

文章编号 1004-924X(2026)13-2063-15

机器人被动跟踪测量与误差校正

计 韬¹, 贾 雪¹, 杨宇翔¹, 张记云², 焦少伟¹, 裴宇航¹, 娄志峰^{1*}

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 北京机械工业自动化研究所有限公司, 北京 100120)

摘要:为提高机器人在高精密自动化领域适用性,提升机器人定位精度,构建了基于被动跟踪测量技术的机器人钻孔加工系统,并围绕系统误差源解析、坐标转换标定及误差补偿策略开展了系列探究。首先,剖析被动跟踪测量系统的测量机理与内部误差来源,采用直接测量与空间圆平面非线性拟合相结合的方法实现误差补偿。其次,阐述了钻孔加工系统的整体架构,明确了系统坐标转换与标定方法。在此基础上,提出一种机器人位姿误差循环补偿策略,确立了“先姿态,后位置”的补偿思路。为验证所提方法的有效性,在有机玻璃工件上开展钻孔加工对比实验。实验结果表明,加工孔的定位精度得到显著提升,定位误差由 1.23 mm 降至 0.15 mm,能够满足精密加工与自动化装配领域对精度、稳定性及可靠性的严苛要求。

关键词:机器人;被动跟踪测量系统;误差补偿;钻孔精度

中图分类号:TH721;TP249 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263413.2063

CSTR:32169.14.OPE.20263413.2063

Robot passive scale tracking measurement and error correction

Ji Tao¹, Jia Xue¹, Yang Yuxiang¹, Zhang Jiyun², Jiao Shaowei¹, Pei Yuhang¹, Lou Zhifeng^{1*}

(1. College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry Co., Ltd., Beijing 100120, China)

* Corresponding author, E-mail: louzf@dlut.edu.cn

Abstract: To improve the applicability of robots in high-precision automation and enhance robot positioning accuracy, this study constructs a robotic drilling system based on a passive scale tracker and conducts systematic research on system error source analysis, coordinate transformation calibration, and error compensation strategies. Firstly, the measurement mechanism and internal error sources of the passive scale tracker are analyzed, and error compensation is achieved by combining direct measurement and nonlinear fitting of spatial circular planes. Secondly, the overall architecture of the drilling system is elaborated, and the coordinate transformation and calibration methods of the system are defined. On this basis, a cyclic compensation strategy for robot pose errors is proposed, establishing the compensation idea of "attitude first, position later". To verify the effectiveness of the proposed method, comparative drilling experiments are carried out on polymethyl methacrylate (PMMA) workpieces. The experimental results show that the positioning accuracy of the machined holes is significantly improved, with the positioning error reduced

收稿日期:2026-04-01;修订日期:2026-05-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52275521)

from 1.23 mm to 0.15 mm, which can meet the stringent requirements of precision machining and automated assembly in terms of accuracy, stability, and reliability.

Key words: robots; passive scale tracker; error compensation; drilling accuracy

1 引 言

机器人已广泛应用于铣削、钻孔、切割及装配等各类工业自动化制造场景。相较于机床等传统工业制造装备,机器人具备更高的灵活性与自由度,且工作空间更为广阔,在大型部件机械加工、微小复杂零件装配等领域展现出不可替代的优势^[1-2]。然而,在实际工况中,受机器人本体制造装配误差、关节刚度变形误差、发热误差及控制算法误差等多重因素耦合影响,机器人定位精度往往难以满足高精密加工要求,与高精密制造业对定位精度的严苛要求存在显著差距,这一精度瓶颈严重限制了机器人在高端制造领域的应用拓展。因此,开展机器人坐标姿态的精准测量技术研究,并构建高效的误差补偿方案,具有重要理论意义与工程应用价值^[3]。

提高机器人精度的技术路径中,离线标定与误差在线测量补偿是两类较为成熟的主流方案^[4]。其中,离线标定通过建立运动学模型描述机器人运动规律,借助外部测量设备采集一定数量样本点的误差数据,通过参数辨识获取模型中的参数误差,进而实现对任意目标点的误差估计和预补偿。相关研究表明,离线标定可在一定程度上提高机器人非工作状态下的静态精度^[5-7]。但受机器人作业过程中热膨胀、负载变化等动态因素的实时影响,离线标定对实际作业精度的提升效果相对有限,难以充分满足高精密制造的动态精度需求。

误差在线补偿方法依托于测量仪器^[8],例如高精度空间坐标测量设备,可实时获取机器人末端位姿误差,并动态修正至理想位姿,其补偿效果普遍优于离线标定。激光跟踪仪具有精度高,测量范围大等优势,是该技术中应用最为广泛的测量设备。Nguyen等^[9]利用激光跟踪仪实现闭环位置反馈,提升了机器人铣削精度,并评估了闭环控制系统性能。曲巍巍等^[10]构建了基于激光跟踪仪的机器人制孔闭环系统,完成制孔误差的结算与实时补偿。李文龙等^[11-12]面向零件高性

能加工需求,构建了激光跟踪仪反馈的机器人末端闭环反馈控制系统,实现了位姿在线跟踪与误差补偿。史晓佳等^[13]利用激光跟踪仪采集末端位姿,通过逆运动学将位姿误差转换为机器人各关节角度误差。这些研究均验证了在线补偿技术在提升精度方面的可行性与有效性。

随着视觉测量技术精度的提升^[14],视觉测量设备在机器人定位误差在线补偿中的应用日益广泛。Ali等^[15]通过双目视觉测量设备实时采集机器人末端位姿,实现机器人运动路径实时修正。史艳琼等^[16]搭建了基于双目视觉的可重构三维测量系统,通过高精度三维测量,实现了机器人的位置误差和距离误差的预测与补偿。邸红采等^[17]使用双目视觉系统跟踪测量机器人铣削末端刀具的位置误差,结合反向传播神经网络预测机器人铣削轨迹误差,有效改善了铣削加工精度。

综上所述,激光跟踪仪虽以大范围、高精度测量能力成为机器人位姿在线补偿领域的主流方案,但其设备购置与维护成本高昂,难以在中小批量、多品种的制造场景中实现规模化普及。双目视觉测量方法在硬件成本方面虽具一定优势,但其有效测量范围受限于相机视场与景深,且易受环境光照波动、加工碎屑遮挡等因素干扰。

针对上述问题,本文自主开发一套被动跟踪测量系统^[18-21]。该系统采用随动式机械结构与高精度光栅传感单元相结合的设计方案,具有成本可控、抗干扰能力强且易于机器人末端集成的优点。系统测量范围由伸缩机构行程决定,能够有效覆盖常规机器人的主要作业空间,满足机器人在工作范围内的加工作业测量需求。同时,系统直接采集光栅与编码器信号进行位姿解算,响应速度快,可满足闭环控制的动态补偿需求。将该系统与遨博机器人集成,构建了一套机器人钻孔闭环测量与控制系统。为验证所提方案的有效性,本文开展了有机玻璃钻孔实验,结果表明,所提出的误差测

量与补偿方案可有效提升钻孔系统的定位与加工精度。

2 原 理

2.1 被动跟踪测量系统

被动跟踪测量系统结构如图 1 所示,其核心组成单元包括精密二维转台、径向伸缩机构、激光准直机构与姿态测量机构。测量过程中,系统末端与被测对象实现刚性固连,随被测对象的空间运动同步带动二维转台的旋转运动、伸缩机构的线性位移以及姿态测量机构的姿态变化。

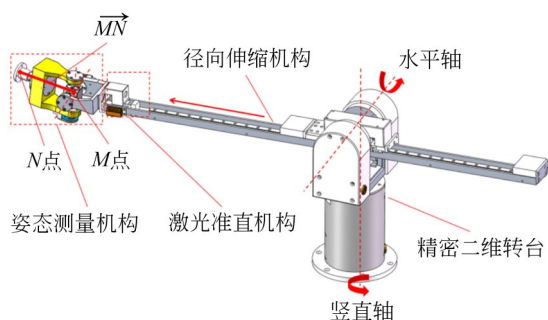


图 1 被动跟踪测量系统结构

Fig. 1 Structure of passive scale tracker

二维转台的竖直轴旋转角度 θ 和水平轴旋转角度 φ 通过其内置的圆光栅传感器实时采集;伸缩机构的伸长量 R 由直光栅传感器检测获取;姿态测量机构的水平轴旋转角度(即俯仰角 α)和竖直轴旋转角度(即偏摆角 β)分别通过俯仰角编码器和偏摆角编码器精确测量。

