

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2413312

# 基于光谱共焦原理的五轴数控机床工件在位测量系统\*

贺帅宇<sup>1</sup>, 周涛<sup>2</sup>, 金玲兴<sup>3</sup>, 荣佑民<sup>1</sup>, 刘秀峰<sup>4</sup>

(1. 华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074; 2. 四川省精密超精密加工工程技术研究中心 成都 610200;  
3. 台州市东部数控设备有限公司 台州 318000; 4. 湖北第二师范学院物理与机电工程学院 武汉 430074)

**摘要:**精密光学元件目前广泛应用于天文观测、空间对地观察、投影光刻物镜等诸多重要的领域,其具有高表面质量、高面形精度、低表面损伤等特点。光学元件精加工的最后一道工序一般为抛光,光学元件进行抛光加工时,需要经历“测量-加工”的反复迭代过程以实现纳米级面型精度和亚纳米级表面粗糙度。因此,数控抛光加工时在对工件待加工表面面型离线测量后,需要在机床上对工件进行二次安装及找正,对工件位姿进行精确定位以保证后续的加工精度,而传统的接触式找正或定位方法存在效率低下、易划伤工件表面等问题。为此,基于光谱共焦传感器构建了立式五轴机床非接触式在位测量系统,建立了该测量系统获取工件表面坐标数据的数学模型及光谱共焦传感器在机床上标定的数学模型,利用球面约束方程提出了基于标准球的补偿标定的方法,并在磁流变抛光机床上开展了实际的标定实验,验证了标定方案的可行性和精确性。最后进行工件位姿测量实验,通过雷尼绍三坐标接触式在位测量系统对光谱共焦非接触式在位测量系统的工件位姿测量精度进行了验证。实验结果表明本文所提出的光谱共焦非接触式在位测量系统测量标准球的直径误差 $<6\ \mu\text{m}$ ,工件定位误差 $<10\ \mu\text{m}$ ,能够满足磁流变抛光实际的定位要求。

**关键词:**光谱共焦传感器;标定;在位测量;工件定位

**中图分类号:** TH-39 TH705 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.35

## A workpiece in-place measurement system for 5-axis CNC machine tools based on spectral confocal principle

He Shuaiyu<sup>1</sup>, Zhou Tao<sup>2</sup>, Jin Lingxing<sup>3</sup>, Rong Youmin<sup>1</sup>, Liu Xiufeng<sup>4</sup>

(1. School of Mechanical Science & Engineering of HUST, Wuhan 430074, China; 2. Sichuan Precision and Ultra-Precision Machining Engineering Technology Center, Chengdu 610200, China; 3. Taizhou Eastern CNC Equipment Co., Taizhou 318000, China; 4. School of Physics and Mechatronic Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Precision optical components are extensively used in critical fields such as astronomical observation, space exploration, and projection lithography objectives. These components are characterized by high surface quality, precise profile accuracy, and minimal surface damage. Polishing is the final step in the finishing process of optical elements, requiring an iterative “measurement-processing” cycle to achieve nano-level surface accuracy and sub-nano-level surface roughness. After off-line measurement of the surface shape, the workpiece must be re-installed and aligned on the machine tool twice to ensure precise positioning and posture, which is crucial for subsequent processing accuracy. Traditional contact-based alignment and positioning methods suffer from inefficiencies and risks of surface scratches. To address these issues, this paper proposes a non-contact in-place measurement system for vertical five-axis machine tools, utilizing a spectral confocal sensor. A mathematical model is developed for both the measurement system to obtain workpiece surface coordinates and for the calibration of the spectral confocal sensor on the machine tool. Additionally, a compensation calibration method based on a standard ball is introduced, using a spherical constraint equation. The feasibility and accuracy of this calibration method are validated through practical calibration experiments on a magnetorheological polishing machine tool. Finally, a workpiece

收稿日期:2024-09-25 Received Date: 2024-09-25

\* 基金项目:工信部高质量发展专项(J0017-2326-QT)、湖北省教育厅科学研究计划项目(Q20233006)资助

position and pose measurement experiment is conducted, with the accuracy of the spectral confocal non-contact in-place measurement system verified against a Renishaw three-coordinate in-place measurement system. Experimental results show that the diameter error of the standard ball is less than  $6\ \mu\text{m}$ , and the workpiece positioning error is less than  $10\ \mu\text{m}$ , meeting the positioning accuracy requirements for magnetorheological polishing.

