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, ${}^S E R$ 为 $\{O_S: X_S, Y_S, Z_S\} \rightarrow \{O_E: X_E, Y_E, Z_E\}$ 的旋转矩阵, ${}^S E t$ 为 $\{O_S: X_S, Y_S, Z_S\} \rightarrow \{O_E: X_E, Y_E, Z_E\}$ 的平移矩阵; ${}^B E T_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 次测量时 $\{O_E: X_E, Y_E, Z_E\} \rightarrow \{O_B: X_B, Y_B, Z_B\}$ 的齐次变换矩阵, ${}^B E T_i = \begin{bmatrix} {}^B E R_i & {}^B E t_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, ${}^B E R_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 次测量时 $\{O_E: X_E, Y_E, Z_E\} \rightarrow \{O_B: X_B, Y_B, Z_B\}$ 的旋转矩阵, ${}^B E t_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 次测量时 $\{O_E: X_E, Y_E, Z_E\} \rightarrow \{O_B: X_B, Y_B, Z_B\}$ 的平移矩阵。

将式(9)中齐次变换矩阵表述为旋转矩阵和平移矩阵的形式, 则式(9)可进一步表示为

$${}^B E R_i [({}^S E R) P_{S1} + {}^S E t] + {}^B E t_i = {}^B E R_j [({}^S E R) P_{S2} + {}^S E t] + {}^B E t_j = \dots = {}^B E R_n [({}^S E R) P_{Sn} + {}^S E t] + {}^B E t_n \quad (10)$$

将线激光测量坐标系轴线与支撑侧末端坐标系轴线尽可能平行安装, 控制支撑侧串并联机构带动线激光传感器进行平移运动, 完成对标准

球的多次测量。测量过程中支撑侧末端坐标系到机床基坐标系的旋转矩阵 ${}^B E R_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为定值, 可以表示为

$${}^B E R_1 = {}^B E R_2 = \dots = {}^B E R_n \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)化简, 可得

$$\begin{cases} {}^S E R (P_{S1} - P_{S2}) = {}^B E R_1^{-1} ({}^B E t_2 - {}^B E t_1) \\ {}^S E R (P_{S2} - P_{S3}) = {}^B E R_1^{-1} ({}^B E t_3 - {}^B E t_2) \\ \vdots \\ {}^S E R (P_{S(n-1)} - P_{Sn}) = {}^B E R_1^{-1} ({}^B E t_n - {}^B E t_{n-1}) \end{cases} \quad (12)$$

旋转矩阵 ${}^B E R$ 共有 9 个参数, 为待求未知量。每 2 次测量可建立 3 个等式, 进行 4 次不同位置的测量即可解算出 ${}^B E R$ 。但这种解法不仅误差大, 而且忽略了旋转矩阵内部参数的约束, 故采用条件约束的最优化方法解算旋转矩阵。求解旋转矩阵最优解建立的优化模型可以表示为

$$\begin{cases} f_{rot} = \min \sum_{i=1}^{n-1} |{}^S E R (P_{Si} - P_{S(i+1)}) - {}^B E R_1^{-1} ({}^B E t_{i+1} - {}^B E t_i)| \\ \text{s.t. } {}^S E R {}^S E R^T = I \\ \det({}^S E R) = 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $n (n > 4)$ 为求解旋转矩阵时的测量次数; ${}^S E R^T$ 为 ${}^S E R$ 的转置; I 为单位阵; \det 为矩阵的秩。