在空间位置测量阶段,测量系统末端的姿态测量机构水平轴与竖直轴的交点,即为被测点 M 。理想状态下,该被测点 M 可等效为姿态测量机构水平轴与竖直轴的交点。以二维转台水平轴为 X 轴、竖直轴为 Z 轴、初始状态下伸缩机构的延伸方向为 Y 轴建立直角坐标系 $O_A-X_A Y_A Z_A$,则被测点 M 空间位置坐标 (X_M, Y_M, Z_M) 为:

$$\begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \\ 1 \end{bmatrix} = T_{AC} \times T_{CR} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

各个运动特征矩阵的结构如下:

$$T_{AC} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_{CR} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & R_0 + R_L \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

其中: R_0 为伸缩机构初始长度, R_L 为伸缩机构伸长量。

姿态测量机构的回转轴与机器人末端平面保持垂直,因此被测点 M 与测量系统和机器人连接的末端被测点 N 所构成的空间向量 $\overrightarrow{MN}$,与机器人末端平面的法向量具有平行关系,即向量 $\overrightarrow{MN}$ 的空间姿态可等效表征机器人末端姿态。

被测点 M 坐标可由测量系统直接测量得到。被测点 N 的坐标 (X_N, Y_N, Z_N) 则可通过竖直轴旋转角度 θ 、水平轴旋转角度 φ 、姿态测量机构测得的俯仰角 α 与偏摆角 β ,结合 M, N 点间的机械结构设计长度 L 解算得出,如下所示:

$$\begin{bmatrix} X_N \\ Y_N \\ Z_N \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \\ 1 \end{bmatrix} \times T_{Ra} \times T_{ac} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

各个运动特征矩阵的结构如下:

$$T_{Ra} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_{ac} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & L \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

利用机器人基坐标系 B 与被动跟踪测量系统坐标系 A 之间的转换矩阵 ${}^A_B T$,可将 M 点与 N 点的坐标转换至机器人基坐标系中,进而得到向量 $\overrightarrow{MN}$ 在该坐标系下的分量 $(X_{\overrightarrow{MN}}, Y_{\overrightarrow{MN}}, Z_{\overrightarrow{MN}})$,即:

$$\begin{cases} X_{\overrightarrow{MN}} = X_N \cdot {}^A_B T - X_M \cdot {}^A_B T \\ Y_{\overrightarrow{MN}} = Y_N \cdot {}^A_B T - Y_M \cdot {}^A_B T \\ Z_{\overrightarrow{MN}} = Z_N \cdot {}^A_B T - Z_M \cdot {}^A_B T \end{cases} \quad (3)$$

基于上述等效关系,机器人末端姿态可通过

向量 $\overrightarrow{MN}$ 在机器人基坐标系与各坐标轴的夹角来表征,其在测量系统坐标系下的空间姿态表达式如下:

$$\begin{cases} \omega_x = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{MN} \cdot \mathbf{i}}{|\overrightarrow{MN}|}\right) \\ \omega_y = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{MN} \cdot \mathbf{j}}{|\overrightarrow{MN}|}\right) \\ \omega_z = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{MN} \cdot \mathbf{k}}{|\overrightarrow{MN}|}\right) \end{cases} \quad (4)$$

其中: ω_x 为向量 $\overrightarrow{MN}$ 与机器人基坐标系 X 轴的夹角, ω_y 为向量 $\overrightarrow{MN}$ 与机器人基坐标系 Y 轴的夹角, ω_z 为向量 $\overrightarrow{MN}$ 与机器人基坐标系 Z 轴的夹角, $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为机器人基坐标系 X, Y, Z 轴的单位向量。

2.2 测量系统误差与辨识

结合系统结构特点,其运动自由度由多根核心功能轴构成,具体包括:精密二维转台的水平轴 A 轴,竖直轴 C 轴,径向伸缩机构的伸缩轴 R 轴,姿态测量机构的水平轴 a 轴,竖直轴 c 轴,回转轴 U 轴。为支撑后续误差建模与辨识工作,对应上

述各功能轴建立相应坐标系,包括竖直轴(C轴)坐标系($O_c-X_cY_cZ_c$)、水平轴(A轴)坐标系($O_A-X_A Y_A Z_A$)、伸缩轴(R轴)坐标系($O_R-X_R Y_R Z_R$)、姿态测量机构竖直轴(c轴)坐标系($O_c-X_c Y_c Z_c$)、水平轴(a轴)坐标系($O_a-X_a Y_a Z_a$)、回转轴(U轴)坐标系($O_U-X_U Y_U Z_U$),如图2所示。

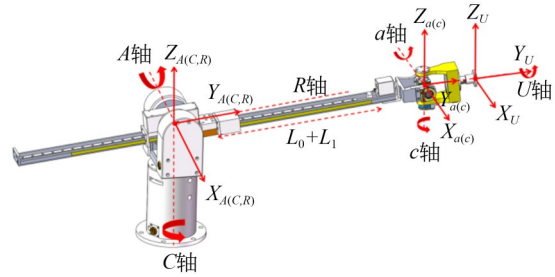


图2 被动跟踪测量系统坐标系定义

Fig. 2 Definition of scale passive tracking coordinate system

由于受机械零件加工精度限制、装配工艺偏差及传感器自身固有误差等多重因素的综合影响,被动跟踪测量系统内部不可避免存在多项误差。本研究系统梳理了内部主要误差源,其空间分布如图3所示,这些误差会直接影响测量系统的测量精度。表1详细归纳了这些误差的来源与具体类型。

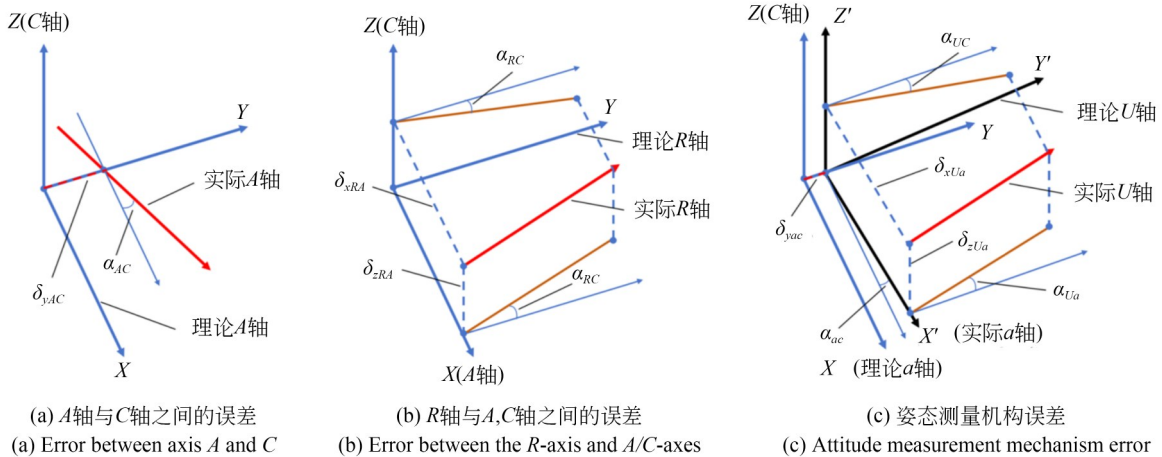


图3 测量系统误差源

Fig. 3 Error source of measurement system

实际工况中,综合考虑系统各类误差,结合前文对误差源的分析,将影响测量结果的几何误差,通过齐次坐标转换的方式,将其对测量系统的影响表征为运动特征矩阵形式。在坐标系 A

向坐标系 C 的转换过程中,存在垂直度误差 α_{AC} ,其作用是使坐标系 C 绕 Y_C 轴旋转一定角度。同时存在偏移误差 δ_{yAC} ,其作用是使坐标系 C 沿 Y_C 轴产生一段平移。对应的误差特征矩阵如下