**Keywords:** spectral confocal sensor; calibration; in-situ measurement; job positioning

## 0 引言

在光学元件进行高精度加工时,为了获得较高的面型精度和表面粗糙度,往往需经历“离线测量-加工”反复迭代的过程,在加工前需要对工件的实际位姿进行精确定位。传统方法是通过专用夹具或者利用千分表等仪器进行调平找正,在上述迭代加工时存在效率低下、精度难以保证等缺点<sup>[1-2]</sup>。因此,实现工件的自动定位在机床高精度加工时具有重要的意义。

工件的自动定位,是指通过测量工件的表面坐标数据,利用定位算法确定工件实际坐标系与工件理想坐标系之间的刚体变换矩阵的过程,其本质是点云的配准<sup>[3]</sup>。工件自定位能够解决传统机床加工过程准备时间过长等问题,是自动化生产制造的关键。工件实际位姿数据目前主要是通过原位测量获得,相较于雷尼绍三坐标接触式测量等接触式原位测量技术,光谱共焦是一种非接触式测量,具有抗干扰能力强、精度高、效率高、能够避免划伤工件表面等显著优点<sup>[4-6]</sup>,更适合高光学元件精度加工时的应用场景。

在位测量系统搭建方面,孙梦楠等<sup>[7]</sup>以四轴铣床为载体,设计了基于激光三角位移传感器的双头螺杆在位测量系统,实现双头螺杆廓形参数的测量;李书奇等<sup>[8]</sup>设计了一种基于线激光轮廓传感器的非接触在位测量系统以提高复杂曲面结构零件的在位测量效率,并在科德五轴立式加工中心上对工件进行了实际测量实验验证;刘福权<sup>[9]</sup>基于激光三角测量法搭建了一种基于线激光位移传感器的石油螺纹在位测量系统,以SCK230型数控螺纹修复机床为载体进行了在位测量实验,解决了石油螺纹存在装卸不便导致螺纹廓形参数测量困难的问题;夷宏明等<sup>[10-11]</sup>将激光测头与龙门式五轴数控机床相结合,并自主开发了在位激光测量系统,实现了系统的激光测头和机床坐标数据的高速采集;刘新波<sup>[12]</sup>将激光位移检测技术与立式加工中心结合,研制了以激光三角法位移传感器为核心的单传感器回转测头,提出了一种检测大型工件的非接触式方案,建立了针对标准圆和椭圆的逼近式定位模型,实现了孔心定位。上述研究实现了加工过程中的在位测量,在一定程度上提高了加工效率,但是大多采用激光位移传感器,易受外界杂散光等影响,精度大多难以满

足光学元件加工要求,而且其测量系统多基于三轴、四轴机床平台,自由度限制较大使得后续标定困难,数据同步采集的集成化程度也不高。

在位测量系统标定方面,李津容等<sup>[13]</sup>建立了三轴数控机床线激光在位测量系统的数学模型,并提出了一种基于手眼标定原理的线激光传感器安装位姿标定方法,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;李禾等<sup>[14]</sup>基于齐次坐标变换建立测量系统空间误差模型,并提出了一种利用标准球进行标定的触发式测头空间位置标定方法,并对基于金刚石车床的触发式在位测量系统进行测头标定实验;毕超等<sup>[15]</sup>搭建了基于坐标测量机的非接触式测量平台,提出了以球面方程作为约束条件的标定方法,根据步长和激光束长度的变化关系进行标定。上述研究都建立了在位测量系统标定的相关数学模型,提出了相应的标定方法完成标定。但其或是需要依赖精密的坐标测量系统,标定成本高,或是许多适用于激光位移传感器的标定方法并不适用于量程较小的光谱共焦传感器。

与光谱共焦传感器相比,激光位移传感器虽然单色性好<sup>[16]</sup>,但是照射透明光学工件时,反射光会扩散开来,导致测量变得困难。因此,针对立式五轴磁流变抛光机床构建了一种基于光谱共焦传感器的机床在位测量系统,建立了在位测量的数学模型提出了基于标准球的补偿标定的方法,并进行标定实验和精度验证。最后,通过和雷尼绍三坐标接触式在位测量系统进行实验对照,验证了光谱共焦在位测量系统在工件定位方面的可行性和准确性。

## 1 基于光谱共焦传感器的在位测量系统测量原理

本文在位测量系统基于立式五轴数控机床,主要由光谱共焦传感器、华中数控系统等组成。

光谱共焦位移传感器原理类似于共焦显微镜<sup>[17]</sup>,如图1所示,它的光源采用复色光(如白光),复色光经过光学系统,产生光谱色散,并在空间轴向方向形成一系列焦点。被测物体表面的单色光反射回来,通过滤光小孔(光纤口)到达光谱仪。由于滤光小孔对离焦光线的过滤作用,到达光谱仪的光线中,被测物表面焦点处对应波长的单色光其光通量是最大的,因此对光谱