2.1.2 球心坐标求取方法

线激光任意角度下激光面与标准球的截面线为圆, 且截面线圆心 O' 和球心 O 连线, 截面圆的半径 r 与球的半径 R 组成了直角三角形, 利用这一特性, 可先获得线激光测量坐标系下截面圆的圆心坐标, 然后获得球心在线激光测量坐标系的坐标。假设线激光打在标准球上形成一段圆弧, 该圆弧上点坐标即为线激光传感器的读数, 利用最小二乘法将这些点拟合为圆, 所得圆的方程可表示为

$$(x-a)^2 + (z-b)^2 = r^2 \quad (14)$$

式中, a 和 b 分别对应拟合圆圆心在传感器坐标系下的 X_S 轴和 Z_S 轴的坐标。

如图2所示,由球体几何特征可知,直线 OO' 垂直于线激光光平面,故标准球球心在线激光测量坐标系下坐标的绝对值是 $|OO'|$,球心在线激光测量坐标系下 Y 轴正向时坐标为正值,否则为负,需要肉眼判断并记录,在求解过程中要注意正负号,则球心坐标公式为

$$\begin{cases} x_s = a \\ y_s = \pm\sqrt{R^2 - r^2} \\ z_s = b \end{cases} \quad (15)$$

2.2 线激光传感器空间位置标定

设装夹完标准球的刀长为 L_1 ,该值可通过对刀仪获取;将标准球固定于加工侧主轴后,定义标准球表面与主轴轴线之间的圆跳动为 δ ,该跳动值可通过千分表测量得到。考虑标准球半径 R ,则标准球球心与加工侧坐标间偏差 $\Delta=[0, -\delta/2, -L_1+R]^T$ 。旋转主轴至圆跳动方向与机床 Y 轴平行的位置后,移动主轴至标准球进入线激光测量范围,并记录此时加工侧的坐标 $P_C=[X_1, Y_1, Z_1]^T$,则球心真值坐标 P_{Br} 可表示为

$$P_{Br} = P_C + \Delta \quad (16)$$

将支撑侧 A_2, B_2 角调成 0 ,然后平移机床并对标准球进行测量,利用前述步骤获取的 E_sR ,给定 ${}^E_s t$ 一个初值 0 ,将表征标准球球面的点云数据从线激光测量坐标系转换到机床坐标系下,获取标准球表面的点云数据并对其进行滤波处理,利用最小二

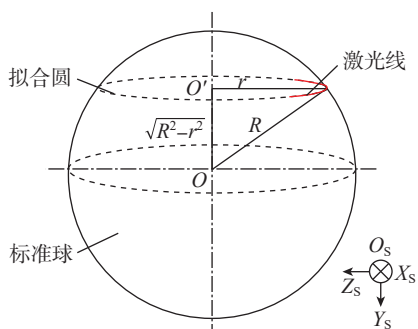


图2 标准球球心定位方法

Fig.2 Standard spherical center positioning method

乘法或RANSAC算法将点云数据拟合成球,获取其球心坐标并获取拟合误差,取误差较小的拟合结果作为球心坐标。

$$P'_B = \text{Ball}_{\text{Center}} \{ [{}^B_E R ({}^E_s R P_{Si} + {}^E_s t) + {}^B_E t_i] \} \quad (17)$$

$i=1, 2, \dots, n$

与前述步骤中获得的球心坐标真值比较,并作差,可获得线激光测量坐标系与末端坐标系原点间的偏差,即

$${}^E_s t = {}^B_E R^{-1} (P_{Br} - P'_B) \quad (18)$$

由此获得了表征线激光安装位姿的旋转矩阵与平移矩阵。

3 试验验证与分析

3.1 标定试验

3.1.1 标定试验装置

为验证所提标定方法的有效性,利用镜像加工设备进行线激光安装位姿标定试验,试验设备如图3所示,设备由加工侧与支撑侧两侧组成,单侧五轴联动。其中,加工侧为五轴龙门铣床,有 X_1, Y_1, Z_1, A_1, C_1 5个轴,刀头处额外增加 W 轴用以调整法向进给,由中国航空制造技术研究院研制;支撑侧为七轴的串并联混联机构,由转台、横向导轨、斜向导轨、水平导轨与一个三轴并联机构组成,运动学正解后有虚轴坐标 $X_2, Y_2,$

