

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209786

在机测量线激光传感器安装位姿的全局标定*

李津容,葛广言,冯晓冰,杜正春

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

摘要:针对三轴数控机床激光测头安装位姿误差造成测量误差且不易调整和校准的问题,提出了一种在机测量线激光传感器安装位姿标定方法。建立了线激光在机测量系统的数学模型,通过机床运动带动线激光测头对标定基准点的空间位置进行测量,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。考虑了机床定位误差对于标定结果精度的影响,采用蒙特卡洛模拟进行了误差分析。采用半径为35 mm的圆孔进行测量验证,实验结果表明,标定后圆孔测量误差为0.051 6 mm,测量精度提高了约96%,实验结果验证了该标定方法的有效性和可行性。

关键词:在机测量;线激光;测头标定;手眼标定

中图分类号: TH74 TN249 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Global position calibration of 2D laser profiler for on-machine measurement

Li Jinrong, Ge Guangyan, Feng Xiaobing, Du Zhengchun

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The installation pose error of the laser probe mounted on a three-axis CNC machine tool is not easy to adjust, which may result in measurement error. In this article, a posture calibration method of the laser probe for on-machine measurement (OMM) is proposed. A mathematical model based on the laser line profiler for OMM is formulated, the spatial pose of the calibration reference point is measured by the laser probe, and the linear algorithm to obtain the pose parameters of the probe installation is derived based on the hand-eye calibration. Considering the influence of the positioning errors of the machine tool on the accuracy of the calibration, an error analysis is implemented by using Monte Carlo simulation. Experimental results show that when measuring a circular hole with a radius of 35 mm, the measurement error of the circular hole after calibration is 0.051 6 mm, and the measurement accuracy is improved by approximately 96%, which validate the effectiveness and feasibility of the proposed calibration method.

Keywords: on-machine measurement; 2D laser profiler; probe calibration; hand-eye calibration

0 引 言

传统的三坐标离线测量方式存在着工件反复装夹易引入误差、降低加工效率等缺点,并不适用于零件加工过程中的几何尺寸精度测量和误差实时修正^[1-2]。随着工业测量技术的发展,以测头和加工中心相结合为代表的在机测量方式越来越常见^[3-4]。常见的接触式探针测头只能进行逐点接触测量,而激光测头具有测量速度快、无需半径补偿、无接触测量等优点,因而被广泛应用于各个领域^[5-6]。

当内部参数已经过校准的激光测头装夹在机床主轴上,难免存在测头安装误差,影响测量精度,因此需要对激光测头安装位姿误差进行标定。对于点激光的标定, Bi等^[7]采用球面约束,结合CMM高精度的等距位移对于球面进行测量建立超静定非线性方程组,求解最优解,得到点激光的光束矢量,但非线性方程求解难度大,容易受到初值的影响。张丽艳等^[8]建立了五轴机床的在机测量原型,采用多位姿对参考球进行扫描拟合球心,建立线性方程求解标定参数,避免非线性求解的不稳定。

与点激光相比,线激光相当于一排点激光的阵列集成,比点激光多一个维度的信息,针对线激光的位姿标定方法可参考点激光的标定原理而同时利用线激光本身的测量特点来进行。Zhang 等^[9]利用一个特定标定件的平面和圆孔特征对于线激光的安装误差进行标定,通过调整转台旋转角度分步校准线激光的激光平面偏角。徐淑婷^[10]借助一个阶梯标定块对安装在三轴机床的线激光安装位姿进行了标定,并通过可微调夹具进行角度校准。Joung 等^[11]依据线激光测量圆孔的特征(如弦长和弦的中点)变化,以单点匹配的方式分步实现测头位姿自主校正。曹新航^[12]分析了利用球面约束进行标定的方法的缺点,并提出了基于平面和参考球分步标定的改进方法,借助机床探头辅助,减少了待求解方程的复杂度。

上述方法都完成了对激光传感器安装位姿的标定,但大多依赖于旋转运动装置实现传感器多位姿调整测量,亦或是需分步完成标定过程,影响标定效率。本文针对三轴数控机床建立了基于线激光在机测量系统的数学模型,提出一种线激光传感器安装误差线性标定方法,通过机床带动测头对多圆孔平面标定件进行扫描,根据线激光测量数据和机床坐标信息拟合圆心,基于手眼标定原理,以圆孔圆心作为匹配点对,求解传感器安装位姿参数。该方法具有如下优点:

- 1) 能够一次性整体标定出传感器的安装位置误差和姿态误差,提高标定效率,且无需考虑未知标定参数之间的相互影响,有利于保证标定精度。
- 2) 通过建立线性方程进行求解标定参数,避免了以球面约束为代表的非线性方程求解中依赖初值、参数冗余等问题,降低了标定算法复杂程度。
- 3) 采用简单的平面圆孔特征而无需利用标准球等高精度量具,降低了标定成本,提高了标定方法的普适性。

1 线激光在机测量模型

线激光测头能够实现一次性对工件表面的多点采样,是非常理想的在机测量执行终端,其基本测量原理为激光三角法,如图 1 所示,当光源发射激光到测量物体表面,不同位置反射回来的光束会在图像接收传感器上形成光条图像,利用三角关系计算前后像点位置关系,从而精确获取被测物体表面到激光测头的深度变化信息^[13]。

本文以三轴立式数控铣床为例,作为在机测量系统运动平台阐述本文方法的测量系统模型与标定方法,如图 2 所示,线激光传感器通过一个专用装夹机构固定在机床旋转主轴末端,并将主轴锁死。理想情况下,线激光传感器局部坐标系应该与机床主轴坐标系平行,线激光局部坐标系零点位置应该在机床 Z 轴轴线上。但实际情

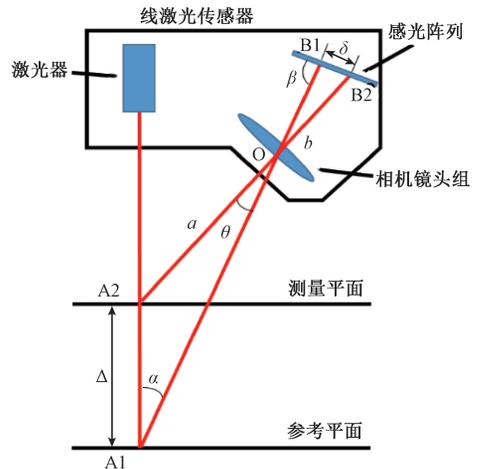


图 1 线激光测量原理示意图

Fig. 1 Measurement principle of line laser sensor

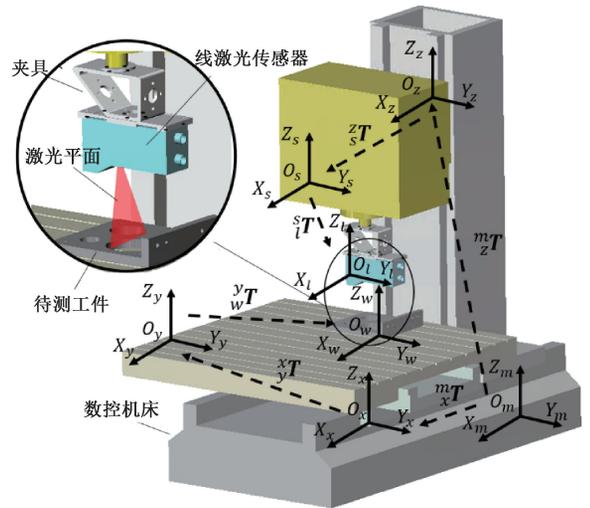


图 2 在机测量系统坐标系

Fig. 2 The coordinate systems of the on-machine measurement system

况下,由于安装误差的存在以及主轴转角无法精确控制的问题,激光传感器局部坐标系与相邻的主轴坐标系并不平行,需要对测头安装位姿进行标定。

首先建立线激光在机测量系统的测量模型,定义各个坐标系,并且各坐标系均满足右手定则。

1) 机床世界坐标系 MCS ,该坐标系以数控机床的各轴的光栅尺绝对零点位置为原点,三轴方向和尺度分别与机床的 X 、 Y 、 Z 各轴平行且一致。

2) 线激光传感器局部坐标系 LCS ,该坐标系以线激光测量中心为原点,以激光平面线高方向为 X_L 轴,以激光平面线长方向为 Z_L 轴,以垂直于激光平面方向为 Y_L 轴。