仪检测到的信号进行处理, 提取出峰值波长(焦点波长), 即可根据事先标定的“波长-位移”关系曲线还原出位移。

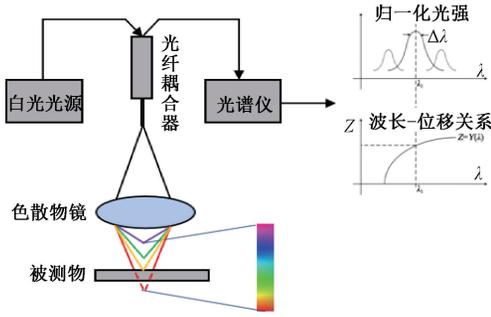


图 1 Y 型光纤耦合器式光谱共焦位移传感器原理

Fig. 1 Principle diagram of the Y-type optical fiber coupler spectral confocal displacement sensor

首先建立在位测量系统模型中的各坐标系, 如图 2 所示。

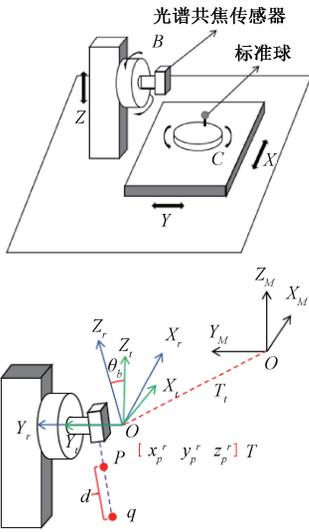


图 2 系统拓扑结构及坐标系的建立

Fig. 2 Establishment of system topology and coordinate system

1) 世界坐标系  $O-X_M Y_M Z_M$ : 以机床回零时  $B$  轴与  $C$  轴交点为坐标系原点,  $XYZ$  轴正方向如图所示。世界坐标系不受机床运动的影响, 是一个固定的坐标系。

2) 传感器平移坐标系  $O-X_r Y_r Z_r$ : 机床  $X, Y, Z$  轴移动时, 该坐标系在  $X, Y$  方向与其反向等距移动, 在  $Z$  方向同向等距移动, 机床回零时该坐标系与世界坐标系重合。

3) 传感器旋转坐标系  $O-X_p Y_p Z_p$ : 转动  $B$  轴时该坐标系绕其  $Y$  轴跟随其转动相同角度,  $B$  轴回零时该坐标系与传感器平移坐标系重合。

假设光谱共焦传感器光学测量零点  $P$  在传感器旋转坐标系中的坐标  $T_p^r = [x_p^r \ y_p^r \ z_p^r]^T$ , 传感器出光方向的单位矢量  $R_p^r = [l \ m \ n]^T$ 。当传感器在机床上固定好后  $T_p^r$ 、 $R_p^r$  即为定值。当测量某点  $q$  时, 传感器读数记为  $d$ , 机床  $X, Y, Z$  三轴读数为  $x_i, y_i, z_i$ , 则  $q$  点在传感器旋转坐标系下的坐标  $[x_q^r \ y_q^r \ z_q^r]^T$  为:

$$\begin{bmatrix} x_q^r \\ y_q^r \\ z_q^r \end{bmatrix} = dR_p^r + T_p^r = \begin{bmatrix} dl + x_p^r \\ dm + y_p^r \\ dn + z_p^r \end{bmatrix} \quad (1)$$

机床回零时设点  $q$  在世界坐标系下的坐标为  $[x_q^w \ y_q^w \ z_q^w]^T$ , 则由刚体变换可得

$$\begin{bmatrix} x_q^w \\ y_q^w \\ z_q^w \end{bmatrix} = R_b \begin{bmatrix} x_q^r \\ y_q^r \\ z_q^r \end{bmatrix} - T_t = R_b (dR_p^r + T_p^r) - T_t \quad (2)$$

其中,

$$R_b = \begin{bmatrix} \cos\theta_b & 0 & \sin\theta_b \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_b & 0 & \cos\theta_b \end{bmatrix}, T_t = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ -z_t \end{bmatrix}.$$

式中:  $R_b$  由机床旋转轴  $B$  的转角  $\theta_b$  计算得到;  $x_i, y_i, z_i$  为机床  $X, Y, Z$  三轴读数;  $d$  为光谱共焦传感器测量值, 这些参数都可以在测量过程中实时获得。

## 2 在位测量系统标定方案

光谱共焦传感器在机床中的空间位姿标定是建立传感器与传感器旋转坐标系关系的前提, 是光谱共焦在位测量系统获取测点三维坐标信息的基础。即需标定传感器光学测量零点  $P$  在传感器旋转坐标系中的坐标  $[x_p^r \ y_p^r \ z_p^r]^T$ , 传感器出光方向的单位矢量  $[l \ m \ n]^T$ 。