Z_2, A_2, B_2 ,由清华大学研制。在镜像加工过程中,刀具和支撑头分别位于工件两侧,支撑头矢量垂直于工件表面,刀具矢量和支撑头矢量始终保持反向共线,两侧刀位点之间的距离即为剩余壁厚,如图4所示。

并联支撑机构的位姿精度如表1和表2所示。线激光传感器采用

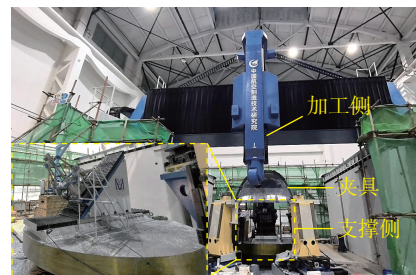


图3 镜像加工设备

Fig.3 Mirror milling equipment

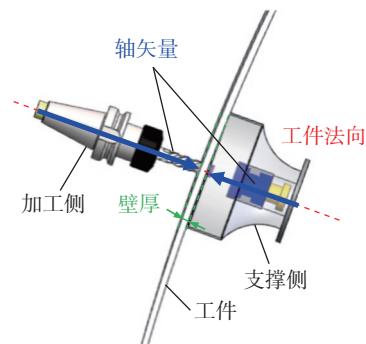


图4 镜像加工约束关系

Fig.4 Mirror milling constraints

表1 并联支撑机构位置准确度和重复性检验结果

Table 1 Position accuracy and repeatability test results of parallel support mechanism

| 序号 | 检验项目 | 允差/mm | 实测值(Max)/mm |
|----|---------------------------------------|-------|-------------|
| 1 | 位置准确度 AP_p (负载0 kg, 速度0.008 m/s) | 0.05 | 0.018 |
| 2 | 位置重复性 RP_1 (负载0 kg, 速度0.008 m/s) | 0.02 | 0.008 |

表2 并联支撑机构姿态准确度和重复性检验结果

Table 2 Pose accuracy and repeatability test results of parallel support mechanism

| 序号 | 检验项目 | 允差/(°) | 实测值(Max)/(°) |
|----|---------------------------------------|--------|--------------|
| 1 | 姿态准确度 AP_A (负载0 kg, 速度0.008 m/s) | 0.05 | 0.029 |
| 2 | 姿态重复性 RP_A (负载0 kg, 速度0.008 m/s) | 0.02 | 0.012 |

基恩士 LJ-X8080 型,基准距离光源处 73 mm,高度测量范围在基准处 ± 20.5 mm,宽度测量范围在 35 mm 内,数据间隔为 12.5 μm 。标准球采用蔡司陶瓷标准球,直径 29.9869 mm、圆度 0.047 μm 。将标准球通过筒夹安装到加工侧主轴上,如图 5 所示。

3.1.2 旋转矩阵标定试验

将线激光测量坐标系轴线与机床支撑侧末端坐标系轴线尽可能平行安装,之后控制机床沿 XYZ 轴平移对标准球进行多次测量。每次测量后分别记录线激光原始数据、机床坐标数据及球心在线激光测量坐标系下 Y 的正负。试验获得的数据如表 3 所示。