3) 工件坐标系 WCS , 该坐标系以工件特征而定义原点, 3轴方向和尺度分别与机床的 X, Y, Z 各轴平行且一致。

4) 各轴坐标系, 其坐标系原点都位于各自运动轴上, 三轴方向和尺度分别与机床的 X, Y, Z 各轴平行且一致。

若想得到在工件坐标系下的某一点在传感器坐标系下的坐标, 需要对 WCS 到 LCS 进行齐次坐标系转换推导。设从工件坐标系 WCS 到传感器坐标系 LCS 的总变换矩阵为 ${}^w T_l$, 根据运动链关系有:

$${}^w T_l = {}^w T_y {}^y T_x {}^x T_m {}^m T_z {}^z T_s {}^s T_l \quad (1)$$

$$\text{式中: } {}^w T_y {}^y T_x {}^x T_m {}^m T_z {}^z T_s {}^s T_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_m \\ 0 & 1 & 0 & y_m \\ 0 & 0 & 1 & z_m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^s T_l = I; {}^s T_l =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

其中, 机床坐标读数为 (x_m, y_m, z_m) , \mathbf{T} 和 \mathbf{R} 分别表示坐标变换的平移矩阵和旋转矩阵。假设在 LCS 下测得工件表面一点的坐标 \mathbf{P}_l , 通过齐次坐标转换原理可知该点在 WCS 下的坐标 \mathbf{P}_w 为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_w \\ 1 \end{bmatrix} = {}^w T_l \begin{bmatrix} \mathbf{P}_l \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2 线激光安装位姿标定

将测头模型简化, 如图3所示, $(\delta x, \delta y, \delta z)$ 和 (α, β, γ) 分别表示传感器的安装位置和角度。若已知空间某一点分别在参考坐标系和测量坐标系下的坐标, 则这两对坐标称为一个点对。可以看出, 两个坐标系之间的空间变换矩阵包含沿着 X, Y, Z 这3个轴的平移和绕着3个轴的旋转等6个独立信息, 一般来说需要至少匹配3个点对才能计算出上述6个位姿参数。

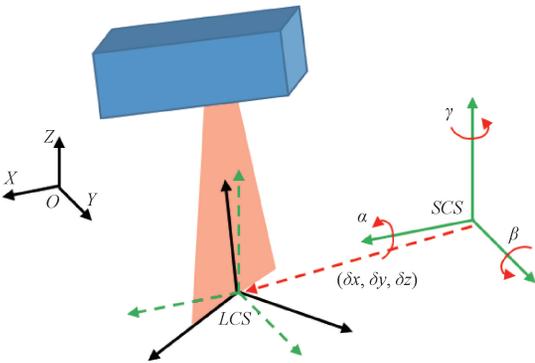


图3 测头安装位姿定义

Fig. 3 Pose deviation definition of probe

根据式(2)推导可得到坐标系 LCS 与 WCS 之间的坐标变换公式:

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \mathbf{R} \mathbf{P}_l + \mathbf{T} + \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, (x_w, y_w, z_w) 表示 WCS 下被测点的坐标 \mathbf{P}_w , LCS 下被测点坐标 \mathbf{P}_l 可表示为 $(x_l, 0, z_l)$, 平移矩阵 \mathbf{T} 可表示为安装位置 $(\delta x, \delta y, \delta z)$ 。根据齐次坐标变换原理, 旋转矩阵 \mathbf{R} 可按照定轴旋转过程顺序表示为3个通用旋转矩阵:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\gamma) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_x(\alpha) \quad (4)$$

其中, $\mathbf{R}_z(\gamma)$ 、 $\mathbf{R}_y(\beta)$ 、 $\mathbf{R}_x(\alpha)$ 分别表示从坐标系 WCS 变换到 LCS 中绕 Z 轴旋转角度 γ 、绕 Y 轴旋转角度 β 、绕 X 轴旋转角度 α 的旋转变换矩阵^[14]。将旋转矩阵的标准形式等各表达式代入式(3)计算并整理可得:

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = x_l \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} + z_l \begin{bmatrix} l' \\ m' \\ n' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $(l, m, n) = (\cos \gamma \cos \beta, \sin \gamma \cos \beta, -\sin \beta)$; $(l', m', n') = ((\cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha), (\sin \gamma \sin \beta \cos \alpha - \sin \alpha \cos \gamma), \cos \beta \cos \alpha)$ 。

故对线激光旋转矩阵的标定可以转化为对于上述两个方向向量的标定, 整理成 $\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B}$ 的形式则有:

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_l & 0 & 0 & z_l & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & x_m \\ 0 & x_l & 0 & 0 & z_l & 0 & 0 & 1 & 0 & y_m \\ 0 & 0 & x_l & 0 & 0 & z_l & 0 & 0 & 1 & z_m \end{bmatrix} \cdot \mathbf{S} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{S} = [l \ m \ n \ l' \ m' \ n' \ \delta x \ \delta y \ \delta z \ 1]^T$, 其中存在9个未知数, 因而测量3个或以上点对的坐标便可以建立9个或以上的线性方程组, 通过最小二乘法求解平移矩阵、旋转矩阵的各个分量。