表 1 系统主要误差源及属性

Tab. 1 Main error sources and properties of system

误差源	属 性
$\alpha_{AC}, \delta_{yAC}$	A 轴与 C 轴的垂直度、偏移误差
α_{RA}, α_{RC}	R 轴与 A 轴、C 轴之间的垂直度误差
$\delta_{xRA}, \delta_{zRA}$	R 轴与 A 轴之间的偏移误差
$\delta_x(R), \delta_z(R)$	R 轴在 X、Z 方向的直线度误差
$\alpha_{ac}, \delta_{yac}$	a 轴与 c 轴的垂直度、偏移误差
α_{Ua}, α_{Uc}	U 轴与 a 轴、c 轴之间的垂直度误差
$\delta_{xUa}, \delta_{zUa}$	U 轴与 a 轴之间的偏移误差
α_A, α_C	A 轴与 C 轴的光栅测量误差
α_a, α_c	a 轴与 c 轴的编码器测量误差
δ_R	R 轴的光栅测量误差

所示:

$$\Delta E_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \alpha_{AC} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \delta_{yAC} \\ -\alpha_{AC} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

同理,坐标系 C 与坐标系 R 之间存在垂直度误差 α_{RA}, α_{RC} , 分别使坐标系 R 绕 Z_c, X_c 轴旋转。同时存在偏移误差 $\delta_{xRA}, \delta_{zRA}$, 分别使坐标系 R 沿 Z_R, X_R 轴平移。对应的误差特征矩阵如下:

$$\Delta E_2 = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{RA} & 0 & \delta_{xRA} \\ \alpha_{RA} & 1 & -\alpha_{RC} & 0 \\ 0 & \alpha_{RC} & 1 & \delta_{zRA} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

在伸缩机构导轨伸缩期间,坐标系 R 存在直线度误差 $\delta_x(R), \delta_z(R)$, 分别对应坐标系 R 产生沿 X_R, Z_R 轴的微小平移, 对应的误差特征矩阵为:

$$\Delta E_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_x(R) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \delta_z(R) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

坐标系 a 与 c 之间,存在垂直度误差 α_{ac} 与偏移误差 δ_{yac} , 其中垂直度误差 α_{ac} 使坐标系 c 绕 Y_c 轴旋转一定角度, 偏移误差 δ_{yac} 坐标系 c 绕 Y_c 轴平移一定距离, 对应误差特征矩阵如下所示:

$$\Delta E_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \alpha_{ac} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \delta_{yac} \\ -\alpha_{ac} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

坐标系 c 与坐标系 U 之间存在垂直度误差 α_{Ua}, α_{Uc} , 分别使坐标系 U 绕 Z_c, X_c 轴旋转。同时存在偏移误差 $\delta_{xUa}, \delta_{zUa}$, 分别使坐标系 U 沿 Z_c, X_c 轴平移。对应的误差特征矩阵如下:

$$\Delta E_5 = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{Ua} & 0 & \delta_{xUa} \\ \alpha_{Ua} & 1 & \alpha_{Uc} & 0 \\ 0 & \alpha_{Uc} & 1 & \delta_{zUa} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

综合以上误差矩阵, 最终 M 点坐标为:

$$\begin{bmatrix} X'_M \\ Y'_M \\ Z'_M \\ 1 \end{bmatrix} = T_{AC} \times \Delta E_1 \times T_{CR} \times \Delta E_2 \times \Delta E_3 \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

N 点坐标为:

$$\begin{bmatrix} X'_N \\ Y'_N \\ Z'_N \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_M \\ Y'_M \\ Z'_M \\ 1 \end{bmatrix} \times T_{Ra} \times \Delta E_4 \times T_{ac} \times \Delta E_5 \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

在被动跟踪测量系统中,测量精度主要依赖于光栅尺、编码器等核心传感器,而传感器自身的误差将直接影响最终测量结果,本文参照现有文献中的标定方法^[22],利用光电自准直仪与多面棱体对二维转台中的水平轴、竖直轴的圆光栅开展标定与补偿。补偿后,水平轴的测量误差 α_A 由 $-8'' \sim 6''$ 减小至 $-2'' \sim 2''$ 以内, 竖直轴的测量误差 α_C 由 $-5'' \sim 8''$ 减小至 $-1.5'' \sim 2''$ 。同时,对姿态测量机构的水平轴与竖直轴编码器也进行了标定与补偿。补偿后,姿态测量机构水平轴的测量误差 α_a 由 $-11'' \sim 9''$ 减小至 $-4'' \sim 3''$, 竖直轴的测量误差 α_c 由 $-10'' \sim 13''$ 减小至 $-3'' \sim 3.5''$ 。此外,结合激光干涉仪与角锥棱镜,对径向伸缩机构直光栅测距误差 δ_R 进行了标定与补偿。补偿后,测距误差由 $-18 \sim +18 \mu\text{m}$ 减小至 $-3.5 \sim 4 \mu\text{m}$ 。

为对表 1 中所列各项误差进行参数辨识,本文采用万分表、PSD 位置敏感器件等精密测量设备,对各项误差源进行精准测量^[18],结果如表 2 所示。

针对与姿态测量机构相关的其余误差,因其难以直接测量,本研究采用基于空间圆平面非线性拟合的几何误差求解方法,该方法基于几何约

表 2 直接测量误差源数值

Tab. 2 Error source values of direct measurement

误差项	误差值
$\alpha_{AC}/(^{\circ})$	53.6
$\alpha_{RA}/(^{\circ})$	-31.1
$\delta_{yRA}/\mu\text{m}$	-83.8
$\delta_{xAC}/\mu\text{m}$	-46.7
$\alpha_{RC}/(^{\circ})$	12.6
$\delta_{zRA}/\mu\text{m}$	56.1

束条件求解系统中各误差参数。根据被测坐标点构建被动跟踪测量系统与空间圆平面之间的几何约束关系,将系统误差模型与空间圆平面约束相结合,计算出结果。可在系统装配完成后修正其轴系位置误差,进而提高测量系统的整体测量精度。

空间圆平面由标准圆轨迹发生器生成,该发生器的旋转轴由电机驱动生成圆形平面,旋转轴上安装的旋转编码器测量旋转角 σ_i 。测量系统固连于回转臂,通过回转臂旋转带动其移动,进而完成数据采集,如图4所示。

通过标准圆轨迹发生器获取到圆轨迹,并使用被动跟踪测量系统测量位于圆轨迹上的多个均匀分布的空间点。空间圆平面可以被视为由一个球面与一个平面相交得到,在该圆轨迹上的每一个点均可被视为是由一个球面和一个圆的

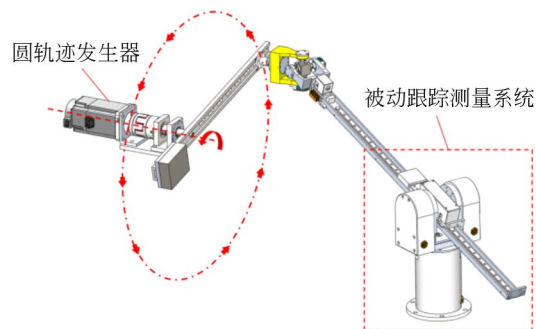


图4 几何误差求解示意图

Fig. 4 Schematic diagram of geometric error solving

方程联立表达。因此,对于每一个测量点均存在约束方程,即:

$$\begin{cases} \sqrt{(X_p - C_x)^2 + (Y_p - C_y)^2 + (Z_p - C_z)^2} - R = 0, \\ aX_p + bY_p + cZ_p + 1 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中: X_p, Y_p, Z_p 即测量系统末端坐标系 $O_U-X_UY_UZ_U$ 的原点坐标, R 为标准圆轨迹的半径, C_x, C_y, C_z 为被动跟踪测量系统基坐标系下标准圆轨迹圆心坐标, a, b, c 为被动跟踪测量系统基坐标系下空间平面方程的系数。

在一个圆轨迹中,如果采集测量点的个数为 n ,由式(12)可以得到 $2n$ 个约束方程,然而在实际情况下,被动跟踪测量系统存在误差项,基于此可以得出进一步分析的优化方程组,即:

$$\begin{cases} f_{11} = \sqrt{(X_{p1} - C_x)^2 + (Y_{p1} - C_y)^2 + (Z_{p1} - C_z)^2} - R \\ g_{11} = aX_{p1} + bY_{p1} + cZ_{p1} + 1 \\ f_{12} = \sqrt{(X_{p2} - C_x)^2 + (Y_{p2} - C_y)^2 + (Z_{p2} - C_z)^2} - R \\ g_{12} = aX_{p2} + bY_{p2} + cZ_{p2} + 1 \\ \dots \\ f_{1n} = \sqrt{(X_{pn} - C_x)^2 + (Y_{pn} - C_y)^2 + (Z_{pn} - C_z)^2} - R \\ g_{1n} = aX_{pn} + bY_{pn} + cZ_{pn} + 1 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