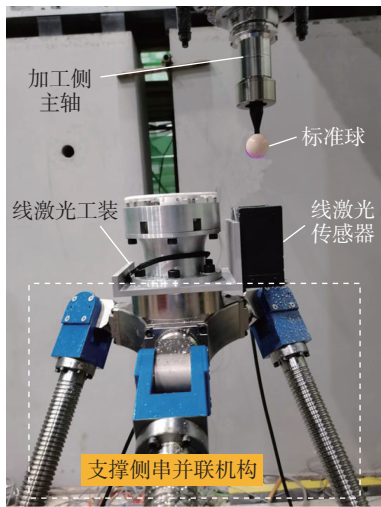


图 5 标定试验装置

Fig.5 Calibration experimental setup

表 3 旋转矩阵标定试验数据

Table 3 Rotation matrix calibration experimental data mm

| 组别 | X_2 | Y_2 | Z_2 | A_2 | B_2 | P_{sx} | P_{sy} | P_{sz} |
|----|---------|-----------|-----------|-------|-------|----------|----------|----------|
| 1 | -0.0003 | 1584.9940 | 1631.5457 | 0 | 0 | 0.256 | 0.308 | 0.349 |
| 2 | 0 | 1580.7240 | 1631.5457 | 0 | 0 | 0.436 | 2.131 | 2.061 |
| 3 | 0.0006 | 1577.1240 | 1631.5457 | 0 | 0 | -2.789 | -2.858 | -12.737 |
| 4 | -0.0003 | 1569.3940 | 1631.5457 | 0 | 0 | -8.492 | -4.996 | 2.993 |
| 5 | 1.9094 | 1580.4940 | 1630.1857 | 0 | 0 | -8.142 | -13.658 | -7.350 |
| 6 | 1.9098 | 1586.0440 | 1630.1857 | 0 | 0 | -13.873 | -6.329 | -6.293 |
| 7 | -3.1904 | 1579.3640 | 1628.2957 | 0 | 0 | -6.234 | -6.217 | -7.656 |
| 8 | -3.1901 | 1585.9340 | 1628.2957 | 0 | 0 | -7.709 | -9.537 | -9.607 |

利用式 (14) 拟合出线激光平面与标准球截交所得圆的圆心在线激光测量坐标系下的坐标,再利用式 (15) 将球心在线激光测量坐标系下的坐标求取出来,通过记录的机床数据获取 $\{O_E: X_E, Y_E, Z_E\} \rightarrow \{O_B: X_B, Y_B, Z_B\}$ 的旋转矩阵 ${}^B_E R_i$ 和 $\{O_E: X_E, Y_E, Z_E\} \rightarrow \{O_B: X_B, Y_B, Z_B\}$ 的平移矩阵 ${}^B_E t_i$,由于支撑末端坐标系没有改变姿态,因此 ${}^B_E R_1 = {}^B_E R_2 = \dots = {}^B_E R_n$ 。利用式 (13) 建立表征线激光安装姿态的旋转矩阵求解方程。

由表 3 数据可获得旋转矩阵

$${}^E_S R = \begin{bmatrix} 0.01208 & 0.99989 & 0.00831 \\ -0.99993 & 0.01207 & 0.00204 \\ 0.00194 & -0.00833 & 0.99996 \end{bmatrix} \quad (19)$$

3.1.3 平移矩阵标定试验

将支撑侧 A_2 、 B_2 角调成 0,此时支撑侧末端坐标系轴线与机床基坐标系轴线重合,然后沿垂直于线激光光平面的轴方向移动,如图 6 所示。

每隔单位时间对标准球进行测量并保存线激光数据与机床数据,保存的数据如表 4 所示。

利用前述步骤获取的 ${}^E_S R$,默认 ${}^E_S t$ 为 0,将表征标准球球面的点云数据从线激光测量坐标系转换到机床基坐标系下,获取标准球表面的点云数据并对其进行滤波处理,利用最小二乘法或 RANSAC 算法将点云数据拟合成球,拟合结果如图 7 所示。

获取其球心坐标及拟合误差,取误差较小的拟合结果作为球心坐标,利用表 4 的试验数据可得拟合球心坐标 $P'_B = [-0.414025, 1572.206803, 1637.761930]^T$ 。读取机床加工侧坐标 $P_1 = [114.413, 1519.422, 1841.114]^T$,获得标准球的刀长为 168.3869 mm,圆跳动 δ 为 0.05 mm,利用式 (16) 获取的球心真值坐标为 $P_{Br} = [114.41300, 1519.39700, 1687.72055]^T$ 。由式 (18) 可得平移矩阵 ${}^E_S t = [-52.8098, 114.8270, -50.9586]^T$ 。由此获得了表征线激光安装位姿的旋转矩阵与平移矩阵。