3 机床定位精度对标定的影响

在机测量系统中, 传感器由机床运动轴带动至不同位置进行测量, 机床运动轴的定位误差可能会对测量精度产生影响。假设机床 X, Y, Z 三轴的定位误差为 $[\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T$, 此时对于空间一点 P 的实际求解位置为 P' , 由式(3)可知 P' 的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x'_w \\ y'_w \\ z'_w \end{bmatrix} = \mathbf{R} \mathbf{P}_l + \mathbf{T} + \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (7)$$

即对空间中一点 P 的测量误差为:

$$\begin{bmatrix} x'_w \\ y'_w \\ z'_w \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (8)$$

机床移动轴的定位误差会造成不同测量点距离理论点的非一致刚性偏移,对于标定参考点造成的测量误差会影响标定方程求解精度,对此模拟分析机床定位误差对标定精度的影响。

如图4所示,在机测量系统的测量空间大小取决于机床 X 、 Y 、 Z 轴的行程范围,模拟对空间中已知坐标的一组参考点 (A 、 B 、 C 、 D) 进行测量,预设传感器测量数值和传感器安装位姿参数,根据式(5)建立标定方程可求解出测量时传感器所在位置对应的理想机床坐标值,再考虑机床定位误差和传感器测量误差,重新求解安装位姿参数,对比求解结果与预设初值。

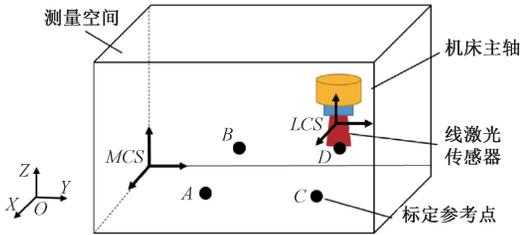


图4 标定模拟示意图

Fig. 4 Simulation diagram of probe calibration

对参考点进行依次测量时,机床运动轴在不同位置的定位误差并不相同,在测量空间里随机选取不同位置的5组参考点,如图5所示,其中第1、2组参考点空间分布范围相同,且和实验情况一致,而第3、4、5组参考点空间分布范围越来越大。假设图3中线激光传感器安装位置 $(\delta x, \delta y, \delta z)$ 为 $(0, 0, 0)$, 安装角度 (α, β, γ) 为 $(0^\circ, 0^\circ, 90^\circ)$, 对应的标定参数初值 (l, m, n, l', m', n') 为 $(0, 1, 0, 0, 0, 1)$, 对这5组参考点进行模拟测量。

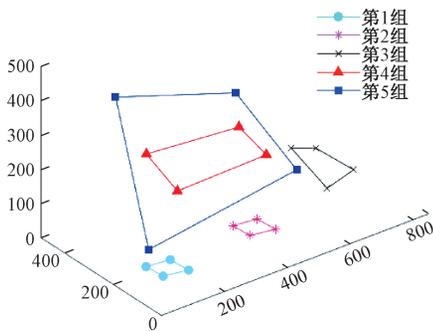


图5 标定参考点分布示意图

Fig. 5 Distribution diagram of reference points

测量时机床近似空载,机床的定位误差分布规律可在行程范围内进行线性拟合^[15-16],实验测量所用机床三轴的最大定位误差大约在 $30 \sim 50 \mu\text{m}$,为方便插值计算,模拟简化机床 X 、 Y 、 Z 轴的定位系统误差曲线如图6所示,设定三轴误差曲线斜率相同从而参考测点的位置和范围能直观反映各轴定位误差大小。

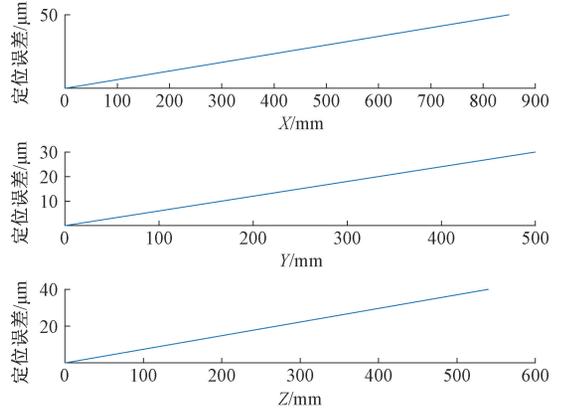


图6 机床定位系统误差模拟曲线

Fig. 6 Simulation curves of machine positioning system error

结合预设参数计算理想机床坐标数值,根据模拟的定位误差误差曲线,插值计算坐标对应位置的定位系统误差从而得到机床实际坐标值。根据实际情况,设定线激光 X 轴和 Z 轴方向的测量误差分别为 ± 0.002 和 $\pm 0.001 \mu\text{m}$,机床重复定位精度为 $\pm 3 \mu\text{m}$,对每组实际机床坐标和传感器测量数值添加对应的服从均匀分布的随机误差,带回标定方程重新求解标定参数,重复模拟1000次。