采用标准球进行辅助标定, 标准球固定在  $C$  轴转台上。由式(2)可知保持  $B, C$  轴转角及传感器读数  $d$  不变扫描标准球表面测点时, 式(2)中  $R_b(dR_p^r + T_p^r)$  为固定值, 设其为  $\Delta T$ , 则由式(2)得:

$$\begin{bmatrix} x_q^w \\ y_q^w \\ z_q^w \end{bmatrix} = \Delta T - \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ -z_t \end{bmatrix} \quad (3)$$

在数值上相当于将标准球球面点进行了固定平移后即机床坐标变换值, 因此标准球球心  $S_0$  可表示为  $S_0 = \Delta T - S_1$ , 其中  $S_1$  为测量标准球表面  $i$  个测点得到的机床坐标集  $[x_i(i) \ y_i(i) \ -z_i(i)]^T$  拟合得到的球心, 记为  $[x_1 \ y_1 \ z_1]^T$ 。

再考虑  $C$  轴转动: 设机床回零时标准球球心在世界

坐标下的坐标为 $[x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ ,则C轴为转角 $\theta_c$ 且X、Y轴回零时,存在旋转矩阵 $R_c$ 使得此时的世界坐标下标准球球心 $S'_0 = [x'_0 \ y'_0 \ z'_0]^T$ 满足 $S_0 = R_c^{-1}S'_0$ , $S'_0$ 也满足公式 $S'_0 = \Delta T - S_1$ ,所以有:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = R_c^{-1} \begin{bmatrix} x'_0 \\ y'_0 \\ z'_0 \end{bmatrix} = R_c^{-1} \left( \Delta T - \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} -\cos\theta_c & \sin\theta_c & 0 & d\cos\theta_b & 0 & d\sin\theta_b & \cos\theta_b & 0 & \sin\theta_b \\ -\sin\theta_c & -\cos\theta_c & 0 & 0 & d & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d\sin\theta_b & 0 & d\cos\theta_b & -\sin\theta_b & 0 & \cos\theta_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ l \\ m \\ n \\ x_p^r \\ y_p^r \\ z_p^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 3 标定实验

本次实验在一台搭载华中数控 HNC-848D 的立式六轴数控机床上进行,当保持A轴转角始终为 $0^\circ$ 时即可将其视为立式五轴机床。该机床B轴的运动范围为 $\pm 30^\circ$ ,C轴为 $\pm 180^\circ$ 。机床X、Y、Z、B、C轴的定位精度分别为 $4 \mu\text{m}$ 、 $4 \mu\text{m}$ 、 $3 \mu\text{m}$ 、 $4 \text{arcsec}$ 、 $4 \text{arcsec}$ 。标定所使用的标准球为直径30 mm的标准球,其球度误差 $< 0.25 \mu\text{m}$ ,实验时将其固定在载物台上。光谱共焦传感器选用德国米依公司的光谱共焦传感器测量系统,主要参数如表1所示,标定实验实物如图3所示。

表1 光谱共焦传感器主要参数

Table 1 Key parameters of spectral sensor

部件	型号	分辨率/nm	测量频率/范围	线性度
控制器	IFC2461	1	25~100 kHz	$< \pm 0.025\%$ FSO
探头	IFS2405	60	10 mm	$< \pm 2.5 \mu\text{m}$

在实际标定过程中,很难保证传感器读数为一定值不变,因此采用分步标定的方法,即先标定传感器出光方向,再标定零点位置。

标定传感器出光方向:当B、C轴转角为 $0^\circ$ 时,测量标准球顶部中心区域表面64个测点 $[x_{qi}^w \ y_{qi}^w \ z_{qi}^w]^T$ ,测点法向矢量和光谱共焦光束的夹角 $< 17^\circ$ 。记录光谱共焦传感器数值和机床坐标数据,利用球面约束方程: $(x_q^w - x_0)^2 + (y_q^w - y_0)^2 + (z_q^w - z_0)^2 = R^2$ 得到式(6)。

其中,

$$R_c = \begin{bmatrix} \cos\theta_c & -\sin\theta_c & 0 \\ \sin\theta_c & \cos\theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

带入整理得式(5),改变机床转角 $\theta_b, \theta_c$ 及测头测量值 $d$ 测量多组数据,代入式(5)建立超定方程组,求解方程组的最小二乘解 $[x_0 \ y_0 \ z_0 \ l \ m \ n \ x_p^r \ y_p^r \ z_p^r]^T$ ,即得到上述需要标定的相关参数。