3.2 标定精度验证试验

多次对标准球表面测量,利用球心求取公式获取球心在线激光测量坐标系下的坐标,所得数据如表 5 所示。

在不同位置测量了 18 组数据,利用式 (8) 及计算得来的旋转矩阵与平移矩阵将表 5 中线激光测量坐标系下的球心坐标转换到机床基坐

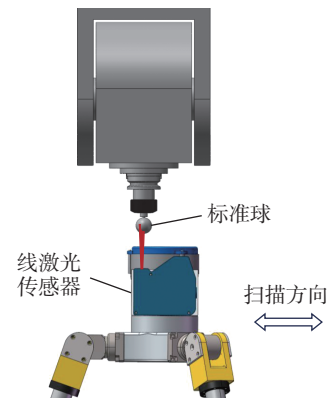


图 6 标准球表面扫描

Fig.6 Standard sphere surface scanning

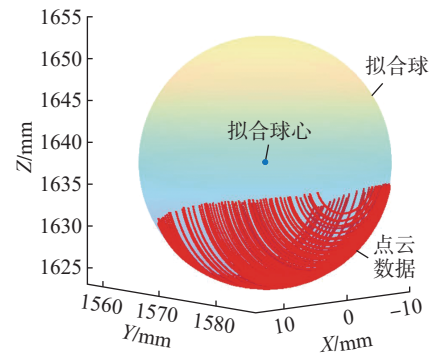


图 7 标准球球心拟合

Fig.7 Standard spherical center fitting

标系下,以球心坐标真值 P_{Br} 为比较基准,以检验标定精度。

采用传统手眼标定法^[7]与本方法进行对比。传统手眼标定法无须获取球心真值坐标,只须确保球心坐标在机床基坐标系下不变,在标定过程中须改变串并联机构的位姿,同时获取线激光与对应机床数据,依据标准球心在机床基坐标系下不变建立等式并求取表征线激光安装位姿的旋转与平移矩阵。试验可得

$${}^E_S R_2 = \begin{bmatrix} -0.0739 & 0.9972 & 0.0116 \\ -0.9973 & -0.0739 & 0.0036 \\ 0.0045 & -0.0112 & 0.9999 \end{bmatrix} \quad (20)$$

在获取旋转与平移矩阵之后,以不同姿态多采取几组线激光数据与对应的机床数据,求取球心在线激光测量坐标系下坐标并将其转换到机床基坐标系下后求取均值,以此为基准对标定结果进行验证。

所提方法 M1 与传统方法 M2 在 X、Y、Z 3 个方向的标定误差如表 6 所示,其中, E_{max} 、 E_{min} 、 E_{mean} 分别代表将线激光测量坐标系下的球心坐标转换到机床基坐标系下后在 X、Y、Z 3 个方向上与基准的差值的最大值、最小值、均值。对比可知,相较于需要频繁改变串并联机构姿态的传统标定方法,所提方法沿 X、Y、Z 3 个方向的标定误差分别降低了 88.9%、83.6%、82.1%,精度有较大提升。

4 结论

针对串并联机床在改变姿态时易产生较大定位误差的问题,提出了求解表征线激光安装姿态的旋转矩阵的优化目标函数,建立了表征线激光安装位置的平移矩阵的求取模型,提出的方法无须改变机床姿态即可获得表征线激光安装位姿的旋转与平移矩阵,完成线激光的标定。本文主要结论如下。