测头安装位姿的模拟求解平均误差分别如图7、8所示。对5组(图5)参考点模拟结果的误差进行分析,发现参考点测量范围越大,其相对定位误差越大,安装位姿求解误差越大。安装位置的求解误差直接反映出对应机床运动轴的绝对定位误差大小,比如第2组与第1组相比,参考点整体沿着 X 轴进行明显正向偏移,沿着 Y 轴进行了微小正向偏移,沿着 Z 轴不发生偏移,参考点 X 和 Y 坐标定位误差增大,模拟结果的误差 δx 和 δy 显然随之增大而 δz 没有变化,且3个安装角度误差相比于第1组几乎没有变化,对比3、4、5组可知,安装角度的求解误差受到参考点分布范围的影响而波动明显。此外,本文还随机选择几组近似的安装角度初值进行了模拟,结果的分布和趋势与此类似。

综合而言,测量参考点时的机床绝对定位误差大小主要影响平移矩阵的求解精度,而点与点之间的相对定位误差主要影响旋转矩阵的求解精度,因此设计标定件时应该注意尽量减小标定件的尺寸以缩短标定参考点之间的相对距离,尽量将标定件摆放至接近机床绝对坐标

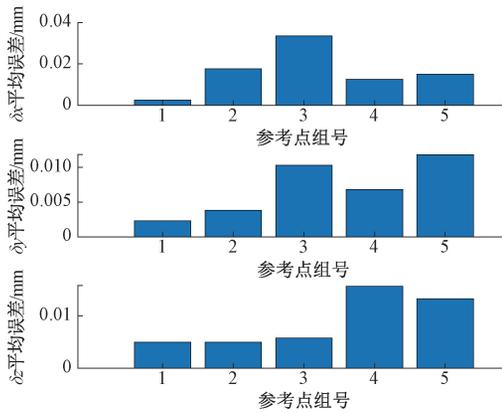


图7 安装位置平均误差

Fig. 7 Average error of position deviations

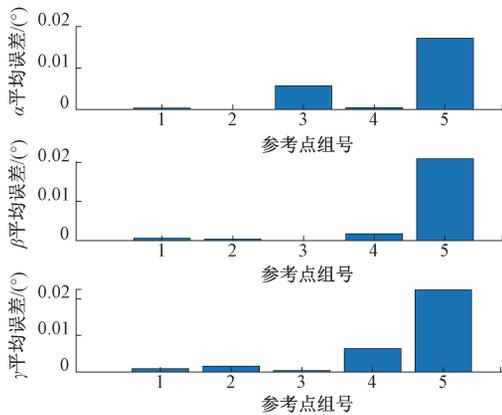


图8 安装角度平均误差

Fig. 8 Average error of orientation deviations

的零点位置,从而减小机床定位误差的影响。此外,由式(7)可知,如果平移矩阵 T 存在求解误差会使得测量点云整体产生刚性偏移但不改变点云内部点与点之间的相对位置,对于测得形状没有影响。但如果旋转矩阵 R 存在求解误差则会影响被测点之间的相对位置,改变点云的形状,故当标定时所需测量范围较大时可对机床定位误差事先进行补偿以保证良好的标定求解精度。本文后续设计了平面标定件,工件尺寸较小,参考第1组模拟结果,机床定位误差对于角度的影响不超过 0.001° ,对于平移量的影响均在微米级,因此对机床定位误差不予考虑。

4 实验

根据本文提出的测头标定原理,基于三轴数控铣床设计了在机测量的标定实验。实验选用 Gocator2330 型号线激光传感器,其相关性能参数如表 1 所示。

表1 测头相关性参数

Table 1 Main parameters of Gocator 2330 sensor

参数名称	参数值
净距离(CD)/mm	90
X轴测量范围/mm	47~85
Z轴测量范围/mm	80
Z轴可重复性/ μm	0.8
轮廓数据间隔/mm	0.044~0.075
轮廓数据点数	1 280