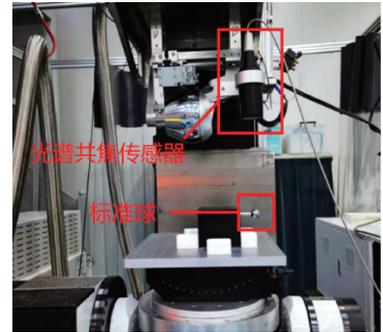


图3 标定实验实物

Fig. 3 Actual picture of calibration experiment

$$\begin{cases} (x_{q1}^w - x_0)^2 + (y_{q1}^w - y_0)^2 + (z_{q1}^w - z_0)^2 = R^2 \\ (x_{q2}^w - x_0)^2 + (y_{q2}^w - y_0)^2 + (z_{q2}^w - z_0)^2 = R^2 \\ \vdots \\ (x_{qi}^w - x_0)^2 + (y_{qi}^w - y_0)^2 + (z_{qi}^w - z_0)^2 = R^2 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $(x_0, y_0, z_0)$ 为机床回零时标准球在世界坐标系下的绝对坐标,将式(2)代入式(6)建立非线性方程组,利用Levenberg-Marquardt算法进行求解,得到光谱共焦光束的偏角: $R_p^r = [0.1458, 0.0753, -0.9867]^T$ 。

求解零点位置:旋转B、C轴使得 $(\theta_b, \theta_c)$ 分别为 $(0^\circ, 0^\circ)$ 、 $(20^\circ, 0^\circ)$ 、 $(20^\circ, -45^\circ)$ 和 $(20^\circ, 45^\circ)$ ,移动机床使光谱共焦光束粗略对准标准球的球心。分别在上述不同姿态角下测量,每次测量标准球表面64个测点。

通过华中数控IPC200单元和华中自动化控制编程平台HPAC同步读取传感器测量值和机床坐标数据值,如图4所示。设 $d$ 为测量前预设定的传感器测量固定

值, 实际测量值为  $d_i$ ,  $\Delta d$  为测量值  $d_i$  减去固定值  $d$  后一较小的测量差值, 因此  $\Delta d + d$  代入式 (3) 中的  $d$  进行变换可得到坐标表达式。

$$\begin{bmatrix} x_q^w \\ y_q^w \\ z_q^w \end{bmatrix} = \Delta T - \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ -z_i \end{bmatrix} + R_b \Delta d \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix}, Q = - \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ -z_i \end{bmatrix} + R_b \Delta d \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix}。$$

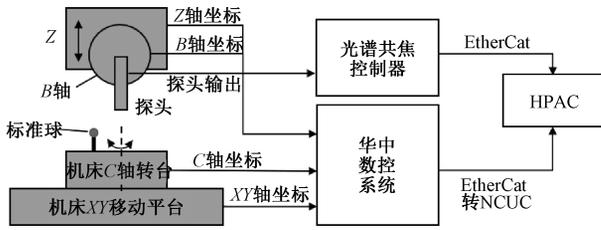


图 4 数据同步采集

Fig. 4 Schematic diagram of synchronous data acquisition

利用前述求得的  $R_p'$ , 每次得到的点集  $Q$  可拟合为直径近似为标准球理论直径的球面, 从而得到式 (4) 中的球心  $[x_1 \ y_1 \ z_1]^T$ , 拟合结果如表 2 所示。

表 2 拟合的球心 S1 坐标

Table 2 Coordinates of the fitted spherical center S1 (mm)

$(\theta_b, \theta_c)$	$d$	$x_1$	$y_1$	$z_1$
$(0^\circ, 0^\circ)$	4	-28.418	-150.698	393.153
$(20^\circ, 0^\circ)$	4	-181.092	-150.698	376.386
$(20^\circ, -45^\circ)$	6	-174.645	-27.213	374.436
$(20^\circ, 45^\circ)$	6	-99.126	-242.598	374.433

将上述数据代入式 (5) 中, 利用最小二乘法求解得:  $[x_0 \ y_0 \ z_0 \ l \ m \ n \ x_p' \ y_p' \ z_p']^T = [152.301, 53.410, -817.721, 0.145 \ 3, 0.075 \ 8, -0.986 \ 5, 123.301, -97.601, -420.604]^T$ 。传感器出光方向取本次求解结果。

### 4 测量验证

为了验证标定后的光谱共焦在位测量系统, 转动  $B$ 、 $C$ , 使得光谱共焦传感器在不同姿态下测量标准球表面 100 个测点, 利用式 (2) 求解出标准球表面测点在世界坐标系下的坐标并拟合球面求取标准球直径, 结果如表 3 所示。

由表 3 数据可知, 直径测量的最大误差为  $-0.005 \ 8 \text{ mm}$ , 误差绝对值的平均值为  $0.004 \ 663 \text{ mm}$ , 标准偏差为  $0.004 \ 697 \text{ mm}$ ,  $k$  取 1.5, 标准不确定度为  $0.002 \ 662 \text{ mm}$ 。说明该基于光谱共焦传感器的机床在位