当存在 m 个标定位置时,建立约束关系,并且构建目标函数公式,将求解非线性超定方程组问题转化为求解非线性最小二乘问题,即:

$$\min S(\Omega) = \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f_{ij}^2 + g_{ij}^2]. \quad (14)$$

基于上述方法开展标定实验。在标定过程中,使圆轨迹发生器匀速旋转,并沿圆轨迹均匀采集100个点作为标定点。将这些点代入求解算

法,计算出各个实测点到拟合圆心的距离,即实测半径,进而得到实测半径与标准半径之间的差值。求解得到各个误差项的具体数值,如表3所示。

对于伸缩机构的线性运动轴 R 轴在 X, Z 方向的直线度误差 $\delta_x(R), \delta_z(R)$,可通过伸缩机构末端的激光准直机构的PSD和精密二维转台回转中心处的基准激光束对 $\delta_x(R), \delta_z(R)$ 进行在

表 3 系统主要误差源数值	
Tab. 3 Main error sources and properties of system	
误差项	误差值
$\alpha_{ac}/(^{\circ})$	54.4
$\alpha_{Ua}/(^{\circ})$	52.8
$\delta_{xUa}/\mu\text{m}$	85.5
$\delta_{yac}/\mu\text{m}$	162.5
$\alpha_{Uc}/(^{\circ})$	-57.5
$\delta_{zUa}/\mu\text{m}$	108.4

线测量并实时补偿。

将求解所得单项误差参数代入误差模型后,对圆轨迹进行重新测量,获得补偿后各实际测量点到标准圆圆心之间距离及其与标准半径的偏差值。补偿前后实测半径偏差的对比结果如图 5 所示。在标定范围内,补偿前和补偿后的最大误差分别为 0.14 mm 和 0.04 mm,误差模型的补偿率达到了 71.4%,测量系统的精度得到了显著提高。

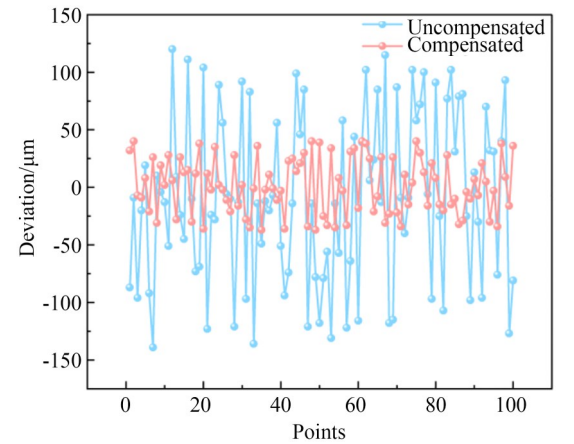


图 5 补偿前后实测点半径偏差对比

Fig. 5 Comparison of radius deviation of measured points before and after compensation

3 钻孔系统的组成与标定

3.1 钻孔系统结构

机器人钻孔加工系统由机器人、加工平台及被动跟踪测量系统组成,具体结构如图 6 所示。本实验选用遨博 i5 机器人,其额定有效载荷为 5 kg,最大工作半径可达 886.5 mm;末端执行器搭载的主轴模块,最大转速为 14 000 r/min,额定

最大扭矩约 0.43 N·m;加工平台配置专用夹具,可实现被加工工件精准固定。被动跟踪测量系统与机器人末端刚性连接,能够实时采集加工过程中机器人的实际位姿信息。

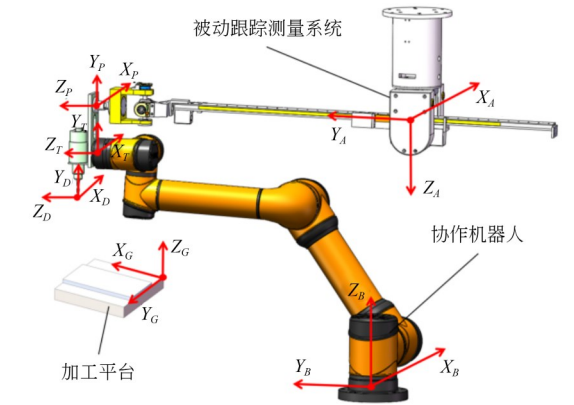


图 6 机器人加工系统

Fig. 6 Robot machining system

机器人钻孔加工系统包含 6 个核心坐标系,分别为被动跟踪测量系统坐标系 $O_A-X_A Y_A Z_A$ 、测量系统被测点坐标系 $O_P-X_P Y_P Z_P$ 、机器人基坐标系 $O_B-X_B Y_B Z_B$ 、机器人末端坐标系 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 、加工刀具坐标系 $O_D-X_D Y_D Z_D$ 、被加工工件坐标系 $O_G-X_G Y_G Z_G$ 。

该加工系统的全流程数据采集、汇集与处理均由上位机完成。采集的数据涵盖被动跟踪测量系统中各个圆光栅、直光栅及编码器的测量数据,以及机器人反馈的实时位姿数据等。所有数据均通过人机交互软件实现可视化反馈与存储。加工系统的详细数据流转路径如图 7 所示。

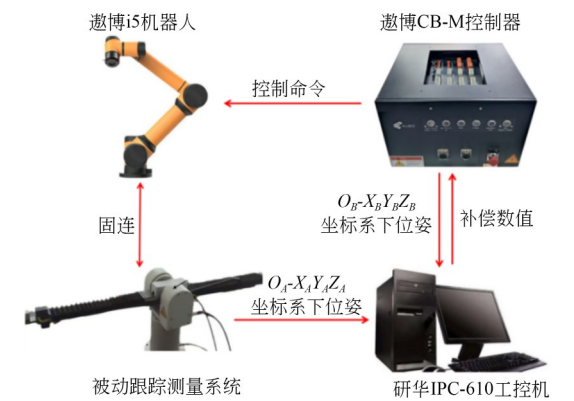


图 7 信息流转示意图

Fig. 7 Information flow

3.2 加工系统标定

机器人钻孔加工系统包含 6 个独立坐标系。在实际加工过程中,加工位置的指令信息基于被加工工件坐标系定义,而机器人的运动控制需依托机器人末端坐标系实现;为保障被动跟踪测量系统对机器人位姿的精准监测,需将机器人末端坐标系的位姿信息映射至测量系统基坐标系。因此,开展各坐标系间的精准标定与转换是确保加工位置指令准确传递、实现加工过程在位测量与闭环控制的前提。

3.2.1 机器人实测点坐标系标定

加工过程中,被动跟踪测量系统的实测点 P 并非机器人的末端法兰中心点,而是与测量系统末端相连的特征点,即为前文中的 N 点。因此,为精准确定该实测点位在机器人基坐标系下的真实坐标,需通过标定获取其相对于机器人末端法兰的偏移量 (X, Y, Z) ,即求解实测点 P 相对于末端法兰的齐次变换矩阵 ${}^T_P T$,此过程即为机器人工具坐标系标定。针对矩阵 ${}^T_P T$,有:

$${}^B_T T \times {}^T_P T = {}^B_P T, \quad (15)$$

其中: ${}^B_T T$ 为机器人末端坐标系相对于基坐标系的齐次变换矩阵, ${}^B_P T$ 为机器人工具坐标系相对于基坐标系的齐次变换矩阵。

机器人工具坐标系标定的常用方法为四点标定法,其核心原理为:在机器人运动范围内选取一高精度固定点作为参考基准,操控机器人带动工具以 4 种不同姿态精准贴合该固定点,记录 4 组末端法兰位姿数据,通过最小二乘法求解即可完成位置标定^[23]。

本加工系统中,被动跟踪测量系统可直接获取机器人工具坐标系的中心位置坐标,无需依赖外部参考基准。基于此,设计如下标定方案:借助测量系统的实时反馈,通过示教模式控制机器人以 4 种不同姿态,4 次抵达测量系统坐标系下的同一目标点位,同步记录 4 组机器人末端法兰中心的位置与姿态数据。对任意两组法兰位姿,有:

$${}^B_T R_i \times {}^T_P T + {}^B_T P_i = {}^B_T R_j \times {}^T_P T + {}^B_T P_j = {}^B_P T. \quad (16)$$