特设计一种4孔平面标定件,圆孔经过精密加工,三坐标测量(型号为 ZEISS O-INSPECT,最大允许误差 $MPE = (1.6 + L/200) \mu\text{m}$)结果显示圆柱度均小于 0.005 mm ,圆孔上下表面平面度小于 0.005 mm 。以 $R35$ 圆孔的圆心为原点,其余3个圆孔圆心的相对坐标以及标定件关键设计尺寸如图9所示。由于3个点足以完成标定求解,以其中3个圆孔的圆心作为匹配点对求解标定参数($R10$ 、 $R15$ 、 $R25$),剩余1个圆孔($R35$)专用于验证实验。假设传感器沿标定件 Y 轴平移扫描圆孔,当传感器移动至某一位置时,测得的弦线最长,即表示在对应位置激光平面正好穿过圆心。由于圆孔边缘可能存在毛刺、激光 X 轴分辨率低(即轮廓数据间隔距离,一般在几十至几百微米)等问题,实际通过移动传感器位置找到圆心对应的弦长较为困难,故采用扫描整圆再通过圆拟合的方式寻找圆心位置,以减小毛刺与分辨率等因素的影响。标定实验步骤如下。

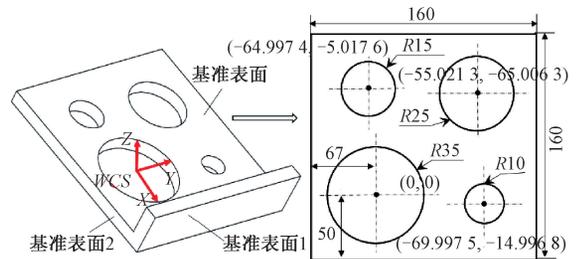


图9 标定件关键尺寸

Fig. 9 Dimensions of calibration block

1) 初始位姿调整

机床工作平台水平放置标定件,经千分表检测待测基准表面可近似看作与机床 XOY 基准面平行,继续对工件进行找正,调整标定件基准侧面2与机床 ZOY 基准面平行。将线激光传感器安装至机床主轴上,找正(尽可能使得传感器坐标系的 X 轴与机床 Y 轴平行)并锁死主轴防止测量过程发生位姿变动,如图10(a)所示。

2) 测量标定数据

依次调整机床 Y 轴和 Z 轴使得线激光传感器在不同位置沿着机床 X 轴对标定圆孔逐个进行等间距扫描, 圆孔的扫描步长大致可以按照其直径的 1/10 计算, 以保证每个圆孔获得均匀分布的 10~12 条的激光扫描线数据, 如图 10(b) 所示, 并同时记录每条激光线对应的机床坐标读数 (x_{mi}, y_{mi}, z_{mi})。

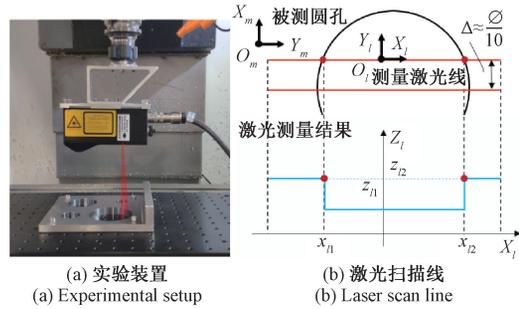


图 10 标定件扫描实验示意图

Fig. 10 Schematic diagram of scanning calibration block

3) 处理标定数据

如图 10(b) 所示, 在激光线被圆孔截断处提取边界点坐标 (x_i, z_i)。以传感器移动轴即机床 X 轴与传感器自身的 X 轴、Z 轴建立测量坐标系, 由于安装偏角的存在, 标准圆孔在此坐标系下的投影是椭圆。采用最小二乘法对边界点坐标 (x_i, z_i, x_{mi}) 进行空间平面的椭圆拟合得到圆孔圆心投影的坐标 (x_l, z_l, x_m), 如图 11 所示。