表 3 标准球直径拟合结果

Table 3 Fitting results of standard ball diameter

(mm)

序号	测量值 $d_i$	标称值 $d$	误差
1	30.002 2	29.998 0	0.004 2
2	29.992 6	29.998 0	-0.005 4
3	29.993 1	29.998 0	-0.004 9
4	30.001 3	29.998 0	0.003 3
5	29.992 2	29.998 0	-0.005 8
6	29.993 7	29.998 0	-0.004 3
7	30.002 8	29.998 0	0.004 8
8	30.002 6	29.998 0	0.004 6

测量系统的精度和稳定性均较高, 能够满足实际的加工要求。其中光谱共焦在位测量系统测量误差来源有机床定位误差、传感器测量误差、传感器标定误差、球面拟合误差等。机床运动轴带动光谱共焦传感器进行标定和测量, 所以机床定位误差和传感器标定误差是主要误差来源。

为了进一步说明该在位测量系统在磁流变抛光实际加工过程中的可行性, 分别用本文的光谱共焦传感器测量系统和常见的雷尼绍三坐标接触式传感器在同一机床上对同一位置的同一回转对称工件进行姿态测量, 如图 5 所示, 其中雷尼绍三坐标接触式传感器的重复定位精度为  $\pm 1 \ \mu\text{m}$ 。利用 ICP 算法将二者的测量点云分别与工件理论 CAD 模型进行配准求解变换矩阵  $T$ , 其中以机床世界坐标系为工件理想位姿 CAD 模型坐标系。



(a) 光谱共焦在位测量  
(a) Spectral confocal in-place measurement



(b) 雷尼绍三坐标接触式在位测量  
(b) Renishaw three coordinate contact measurement

图 5 在位测量实验

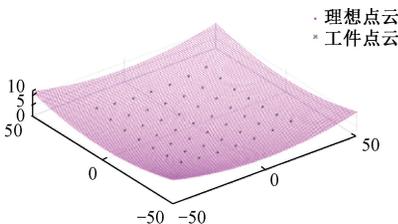
Fig. 5 In-place measurement experiment

ICP 算法求解过程如下<sup>[18-19]</sup>:

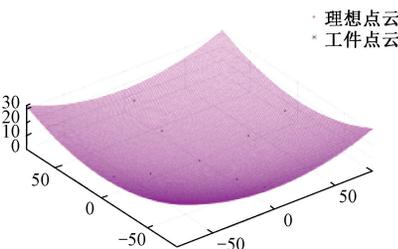
- 1) 对于源点云中的每个点,在目标点云中寻找匹配点(最近点),组成对应点集;
- 2) 根据刚体变换矩阵计算方法求解源点云到其最近点集之间的变换矩阵  $T$ ;
- 3) 将计算的变换矩阵  $T$  作用于源点云,计算其变换后与目标点云之间的相对距离误差  $e_k$ ;
- 4) 设定迭代停止条件,若  $|e_k - e_{k+1}| < \varepsilon$ ,则停止计算,否则将上述变换后的源点云视为新的源点云,继续上述迭代过程直至满足迭代停止条件。

在工件实际磁流变抛光加工过程中,为避免配准结果不唯一,可先通过侧面定位线对工件初步找正、调平后设绕  $Z$  轴旋转角为  $0$ 。运用雷尼绍三坐标接触式传感器时,通过测量工件侧面 4 点及表面 9 点的坐标信息来进行位姿匹配。运用光谱共焦传感器时,等距测量表面若干测点,同时以工件上表面加工面与其回转对称中心线交点为特征点,通过光谱共焦传感器测量其世界坐标系下的位置。

配准结果如图 6 和表 4 所示,从配准结果可知,光谱共焦在位测量系统面型数据和理论模型基本相同,其配准结果和雷尼绍三坐标接触式在位测量系统相差不大,说明本文设计的在位测量系统取得了较好的工件定位精度。



(a) 光谱共焦在位测量系统配置结果  
(a) Configuration results of spectral confocal in-place measurement system



(b) 雷尼绍三坐标接触式在位测量系统配准结果  
(b) Registration result of Renishaw three coordinate contact in-place measurement system

图 6 点云配准结果

Fig. 6 Cloud registration results

$\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为工件实际位姿绕机床直线轴  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的旋转角; $d_x$ 、 $d_y$ 、 $d_z$  为工件实际位姿沿机床  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的平移量。