(1) 提出了求解表征线激光安装姿态的旋转矩阵的优化目标函数,

表 4 部分球心拟合试验数据

Table 4 Partial spherical center fitting experimental data mm

| 组别 | X_2 | Y_2 | Z_2 | A_2 | B_2 | Laser X | Laser Z |
|----|----------|----------|-----------|-------|-------|---------|---------|
| 1 | -3.19161 | 1583.664 | 1628.2957 | 0 | 0 | -7.3375 | -4.0654 |
| | | | | | | -7.3250 | -4.0374 |
| | | | | | | -7.3125 | -4.0034 |
| | | | | | | -7.3000 | -3.9528 |
| | | | | | | ⋮ | ⋮ |
| 2 | -3.18956 | 1582.784 | 1628.2957 | 0 | 0 | -8.1000 | -4.0838 |
| | | | | | | -8.0875 | -4.0484 |
| | | | | | | -8.0750 | -4.0130 |
| | | | | | | -8.0625 | -3.9850 |
| | | | | | | ⋮ | ⋮ |
| 3 | -3.18872 | 1582.364 | 1628.2957 | 0 | 0 | -8.5500 | -4.0120 |
| | | | | | | -8.5375 | -3.9548 |
| | | | | | | -8.5250 | -3.9078 |
| | | | | | | -8.5125 | -3.8664 |
| | | | | | | ⋮ | ⋮ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | |

表 5 部分标定精度检测试验数据

Table 5 Partial calibration accuracy verification experimental data mm

| 组别 | X_2 | Y_2 | Z_2 | A_2 | B_2 | P_{Sx} | P_{Sy} | P_{Sz} |
|----|----------|----------|-----------|-------|-------|----------|----------|----------|
| 1 | -0.00028 | 1584.994 | 1631.5457 | 0 | 0 | 0.256 | -12.737 | -6.329 |
| 2 | -0.00028 | 1584.504 | 1631.5457 | 0 | 0 | 0.262 | -12.249 | -6.325 |
| 3 | -0.00028 | 1584.164 | 1631.5457 | 0 | 0 | 0.268 | -11.911 | -6.321 |
| 4 | 0.00055 | 1583.854 | 1631.5457 | 0 | 0 | 0.271 | -11.601 | -6.321 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

表 6 标定精度检验分析

Table 6 Calibration accuracy verification analysis mm

| 方向 | E_{max} | | E_{min} | | E_{mean} | |
|----|-----------|--------|-----------|--------|------------|--------|
| | M1 | M2 | M1 | M2 | M1 | M2 |
| X | 0.0209 | 0.1324 | 0.0063 | 0.0314 | 0.0103 | 0.0925 |
| Y | 0.0892 | 0.2552 | 0.0016 | 0.1581 | 0.0371 | 0.2262 |
| Z | 0.0221 | 0.1185 | 0.0024 | 0.0173 | 0.0140 | 0.0781 |

基于标准球表面点云数据拟合的球心建立了平移矩阵的求取模型。

(2) 开展了标定误差检验试验,试验结果表明,与传统手眼标定方法相比,所提方法沿 X、Y、Z 3 个方向的标定误差分别降低了 88.9%、83.6%、82.1%。

参考文献

[1] 李文龙,王刚,田亚明,等. 在机测量

技术与工程应用研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(5): 14-35.

LI Wenlong, WANG Gang, TIAN Yaming, et al. Research progress of on-machine measurement technology and its engineering applications[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(5): 14-35.

[2] 王平江,雷宇晴,邹尚波,等. 在机测量技术现状与发展趋势[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(7): 1-4.

WANG Pingjiang, LEI Yuqing, ZOU Shangbo, et al. Status and development trend of

on-machine measurement technology[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2015(7): 1-4.

[3] 张建明, 罗松保, 庞长涛, 等. 现代机床在机测量技术研究与发展趋势[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(9): 43-49.

ZHANG Jianming, LUO Songbao, PANG Changtao, et al. Research and development trends of on-machine measurement technology on modern machine tools[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(9): 43-49.

[4] CHONG Z H, XIE F G, LIU X J, et al. Design of the parallel mechanism for a hybrid mobile robot in wind turbine blades polishing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 61: 101857.

[5] 李铁民, 张京雷, 李逢春. 并联机床的运动学标定[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(6): 41-46.