整理后可得:

$$({}^B_T R_i - {}^B_T R_j) \times {}^T_P T = {}^B_T P_i - {}^B_T P_j, \quad (17)$$

其中: ${}^B_T R_i$ 为第 i 个姿态下的机器人法兰中心点在机器人基坐标系下的 3×3 旋转矩阵, ${}^B_T P_i$ 为第 i 个姿态下的机器人法兰中心点在机器人基坐标

系下 3×1 位置向量, ${}^B_P T$ 为目标固定点在基坐标系下齐次变换矩阵。结合 4 组位姿数据及最小二乘法,即可得出最终标定结果:

$$\begin{bmatrix} {}^B_T R_2 - {}^B_T R_1 \\ {}^B_T R_3 - {}^B_T R_2 \\ {}^B_T R_4 - {}^B_T R_3 \end{bmatrix} {}^T_P T = \begin{bmatrix} {}^B_T P_1 - {}^B_T P_2 \\ {}^B_T P_2 - {}^B_T P_3 \\ {}^B_T P_3 - {}^B_T P_4 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

其中: ${}^B_T R_1 - {}^B_T R_4$ 表示四次法兰中心的姿态旋转矩阵, ${}^B_T P_1 - {}^B_T P_4$ 表示四次法兰中心的位置向量。按照上述方法对偏移量 ${}^T_P T$ 进行三次标定,标定结果如表 4 所示。

表 4 工具坐标系标定结果

Tab. 4 Calibration results of tool coordinate system

三次标定均值	
X/mm	0.9
Y/mm	122.6
Z/mm	-139.0

利用标定结果,可精准得出实测点在机器人基坐标系下的坐标,为后续加工过程的在位测量与误差补偿奠定基础。

3.2.2 机器人与测量系统坐标系标定

为实现加工过程中加工误差的在位精准测量与闭环补偿,需完成机器人基坐标系与被动跟踪测量系统坐标系的统一标定,核心目标是求解两坐标系之间的齐次变换矩阵 ${}^A_B T$ 。该矩阵为 4×4 维度,包含 12 个独立变换参数,两个坐标系下空间点齐次变换关系如下:

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \\ 1 \end{bmatrix} = {}^A_B T \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中: X_A, Y_A, Z_A 表示同一实测点在被动跟踪测量系统坐标系下的齐次坐标, X_B, Y_B, Z_B 表示该点在机器人基坐标系下的齐次坐标。

两坐标系间刚体变换矩阵的求解常用奇异值分解(SVD)方法。该方法具有数值稳定性强、无需直接进行矩阵求逆运算、天然满足刚体变换约束(旋转矩阵正交性、平移向量线性性)等显著优势,是目前求解坐标系间刚体变换关系的主流优选方案。其核心思路是利用两组公共点的坐标对应关系,先求解两坐标系点集的质心 $\overline{P_A}, \overline{P_B}$,并构建协方差矩阵 H ,通过对公共点集

的协方差矩阵 H 进行奇异值分解,即:

$$H = U \cdot \Sigma \cdot V^T, \quad (20)$$

其中: U 为 3×3 左正交矩阵,且满足 $U^T U = I$, 列向量为 HH^T 的特征向量; Σ 为 3×3 对角矩阵, 对角线上的元素为 H 的奇异值; V^T 为 3×3 右正交矩阵的转置, 且满足 $V^T V = I$, 列向量为 HH^T 的特征向量。

$$\begin{cases} R = V \cdot U^T \\ t = \overline{P_B} - R \cdot \overline{P_A} \end{cases} \quad (21)$$

依据式 (21), 分离提取两坐标系之间的旋转矩阵 R , 再通过求解两组公共点集质心的偏移量反推平移向量 t , 最终构建完整的齐次变换矩阵:

$${}^B_A T = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

本研究的标定流程如下: 通过示教模式控制机器人携带被动跟踪测量系统末端, 在空间中选择 5 个不共线的特征点作为标定公共点, 并记录每组公共点的双坐标系坐标数据: $P_i(P_{Ai}, P_{Bi})$, 其中 $P_{Ai}(X_{Ai}, Y_{Ai}, Z_{Ai})$ 为第 i 个公共点在测量系统坐标系下的坐标, 由测量系统直接高精度采集, $P_{Bi}(X_{Bi}, Y_{Bi}, Z_{Bi})$ 为该公共点在机器人基坐标系下的坐标, 通过机器人控制器反馈的末端法兰基坐标系坐标, 结合前文已标定的工具坐标系偏移量换算得到。将 5 组坐标代入 SVD 算法进行解算, 即可得到机器人基坐标系与被动跟踪测量系统坐标系间的齐次变换矩阵 ${}^B_A T$ 。

3.2.3 刀具坐标系标定

在机器人钻孔加工系统实际运行过程中, 刀具末端为真实切削作用点, 其与机器人末端法兰中心的相对位置精度直接决定钻孔加工位置精度。因此, 需预先完成刀具加工点相对于法兰中心偏移量 ${}^T_D T$ 的精准标定, 为加工轨迹的高精度控制提供基础保障。本次 ${}^T_D T$ 标定流程参考 3.2.1 节工具坐标四点标定的核心逻辑, 并结合本系统测量特性进行适配优化。

考虑到机器人控制器反馈的法兰中心位姿为理论值, 与实际位姿存在系统性偏差, 直接标定 ${}^T_D T$ 易引入误差。而经坐标系统一后, 被动跟踪测量系统可实现对工具坐标系实际位姿的高精度获取。

基于此, 采用“间接求解”的策略: 先通过测量获得刀具加工点相对于工具坐标系的偏移矩阵 ${}^P_D T$, 再结合工具坐标系与法兰中心的已知相对位姿关

系, 推导得到目标偏移量 ${}^T_D T$, 其数学关系式如下:

$${}^T_D T = {}^T_P T \times {}^P_D T = {}^T_P T \times \begin{bmatrix} {}^P_D R_2 - {}^P_D R_1 \\ {}^P_D R_3 - {}^P_D R_2 \\ {}^P_D R_4 - {}^P_D R_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^P_D P_1 - {}^P_D P_2 \\ {}^P_D P_2 - {}^P_D P_3 \\ {}^P_D P_3 - {}^P_D P_4 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

其中: ${}^T_P T$ 表示工具坐标系相对于法兰的齐次变换矩阵, ${}^P_D R_1 - {}^P_D R_4$ 表示四次工具坐标系中心的姿态旋转矩阵, ${}^P_D P_1 - {}^P_D P_4$ 表示四次工具坐标系中心的位置向量。

为降低随机误差对标定结果的影响, 按照上述间接标定方法对偏移量 ${}^T_D T$ 进行三次重复标定, 刀具坐标系标定结果如表 5 所示。

表 5 刀具坐标系标定结果

Tab. 5 Calibration results of tool coordinate system

方 向	三次标定均值
X/mm	0.4
Y/mm	111.7
Z/mm	45.7

取三次标定结果的均值作为最终偏移量输入机器人控制系统, 即可实现刀具加工点在测量系统坐标系下的高精度坐标映射, 为后续加工过程中刀具位姿的实时监测与误差补偿提供精准的坐标基准。

在完成上述标定工作后, 刀具加工点 D 在被动跟踪测量系统坐标系下的坐标 (X_D^A, Y_D^A, Z_D^A) 可由测量系统直接测得的被测点 P 坐标推导得到, 其数学表达式如下:

$$\begin{bmatrix} X_D^A \\ Y_D^A \\ Z_D^A \\ 1 \end{bmatrix} = {}^T_P T \cdot ({}^T_D T)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_P^A \\ Y_P^A \\ Z_P^A \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

其中: (X_P^A, Y_P^A, Z_P^A) 为被动跟踪测量系统直接采集得到的被测点 P 在自身坐标系下的实时坐标。

为便于后续误差补偿中理论位姿与实际位姿的对比, 将测量系统坐标系下 D 点坐标通过标定得到的齐次变换矩阵 ${}^B_A T$ 进行坐标转换, 即可得到 D 点在机器人基坐标系下的实际坐标 (X_D^B, Y_D^B, Z_D^B) , 其数学表达式如下:

$$\begin{bmatrix} X_D^B \\ Y_D^B \\ Z_D^B \\ 1 \end{bmatrix} = ({}^B_A T)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_D^A \\ Y_D^A \\ Z_D^A \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (25)$$