表 4 刚体变换矩阵参数

Table 4 Parameters of rigid body transformation matrix

参数	雷尼绍	光谱共焦
$\alpha/\text{rad}$	0.001 7	0.001 675
$\beta/\text{rad}$	-0.005 95	-0.006 011
$\gamma/\text{rad}$	$2.634\ 7 \times 10^{-5}$	$2.597\ 6 \times 10^{-5}$
$d_x/\text{mm}$	25.326	25.323
$d_y/\text{mm}$	51.231	51.235
$d_z/\text{mm}$	850.677	850.675

在磁流变机床实际加工过程中, $X$ 、 $Y$  方向的误差在一定范围内对加工结果影响较小,而  $Z$  方向误差影响较大。为验证光谱共焦在位测量系统在磁流变实际加工过程中运用的可行性和准确性,在世界坐标系下,通过雷尼绍三坐标接触式在位测量系统测量若干个工件表面的验证点,得到其世界坐标系下的绝对坐标。利用上述光谱共焦的变换矩阵  $T$  将验证点坐标映射到理想姿态下得到  $(x'_i, y'_i, z'_i)$ ,对比其  $z'_i$  与 CAD 模型  $(x''_i, y''_i)$  处理理想值  $z''_i$  的偏差,结果如表 5 所示。

表 5  $Z$  方向验证结果

Table 5 Verification results in the  $Z$ -direction (mm)

序号	$x'_i$	$y'_i$	$z'_i$	$z''_i$	$\Delta z$
1	10.963	25.675	1.021	1.013 8	0.007 2
2	6.358	9.568	0.226	0.220 0	0.006 0
3	-37.156	16.653	2.784	2.776 0	0.008 0
4	-21.568	-6.586	0.855	0.848 8	0.006 2
5	11.367	-28.036	1.531	1.523 3	0.007 7
6	-11.981	20.649	0.960	0.954 1	0.005 9
7	-6.853	-4.983	0.126	0.119 2	0.006 8
8	-18.964	-21.034	1.348	1.339 8	0.008 2

验证结果表明,本文所设计的光谱共焦在位测量系统其工件定位最大偏差为 0.008 2 mm,平均偏差为 0.007 mm,满足实际加工所需的  $\pm 10\ \mu\text{m}$  的要求,具有实际应用的可行性。其中偏差的主要来源有机床定位误差、传感器测量误差、点云配准误差等。

## 5 结 论

本文针对光学零件的超精密抛光加工,构建了基于光谱共焦传感器的在位测量系统,研究了在位测量系统的测量原理及其标定的数学模型,提出了一种基于标准球的光谱共焦传感器位姿标定方法。本文提出的分步标定方法,不需要严格控制光谱共焦传感器的读数为某一

定值,提高了操作的可行性。同时,通过不同机床姿态下对标准球直径测量,对光谱共焦在位测量系统进行了精度验证,直径测量的最大误差为 $-0.0058\text{ mm}$ ,标准偏差为 $0.004697\text{ mm}$ ,说明了该光谱共焦在位测量系统能够达到较高的测量精度。最后,对光谱共焦在位测量系统和雷尼绍三坐标接触式在位测量系统进行了工件定位实验对照,实验结果表明:本文构建的光谱共焦在位测量系统工件Z向定位最大误差为 $0.0082\text{ mm}$ ,平均误差为 $0.007\text{ mm}$ ,能够满足实际的加工要求。

## 参考文献

- [1] 蒋庄德,李常胜,孙林,等. 高端光学元件超精密加工技术与装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1):131-141.  
JIANG ZH D, LI CH SH, SUN L, et al. Research on the development of ultra-precision machining technology and equipment for high-end optical components[J]. Engineering Science, 2023, 25(1): 131-141.
- [2] 周涛,黄文,陈华,等. 基于ICP的磁流变抛光方形工件精准定位方法[J]. 制造技术与机床, 2019(7): 43-47.  
ZHOU T, HUANG W, CHEN H, et al. Precision positioning method of magnetorheological polishing square workpiece based on ICP[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(7): 43-47.
- [3] 王彦哲. 磁流变抛光机床在位测量系统的设计与试验研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.  
WANG Y ZH. Design and research of on-site measure. system on magnetorheological finishing machine tool[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [4] 朱鸿. 光谱共焦位移传感器信号处理与校准研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2019.  
ZHU H. Research on signal processing and calibration of spectral confocal displacement sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [5] 王津楠. 光谱共焦位移传感器研究与设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.  
WANG J N. Research and design of spectral confocal displacement sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [6] 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 in-flight measurement technology and engineering application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(5): 14-35.
- [7] 孙梦楠,董祉序,徐威,等. 基于激光三角位移传感器的双头螺杆在机测量系统[J]. 中国激光, 2023, 50(14):91-100.  
SUN M N, DONG ZH X, XU W, et al. Two-head screw in-machine measurement system based on laser triangular displacement sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(14): 91-100.
- [8] 李书奇,高晓兵. 非接触式在机测量系统设计与应用[J]. 测控技术, 2024, 43(8):15-22.  
LI SH Q, GAO X B. Design and application of non-contact in-machine measurement system [J]. Measurement and Control Technology, 2024, 43(8): 15-22.
- [9] 刘福权. 基于线激光位移传感器的石油螺纹在机测量系统[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2023.  
LIU F Q. In-machine measurement system of oil thread based on linear laser displacement sensor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [10] 夷宏明. 复杂曲面在机激光扫描测量技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.  
YI H M. Research on on-machine laser scanning measurement technology of complex surface [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [11] 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.
- [12] 刘新波. 大型工件几何参数激光在机测量方法研究[D]. 天津:天津大学, 2013.  
LIU X B. Research on laser in-machine measurement method of large workpiece geometric parameters [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [13] 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 J R, GE G Y, FENG X B, et al. Global position calibration of 2D laser profiler for on-machine measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 158-165.
- [14] 李禾,贺永海,裘萌萌,等. 触发式测头在机标定方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(1): 34-36, 42.  
LI H, HE Y H, XI M M, et al. Research on calibration method of trigger probe in machine [J]. Combined Machine Tool & Automatic Machining Technology, 2024(1): 34-36, 42.