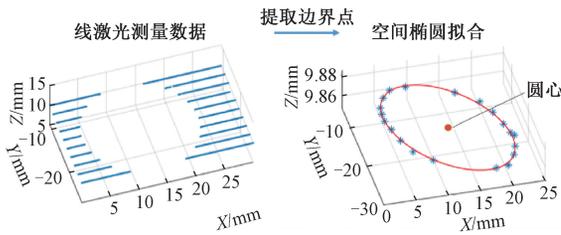


图 11 标定数据处理

Fig. 11 Data processing for calibration

4) 计算标定参数

经过步骤 3) 计算的圆孔圆心坐标信息如表 2 所示, 结合圆心的参考坐标根据式 (5) 建立标定方程, 完成对传感器安装位姿的标定。求解得到线激光安装位姿参数 ($l, m, n, l', m', n', \delta_x, \delta_y, \delta_z$) = (0.038 7, 0.999 2, -0.003 9, -0.028 2, -0.002 8, 0.999 6, 33.011 8, -0.940 7, 10.095 6)。换算成图 3 的传感器安装偏角为: (α, β, γ) = (-1.606°, 0.223 4°, 87.780 7°)。

表 2 拟合的圆心坐标

Table 2 The center coordinates of the fitted circle mm			
圆心坐标	R25	R15	R10
x_l	2.929 7	-2.069 6	12.995 6
z_l	-0.107 3	4.906 2	9.866 4
x_m	-88.122 5	-97.800 1	-18.246 8
y_m	63.000 0	-2.000 0	58.000 0
z_m	-10.000 0	-15.000 0	-20.000 0

为验证标定结果, 对 4 个圆孔重新进行平行扫描测量, 步长均为 1 mm, 将提取的圆孔边界点经过标定的变换矩阵进行坐标转换。标定前由于安装偏角的存在, 标准圆孔在线激光测量坐标系下的投影是椭圆, 其长短半轴之差表示测量识别出的圆孔与真实圆孔的接近程度, 即对该圆孔的识别精度, 长短半轴之差越小, 识别精度越高, 反映测量精度越高。

对于 4 个圆孔计算标定前后拟合的椭圆长短半轴并与三坐标测量的圆孔参考半径进行对比, 如表 3 所示。可以看出, 经过标定坐标转换后的圆孔边界点拟合的椭圆长短半轴之差 Δ' 相比于标定前 Δ 有明显减小, 而且标定后的长短半轴均十分接近对应的参考圆孔半径值, 说明标定后测量精度得到提高。对于不同尺度圆孔的测量, 标定前后测量误差减小比例均在 96% 左右, 说明本文提出的标定方法具有良好的鲁棒性。

表 3 圆孔拟合结果

Table 3 The holes fitting results

R/mm	标定前		标定后		半轴之差		$\frac{\Delta - \Delta'}{\Delta} / \%$
	长半轴 a/mm	短半轴 b/mm	长半轴 a'/mm	短半轴 b'/mm	标定前 Δ /mm	标定后 Δ' /mm	
9.998 8	10.179 5	9.815 6	9.997 2	9.987 8	0.363 9	0.009 4	97.42
14.997 1	15.307 3	14.742 1	15.014 5	15.009 5	0.565 2	0.015 0	97.34
24.999 7	25.475 4	24.566 2	25.023 0	24.993 4	0.909 2	0.029 6	96.74
34.998 9	35.645 8	34.368 1	35.020 0	34.968 4	1.277 7	0.051 6	95.96

5 结 论

本文针对三轴数控机床,搭建了基于线激光在机测量原型系统,建立了在机测头安装位姿误差的数学模型,基于手眼标定原理给出了一种对该误差模型进行快速全局标定的方法。不同于传统的线激光测头标定方法需要分步调整和校正测头安装角度误差,本文提出的标定方法只需要通过多组匹配点对,对测头的安装位姿误差一次性标定完全,无需多角度测量而规划复杂的扫描路径,提高了标定效率,并且避免了非线性标定算法的求解困难、不稳定等问题。标定所得安装误差可直接通过矩阵参数实现误差补偿,无需进行位姿调整。本文还分析并模拟了机床定位误差对于标定精度的影响,结果显示机床定位误差越大,安装位姿求解误差越大,但平移矩阵和旋转矩阵受到的影响模式不同,并基于模拟给出了标定件设计的一些建议。最后设计了标定实验,结果表明,经过标定后系统测量精度明显提高,对半径为 35 mm 的圆孔进行测量时,标定后圆孔测量误差为 0.0516 mm,测量误差减小了约 96%,验证了本文在机测量标定方法的有效性。

参考文献

- [1] 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 P J, LEI Y Q, ZOU SH B, et al. Status and development trend of on-machine measurement technology[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(7): 1-4.
- [2] 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 W L, WANG G, TIAN Y M, et al. Research progress of on-machine measurement technology and Its engineering applications[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(5):14-35.
- [3] 韩立彰,葛广言,杜正春,等. 汽车变速箱阀体加工变形的来源分析及补偿[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(2): 78-82,91.
HAN L ZH, GE G Y, DU ZH CH, et al. Source analysis and compensation of machining deformation of automobile gearbox valve body[J]. Machine Design & Research, 2021, 37(2): 78-82,91.