LI Tiemin, ZHANG Jinglei, LI Fengchun. Kinematic calibration of parallel kinematic machine tool[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(6): 41-46.

[6] 曹冬旺, 郝卫东, 杨道国. 线激光视觉测量机器人手眼标定方法研究[J]. *机床与液压*, 2020, 48(21): 31-35.

CAO Dongwang, HAO Weidong, YANG

Daoguo. Research of hand-eye calibration method for line laser vision measurement robot[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2020, 48(21): 31-35.

[7] 王英男, 戴曙光. 线激光器的手眼标定方法[J]. *电子科技*, 2015, 28(7): 183-185.

WANG Yingnan, DAI Shuguang. Research on the line laser hand-eye calibration method[J]. *Electronic Science and Technology*, 2015, 28(7): 183-185.

[8] ZHANG S, DUAN X, ZENG C, et al. Pose calibration for 2D laser profiler integrated in five-axis machine tools[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 831(1): 012022.

[9] 林玉莹, 穆平安. 基于标准球的机器人手眼标定方法改进研究[J]. *软件导刊*, 2019, 18(5): 41-43, 48.

LIN Yuying, MU Ping'an. An improved hand-eye calibration method for robot based on standard ball[J]. *Software Guide*, 2019, 18(5): 41-43, 48.

[10] 李津容, 葛广言, 冯晓冰, 等. 在机测量线激光传感器安装位姿的全局标定[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(9): 158-165.

LI Jinrong, GE Guangyan, FENG Xiaobing, et al. Global position calibration of 2D laser profiler for on-machine measurement[J]. *Chinese*

Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 158-165.

[11] 叶柳康, 叶文华, 杨高杰, 等. 线激光传感器测量系统的安装姿态标定方法[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2022(7): 122-126.

YE Liukang, YE Wenhua, YANG Gaojie, et al. Calibration method for installation attitude of line laser sensor measurement system[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2022(7): 122-126.

[12] 王宇晗, 钟磊, 汪洪彬, 等. 基于标准球的机床线激光标定方法及系统: CN116734730A[P]. 2023-09-12.

WANG Yuhan, ZHONG Lei, WANG Hongbin, et al. Machine tool line laser calibration method and system based on standard sphere: CN116734730A[P]. 2023-09-12.

[13] CHEN J K, XIE F G, LIU X J, et al. Elasto-geometrical calibration of a hybrid mobile robot considering gravity deformation and stiffness parameter errors[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2023, 79: 102437.

通信作者: 薄其乐, 工程师, 博士, 研究方向为大型薄壁件镜像加工、加工稳定性监测与诊断、测量-加工一体化。

High-Precision Line Laser Installation Pose Calibration Method for Serial-Parallel Mirror Milling Equipment

LIU Haibo¹, LI Wenjie¹, DING Yue², WANG Pengfei¹, LIANG Run¹, BO Qile¹, XIE Fugui³,
XIAO Shihong²

(1. State Key Laboratory of High-Performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

3. State Key Laboratory of Tribology, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[ABSTRACT] A calibration method for the installation pose of a line laser sensor suitable for serial-parallel machine tools is proposed to address the challenge of accurate pose calibration. Based on the characteristics of standard spheres to calculate the spherical center coordinates, an equation was established using the invariance of the sphere center, and a target function for calculating the rotation matrix was proposed. Point cloud data from the surface of the standard sphere was scanned, and the spherical center was fitted. A model for computing the translation matrix was developed by comparing the fitted center with the true center coordinates. Compared with a traditional hand-eye calibration method, the calibration errors of the proposed method in the X , Y , and Z directions have been reduced by 88.9%, 83.6%, and 82.1%, respectively. This method eliminates the need to alter the pose of the serial-parallel mechanism, effectively mitigating the impact of positioning errors on pose calibration, thus significantly enhancing calibration accuracy.

Keywords: Serial-parallel machine tool; Standard sphere; Line laser sensor; Pose calibration; Measure-machining integration

(责编 青燕)