4 机器人位姿误差补偿

4.1 误差补偿模型

在完成机器人与测量系统的坐标系统一标定、工具坐标系及刀具坐标系标定后,被动跟踪测量系统可实时高精度采集加工过程中机器人末端,即刀具加工中心点的实际位姿信息。本研究设定机器人第6关节转角 $\theta = 90^\circ$,以约束末端扭转自由度。以 $P_M(X_M, Y_M, Z_M)$ 和 $R_M(\omega_{xM}, \omega_{yM}, \omega_{zM})$ 分别表示加工过程中机器人的实际坐标与姿态,给定加工过程中机器人的理论坐标 $P_N(X_N, Y_N, Z_N)$ 和姿态 $R_N(\omega_{xN}, \omega_{yN}, \omega_{zN})$,则机器人的位置误差表示为:

$$\delta P = (X_N - X_M, Y_N - Y_M, Z_N - Z_M). \quad (26)$$

机器人的姿态误差表示为:

$$\delta R = (\omega_{xN} - \omega_{xM}, \omega_{yN} - \omega_{yM}, \omega_{zN} - \omega_{zM}). \quad (27)$$

基于上述误差模型,构建实时闭环补偿策略,通过被动跟踪测量系统的在位测量数据动态解算位姿误差,并将误差补偿量反馈至机器人控制器,实现机器人末端位姿的实时修正,从而保障精密钻孔加工需求。

加工过程中,刀具末端为实际切削作用点,加工精度的保障依赖于刀具坐标系 $O_D-X_DY_DZ_D$ 下的位姿精准修正,而非测量系统直接输出的测量点误差。因此,需将测量系统输出的测量点位置误差 δP_P 和姿态误差 δR_P 转换为刀具坐标系下加工点的等效误差 δP_D 和 δR_D ,再基于该等效误差实施精准补偿。

由于刀具与被动跟踪测量系统均直接固定于机器人末端,三者构成刚性连接体,工作过程中无相对运动,满足刚体变换约束。基于此刚体假设,刀具坐标系的实际姿态,理论姿态的相对关系,与测量系统坐标系相对机器人末端坐标系的姿态关系保持一致。

当系统仅存在位置误差而无姿态误差时,测量系统输出的测量点位置误差 δP_P 可直接等效为刀具坐标系下的位置补偿量 δP_D ,即 $\delta P_P = \delta P_D$ 。但若系统同时存在位置误差 δP_P 与姿态误差 δR_P ,测量点与刀具末端加工点并非同一点,若直接将测量系统输出的位姿误差 δR_P 用于补偿,姿态修正过程中将绕测量点旋转,进而导致刀具末端加工点 O'_D 与理论加工点 O''_D 产生附加偏差

δP_E ,如图8所示。因此,测量系统输出的位置误差无法直接等效为刀具坐标系下的位置补偿量,需进行误差转换。

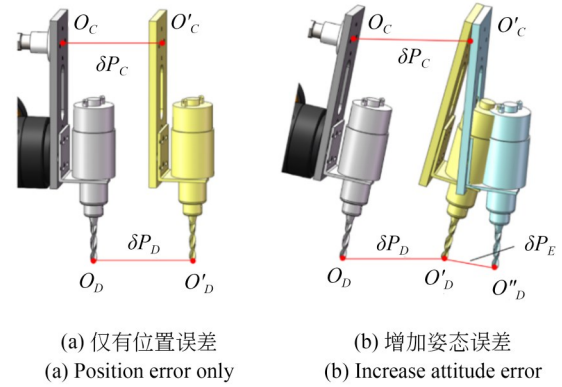


图 8 误差对位置误差的影响

Fig. 8 Impact of error on position error

测量系统输出的位置误差 δP_C 与刀具坐标系下实际所需补偿位置误差 δP_D 的差值 $\Delta P = \delta P_D - \delta P_C$,可通过分解各坐标轴方向的位置误差分量与姿态误差分量计算得到。设测量点与刀具加工点之间的固定偏移向量为 $r = (r_x, r_y, r_z)$,当系统存在姿态误差 δR_C 时,该姿态误差会使固定偏移向量产生附加位移,且该附加位移即为 ΔP ,满足 $\Delta P = \delta R_C \times r$,将其按坐标分量展开,即可得耦合关系式如下:

$$\begin{cases} \Delta P_x = r_z \times \delta R_{CY} \\ \Delta P_y = r_x \times \delta R_{CZ} - r_z \times \delta R_{CX} \\ \Delta P_z = -r_x \times \delta R_{CY} \end{cases} \quad (28)$$

由于测量点与加工点均固定于机器人末端法兰,Y方向安装偏移量极小,由此产生的附加偏差可忽略不计,故补偿计算中可省略Y方向偏移量的影响项。

4.2 误差补偿流程

影响加工系统加工精度的核心误差为位置误差与姿态误差,其中位置误差可由被动跟踪测量系统直接采集获取,姿态误差则需基于测量系统输出数据,经坐标转换及复杂解算间接推导得到。此类复杂运算不仅易引入计算错误风险,还会延长补偿响应时间,导致补偿动作滞后于加工流程。基于此,本研究确定“先姿态补偿,后位置补偿”的分步补偿策略,其核心逻辑为:先完成姿

态误差的精准补偿,使姿态偏差引发的附加位置偏差趋近于零,再对位置误差实时针对性补偿,以此规避误差耦合运算对补偿精度和实时性的不利影响。

具体补偿流程如下:被动跟踪测量系统实时采集测量得到位置误差 δP_D 和姿态误差 δR_D 后,需将补偿量反馈至机器人控制器。根据误差理论可知,理想补偿值为误差值的相反数,即理论补偿值为 $-\delta P_D, -\delta R_D$ 。但补偿对象为机器人末端姿态而非机器人自身内部的误差源,受机器人本体制造、装配等固有误差影响,其执行补偿指

令时存在运动误差,导致实际补偿值与理论补偿量存在偏移。

因此,补偿过程需引入阈值判定机制。首先对姿态误差 δR_D 进行多轮循环补偿,直至其绝对值小于预设姿态补偿阈值 ΔR ;此时姿态偏差引发的附加位置偏差可忽略不计,测量系统输出的位置误差 δP_C 与刀具坐标系下实际所需补偿的位置误差 δP_D 趋于一致,继而对位置误差 δP_D 开展循环补偿,直至其绝对值小于预设位置补偿阈值 ΔP ,至此完成全流程误差补偿。补偿流程如图9所示。

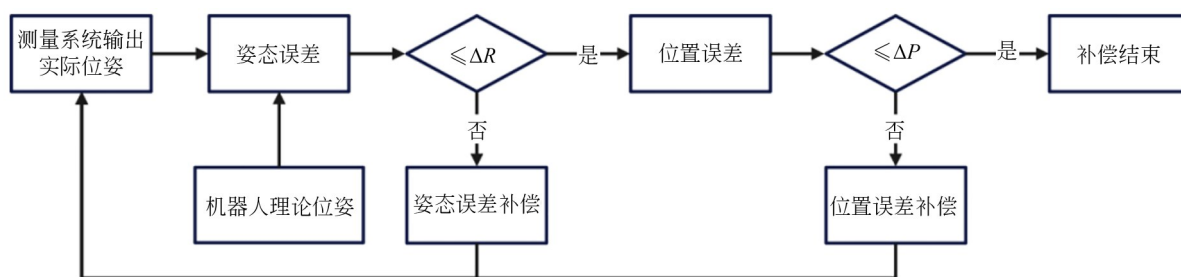


图9 补偿流程

Fig. 9 Flow chart of error compensation

5 实验

5.1 钻孔实验设计

为验证误差补偿方法对系统钻削精度的提升效果,基于搭建的机器人钻削系统开展对比钻削实验。实验以有机玻璃为加工试件,共加工8个直径为3 mm、深度为4 mm的孔。各孔的分布尺寸如图10所示。