- [4] ZHAO ZH C, DING D W, FU Y C, et al. A hybrid approach for measurement thickness of complex structural parts using ultrasonic inspection and on-machine probing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(9-12): 4777-4785.
- [5] 董祉序,孙兴伟,刘伟军,等. 基于激光位移传感器的自由曲面精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 30-38.
DONG ZH X, SUN X W, LIU W J, et al. Precision measurement method of free-form curved surfaces based on laser displacement sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12):30-38.
- [6] 刘勇,李昆,王帼媛. 激光在机测量系统的实现[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10):2668-2675.
LIU Y, LI K, WANG G Y. Implementation of laser on-machine measuring system[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(10):2668-2675.
- [7] BI C, LIU Y, FANG J G, et al. Calibration of laser beam direction for optical coordinate measuring system[J]. Measurement, 2015, 73:191-199.
- [8] 张丽艳,夷宏明,刘胜兰. 在机测量激光测头位姿的线性标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 681-689.
ZHANG L Y, YI H M, LIU SH L. Linear calibration for on-machine measurement of laser probe pose[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(4): 681-689.
- [9] 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.
- [10] 徐淑婷. 线激光在机测量关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
XU SH T. Research on key technology of line Laser on-machine measurement[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [11] JOUNG J H, KANG T S, SHIN H H, et al. Autonomous calibration of a 2D laser displacement sensor by matching a single point on a flat structure[J]. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2014, 20(2): 218-222.
- [12] 曹新航. 基于在机测量的工件自适应加工技术研究

究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020.

CAO X H. Research on adaptive machining technology based on on-machine measurement [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

- [13] 刘博文, 陈世利, 杨毅, 等. 基于多线激光扫描的叶片轮廓快速测量系统标定方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2017, 15(6):532-537.

LIU B W, CHEN SH L, YANG Y, et al. Calibration method for fast detection system of blade profile based on multiple line laser scanning [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2017, 15(6):532-537.

- [14] 张雪峰, 徐心和. 齐次变换的数学性质及其在机器人运动学分析中的应用[J]. 机器人, 2003, 25(7):686-691.

ZHANG X F, XU X H. Characters of transformation of homogeneous coordinates and their application in the analysis of robot kinematics [J]. Robot, 2003, 25(7):686-691.

- [15] XIANG S T, ALTINTAS. Modeling and compensation of volumetric errors for five-axis machine tools [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, Research and Application, 2016, 101:65-78.

- [16] 杨赞, 朱梦瑞, 李慧敏, 等. 基于灵敏度分析的立式加工中心批量空间误差建模和补偿[J]. 机械工程学报, 2020, 56(7):204-212.

YANG Y, ZHU M R, LI H M, et al. Volumetric error modelling and compensation for batch of vertical machining centers based on sensitivity analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(7):204-212.

作者简介



李津容, 2019年于吉林大学获得学士学位, 现为上海交通大学硕士研究生, 主要研究方向为在机测量及精密测量。

E-mail: lijnrong@sjtu.edu.cn

Li Jinrong received her B. Sc. degree from Jilin University in 2019. She is currently a M. Sc. candidate at Shanghai Jiao Tong University. Her main research interests include on-machine measurement and precision measurement.



冯晓冰, 2008年于上海交通大学获得学士学位, 2014年于新加坡国立大学获得博士学位, 现为上海交通大学助理教授, 主要研究方向为智能制造与精密测量。

E-mail: xiaobing.feng@sjtu.edu.cn

Feng Xiaobing received his B. Sc. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2008, and Ph. D. degree from National University of Singapore in 2014. He is currently an assistant professor at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include intelligent manufacturing and precision measurement.



杜正春 (通信作者), 1995年于东南大学获得学士学位, 1997年于东南大学获得硕士学位, 2000年于东南大学获得博士学位, 现为上海交通大学副教授, 主要研究方向为数控机床误差测量、建模与补偿研究、精密检测与加工、计算机图像测量。

E-mail: zcdu@sjtu.edu.cn

Du Zhengchun (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Southeast University in 1995, 1997, and 2000, respectively. He is currently an associate professor at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include CNC machine tool error measurement, modeling and compensation, precision inspection and processing, computer image measurement.