- [15] 毕超,房建国,刘京亮,等. 基于球形目标的激光位移传感器光束方向标定[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 678-685.  
BI CH, FANG J G, LIU J L, et al. Calibration of beam direction of laser displacement sensor based on spherical target [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 678-685.
- [16] 周美丽,白宗文. 基于2D-PSD的激光位移测量系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(2): 64-66.  
ZHOU M L, BAI Z W. Design of laser displacement measurement system based on 2D-PSD [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(2): 64-66.
- [17] 高峰,郑源,范嘉博,等. 基于光谱共焦原理的滚珠螺母多尺度测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 22-31.  
GAO F, ZHENG Y, FAN J B, et al. Multi-scale measurement method of ballscrew nut based on spectral confocal principle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 22-31.
- [18] 龚国强,田演,夏鑫宇. 基于位姿参数估计的多视角点云配准方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(6): 241-252.  
GONG G Q, TIAN Y, XIA X Y. Multi-view point cloud registration method based on pose parameter estimation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(6): 241-252.
- [19] 邓鑫灵,周大可,杨欣. 基于非刚性ICP的三维人脸稠密对应算法[J]. 电子测量技术, 2019, 42(7): 1-6.  
DENG X L, ZHOU D K, YANG X. 3D face dense correspondence algorithm based on non-rigid ICP [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(7): 1-6.

## 作者简介



贺帅宇, 2022年于武汉理工大学获得学士学位, 现为华中科技大学硕士研究生, 主要研究方向为机床装备开发与应用。

E-mail: hsy2022email@163.com

**He Shuaiyu** received his B. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2022. Now

he is a master's candidate at Huazhong University of Science and Technology. His main research interest is the development and application of machine tool equipment.



周涛, 2017年于西安交通大学获得硕士学位, 现为四川省精密超精密加工工程技术研究中心工程师, 主要研究方向为超精密抛光技术。

E-mail: zhou386396@163.com

**Zhou Tao** received his M. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2017. Now he is an engineer at Sichuan Precision and ultra-precision Machining Engineering Technology Research Center. His main research direction is ultra-precision polishing technology.



金铃兴, 2009年于浙江科技大学获得学士学位, 现为台州市东部数控设备有限公司任机械工程师, 主要研究方向为数控机床设计。

E-mail: jlx20027@163.com

**Jin Lingxing** received his B. Sc. degree from Zhejiang University of Science and Technology in 2009. Now he is working as a mechanical engineer in Taizhou Eastern Numerical Control Equipment Co. His research interest covers CNC machine tool design.



荣佑民(通信作者), 2017年于华中科技大学获得博士学位, 现为华中科技大学机械科学与工程学院副教授、博士生导师, 主要研究方向为激光制造技术及设备。

E-mail: rym@hust.edu.cn

**Rong Youmin** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2017. Now he is an associate professor and doctoral supervisor of the School of Mechanical Science and Engineering of Huazhong University of Science and Technology. His main research direction is laser manufacturing technology and equipment.



刘秀峰, 2022年于华中科技大学获得博士学位, 现为湖北第二师范学院物理与机电工程学院讲师, 主要研究方向超精密加工技术及装备。

E-mail: liuxiufeng15@hue.edu.cn

**Liu Xiufeng** received his Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2022. Now he is a lecturer at the School of Physics and Mechatronic Engineering of Hubei Second Normal University. His main research interests are ultra-precision machining technology and equipment.