实验采用分组对比方案:孔1~4为无补偿加

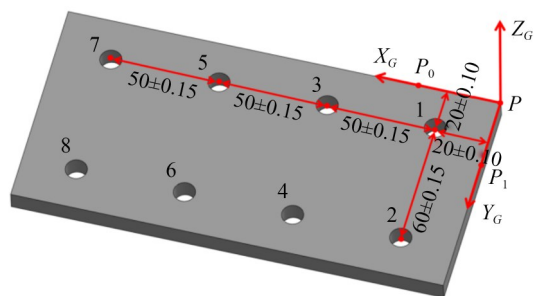


图10 被加工件示意图

Fig. 10 Schematic diagram of machined parts

工组,孔5~8为补偿加工组,借助被动跟踪测量系统实现加工过程的在位测量与误差补偿。

正式加工前,需完成工件坐标系的标定。采用三点标定法实现,通过示教方式操控刀具末端,即加工点,依次与被加工件的一角顶点 P ,顶点 P 相邻两条边线上的特征点 P_0, P_1 精准接触。以顶点 P 点为工件坐标系原点,向量 $\overrightarrow{PP_0}$ 为 X 轴正方向,向量 $\overrightarrow{PP_1}$ 为 Y 轴正方向,结合右手定则确定 Z 轴正方向。由于标定过程中涉及的特征点 P, P_0, P_1 的坐标均基于机器人基坐标系获取,据此可解算得到机器人基坐标系与工件坐标系之间的齐次转换矩阵 ${}^G_B T$,为后续加工位置的坐标映射提供基础。

工件坐标系标定完成后,首先开展孔1~4的无补偿加工。实验选用3.5 mm双槽的硬质麻花钻头搭配B10夹头作为切削工具,设定加工参数为:主轴转速9 000 r/min,进给速度为30 mm/min。加工过程需保证切削方向垂直于加工平面,即机器人末端法向量与加工平面法向量严格一致。各孔的加工位置坐标 $P_{Gi} (X_{Gi}, Y_{Gi}, Z_{Gi})$ 均由预设

加工需求确定,其在机器人基坐标系下的坐标 $P_{Bi}(X_{Bi}, Y_{Bi}, Z_{Bi})$ 为:

$$\begin{bmatrix} X_{Bi} \\ Y_{Bi} \\ Z_{Bi} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^G_B T \begin{bmatrix} X_{Gi} \\ Y_{Gi} \\ Z_{Gi} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

该组加工虽无需被动跟踪测量系统采集数据,但为保证两组实验的负载一致性,避免负载差异对机器人运动精度产生干扰,仍将被动跟踪测量系统固定于机器人末端。

随后开展孔 5~8 的补偿加工。为简化补偿流程并提升加工效率,实验采用定点补偿策略。在各孔预设加工位置上方 2 mm 处设置补偿基准点,于该点执行前文提出的位姿误差循环补偿流程。阈值选取方面,本系统选用的机器人重复定位精度为 ± 0.02 mm,且经过标定与误差补偿之后,被动跟踪测量系统的测量精度可达 0.04 mm。为保证误差补偿的有效性与收敛稳定性,位置补偿阈值 ΔP 需略高于测量系统极限误差,故选定 $\Delta P = 0.05$ mm。为控制钻孔位置误差与孔轴线垂直度误差,并兼顾机器人自身控制精度,将姿态补偿阈值设定为 $\Delta R = 0.5'$,以保证钻孔精度处于受控状态。当被动跟踪测量系统检测到钻孔系统的实时位置误差与姿态误差均低于对应阈值时,方可启动钻削加工。

5.2 实验结果

对有机玻璃材料进行钻削实验,如图 11 所示。在执行孔 5~8 的钻削工艺之前,对钻孔系统的误差进行了循环补偿。只有当钻孔系统的定

位和定向误差均低于补偿阈值的时候,才开始加工。在孔 5~8 加工过程中,由测量系统所测量得到的各个点位的机器人位置误差与姿态误差如表 6 所示。在补偿效率方面,经过实验统计,针对孔 5~8 的加工点位,平均每个孔位需要进行约 4 次姿态补偿迭代与 2.75 次位置补偿迭代,即可达到阈值要求。钻孔系统补偿后的定位和定向误差均有明显减小, X, Y, Z 方向的平均定位误差由原来的 1.159, 0.556, 0.451 mm, 降至 0.016, 0.017, 0.011 mm。同时, R_x, R_y, R_z 角的平均定向误差从 0.984, 1.148, 0.869° 减小到 0.218, 0.119, 0.169°。

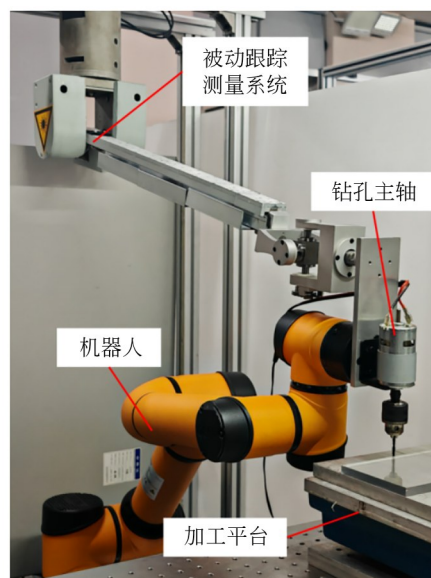


图 11 钻削实验示意图

Fig. 11 Schematic diagram of drilling experiment

表 6 机器人位置与姿态误差
Tab. 6 Robot position and attitude error

钻孔 序号	补偿前位置误差/mm (X, Y, Z)	补偿后位置误差/mm (X, Y, Z)	补偿前姿态误差/(°) (RX, RY, RZ)	补偿后姿态误差/(°) (RX, RY, RZ)
5	(1.26, -0.76, 0.60)	(0.02, 0.01, 0.01)	(-1.20, 0.85, 0.81)	(0.26, 0.11, 0.13)
6	(1.03, -0.65, 0.45)	(0.01, -0.03, 0.01)	(-1.04, 1.32, 0.76)	(-0.10, 0.10, -0.12)
7	(1.35, -0.48, 0.41)	(0.02, -0.01, -0.01)	(-0.98, 1.06, 0.90)	(0.31, 0.14, -0.22)
8	(1.00, 0.34, 0.35)	(0.03, 0.02, 0.02)	(-0.71, 1.36, 1.02)	(-0.21, 0.14, 0.21)

完成加工过程后,使用型号为爱德华 686 三坐标测量机(精度为 $(2.4 + L/300)\mu\text{m}$, 测量范围为 $600 \times 800 \times 600$ mm)测量每个钻孔相对于

工件坐标系的位置误差,测量结果如表 7 所示。结果表明,在采用误差补偿方法加工时,加工精度得到了明显的提升,在 1~4 号孔与 5~8 号孔的

表 7 加工孔位置测量

Tab. 7 Measurement of processing hole position(mm)

钻孔 序号	X方向 坐标	X方向 误差	Y方向 坐标	Y方向 误差
1	25.77	0.77	20.52	0.52
2	25.90	0.90	80.76	0.76
3	75.74	0.74	20.99	0.99
4	76.22	1.22	81.02	1.02
5	125.11	0.11	19.91	-0.09
6	125.10	0.10	80.06	0.06
7	174.91	-0.09	20.12	0.12
8	175.10	0.10	80.17	0.17

对比实验中形成了鲜明的对比。加工孔的定位误差计算公式为:

$$e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}. \quad (30)$$

结合表 7 数据,经计算可得,加工孔平均定位误差由 1.23 mm 减小至 0.15 mm。补偿后,在 X 方向的平均定位误差为 0.10 mm,在 Y 方向的平均定位误差为 0.11 mm。结果表明,本文所提出的误差补偿方法可以在机器人加工过程中有效提升加工精度。

6 结 论

本文针对机器人作业过程中运动误差的在位测量与精准补偿需求,将被动跟踪测量系统

与遨博 i5 机器人集成,构建了一套高精度的机器人钻孔加工系统,实现了机器人末端位姿的实时、在位高精度测量。针对测量系统自身的固有几何误差,提出直接测量与空间圆平面非线性拟合相结合的复合误差校正方法,辨识并补偿系统误差,使测量系统的测量精度提升至 0.04 mm。构建基于被动跟踪测量的钻孔加工闭环系统,设计“先姿态、后位置”的位姿误差循环补偿策略,通过有序迭代修正有效抑制加工过程中的位姿误差。以有机玻璃为试件开展钻孔对比实验,结果表明,钻孔定位误差由未补偿时的 1.23 mm 降至补偿后的 0.15 mm,加工精度得到显著提升。未来可进一步探索多级伸缩结构或测量臂加长方案,以扩大系统的测量范围,提升其对更大工作空间机器人作业的适配能力。

作者贡献声明:

计 韬:测量方法提出,论文构思与撰写;

贾 雪:实验设计及数据整理与分析;

杨宇翔:实验数据整理与分析;

张记云:方法论,论文修改;

焦少伟:测量方法优化,论文修改;

裴宇航:论文图表制作与校对;

姜志峰:研究方案统筹,实验指导与数据分析,论文审核。

参考文献:

- [1] CAI Q X, HAN J M, ZHOU X, *et al.* A comprehensive review of human-robot collaborative manufacturing systems: technologies, applications, and future trends [J]. *Sustainability*, 2026, 18 (1): 515.
- [2] GAO Y H, QIU T Y, SONG C, *et al.* Optimizing the performance of serial robots for milling tasks: a review[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2025, 94: 102977.
- [3] 王耀南, 谢核, 邓晶丹, 等. 智能制造测量机器人关键技术研究综述[J]. *机械工程学报*, 2024, 60 (16): 1-18.
- [4] 刘伟, 刘顺, 邓朝晖, 等. 工业机器人定位误差补偿技术研究进展[J]. *机械工程学报*, 2023, 59 (17): 1-16.
- [5] 文科, 张加波, 乐毅, 等. 数控驱动的移动铣削机器人精度提升方法[J]. *机械工程学报*, 2021, 57 (5): 72-80.
- [6] WEN K, ZHANG J B, LE Y, *et al.* Method for improving accuracy of NC-driven mobile milling robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(5): 72-80. (in Chinese)
- [7] LIU W, LIU SH, DENG ZH H, *et al.* Research progress on positioning error compensation technology of industrial robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(17): 1-16. (in Chinese)
- [8] gent manufacturing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(16): 1-18. (in Chinese)

- [6] DAMBLY V, OLIVIER B, RIVIÈRE-LORPHEVRE E, *et al.* Iterative offline trajectory correction based on dynamic model for compensating robot-dependent errors in robotic machining[J]. *Robotics and Computer—Integrated Manufacturing*, 2025, 94: 102960.
- [7] ZHANG Q L, GAO G B, LI Y J, *et al.* A sensor-free kinematic calibration method for robots using virtual spherical constraints [J]. *Measurement*, 2025, 256: 118420.
- [8] 崔远驰, 张嵩, 唐晗, 等. 中国仪器产业发展: 现状, 挑战及展望[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(13): 1965-2003.
- CUI Y CH, ZHANG S, TANG H, *et al.* Domestic instrument industry in China: progress, challenges and outlooks[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(13): 1965-2003. (in Chinese)
- [9] NGUYEN V, CVITANIC T, BAXTER M, *et al.* Precision robotic milling of fiberglass shims in aircraft WingAssembly using laser tracker feedback [J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2022, 15(1): 87-97.
- [10] 曲巍巍, 董辉跃, 柯映林. 机器人辅助飞机装配制孔中位姿精度补偿技术[J]. *航空学报*, 2011, 32(10): 1951-1960.
- QU W W, DONG H Y, KE Y L. Pose accuracy compensation technology in robot-aided aircraft assembly drilling process [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(10): 1951-1960. (in Chinese)
- [11] 李文龙, 蒋诚, 徐伟, 等. 应用李群封闭光滑特性的机器人跟踪/测量-加工一体化: I 系统标定与轨迹生成[J]. *机械工程学报*, 2025, 61(20): 1-15.
- LI W L, JIANG CH, XU W, *et al.* Integration of robotic tracking/measuring-machining applying the closed and smooth properties of lie groups: I system calibration and path generation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2025, 61(20): 1-15. (in Chinese)
- [12] 李文龙, 蒋诚, 徐伟, 等. 应用李群封闭光滑特性的机器人跟踪/测量-加工一体化: II 闭环控制与试验验证[J]. *机械工程学报*, 2025, 61(20): 16-29.
- LI W L, JIANG CH, XU W, *et al.* Integration of robotic tracking/measuring-machining applying the closed and smooth properties of lie groups: II closed-loop control and experiment validation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2025, 61(20): 16-29. (in Chinese)
- [13] 史晓佳, 张福民, 曲兴华, 等. KUKA 工业机器人位姿测量与在线误差补偿[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(8): 1-7.
- SHI X J, ZHANG F M, QU X H, *et al.* Position and attitude measurement and online errors compensation for KUKA industrial robots[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(8): 1-7. (in Chinese)
- [14] 殷雷, 耿涵涵, 孙静波, 等. 光学-惯性混合位姿跟踪系统设计[J]. *液晶与显示*, 2025, 40(12): 1905-1916.
- YIN L, GENG H H, SUN J B, *et al.* Design of optical inertial hybrid pose tracking system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(12): 1905-1916. (in Chinese)
- [15] MAGHAMI A, KHOSHDARREGI M. Vision-based target localization and online error correction for high-precision robotic drilling [J]. *Robotica*, 2024, 42(9): 3019-3043.
- [16] 史艳琼, 闵想, 戴尔愉, 等. 可重构三维测量系统在工业机器人定位误差补偿中的应用研究[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(22): 3502-3524.
- SHI Y Q, MIN X, DAI E Y, *et al.* Application of reconfigurable 3D measurement system in the compensation of industrial robot localization error[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(22): 3502-3524. (in Chinese)
- [17] 邱红采, 彭芳瑜, 唐小卫, 等. 机器人铣削加工误差视觉跟踪测量与补偿研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(14): 35-43.
- DI H C, PENG F Y, TANG X W, *et al.* Research on vision tracking measurement and compensation of robot milling error [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(14): 35-43. (in Chinese)
- [18] 姜志峰, 耿万佳, 张记云, 等. 被动式激光跟踪测量方法及其误差补偿技术[J]. *计测技术*, 2021, 41(5): 34-41.
- LOU ZH F, GENG W J, ZHANG J Y, *et al.* Passive laser tracking measurement method and error compensation technology [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2021, 41(5): 34-41. (in Chinese)
- [19] ZHANG J Y, LOU Z F, FAN K-CH. Accuracy

- improvement of a 3D passive laser tracker for the calibration of industrial robots [J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2023, 81: 102487.
- [20] 陈天赐, 张记云, 鄂云亮, 等. 基于空间网格的三维激光球杆仪系统误差标定[J]. 仪表技术与传感器, 2023(9): 46-51.
- CHEN T C, ZHANG J Y, E Y L, *et al.* System error calibration of 3D laser ball bar based on space grid [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2023 (9): 46-51. (in Chinese)
- [21] ZHANG J Y, LOU Z F, E Y L, *et al.* 3-D passive scale tracking method for measuring motion errors of industrial robots[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1002011.
- [22] 林钰淇, 张记云, 任伟鹏, 等. 基于旋量理论的被动式跟踪测量系统误差分析与补偿[J]. 仪器仪表与分析监测, 2023, (1): 19 - 26.
- LIN Y Q, ZHANG J Y, REN W P, *et al.* Error analysis and compensation of passive tracking measurement system based on screw theory[J]. *Instrumentation Analysis Monitoring*, 2023, (1): 19 - 26. (in Chinese)
- [23] 郭文婷, 陈东生. 基于虚拟基准点的多测头 TCP 标定方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(1): 106-113.
- GUO W T, CHEN D SH. TCP calibration method for multiple probes based on virtual reference points [J]. *Computer Measurement & Control*, 2025, 33(1): 106-113. (in Chinese)

作者简介:



计 韬(2001—),男,山西朔州人,硕士研究生,2023年于太原科技大学获得学士学位,主要从事装备精度测量与误差补偿技术的研究。E-mail:jitao0408@163.com

通讯作者:



娄志峰(1978—),男,黑龙江肇东人,副教授,1999年、2008年于大连理工大学分别获得学士和博士学位,研究方向为微小组件自动装配技术、数控机床误差测量与补偿技术等。E-mail:louzf@dlut.edu.cn