

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.029

被动式位姿跟踪测量系统误差参数标定及补偿

鄂云亮,张记云,娄志峰,李伟峰,周竞杰,田云飞

(大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:被动式位姿跟踪测量系统是一种用于测量机器人末端位置与姿态的自研测量设备。使用多体系理论对测量系统进行误差建模,提出基于平面圆轨迹的误差参数非线性优化辨识方法,将误差参数带入补偿模型进行系统空间定位精度验证。实验结果表明,测量点到圆心的距离与标准圆半径的误差值在误差参数补偿前和补偿后分别为 0.38 mm 和 0.05 mm,证实被动式位姿跟踪测量系统可以实现精准测量。

关键词:被动跟踪测量;误差模型;参数辨识;空间精度

中图分类号:TH721 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0148-04

Error Parameter Calibration and Compensation for Passive Pose Tracking Measurement Systems

E Yunliang, Zhang Jiyun, Lou Zhifeng, Li Weifeng, Zhou Jingjie, Tian Yunfei

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The passive pose tracking measurement system is a self-developed measurement device used to measure the position and orientation of a robot end-effector. This article uses the theory of multi-body systems to establish an error model of the measurement system and proposes a nonlinear optimization identification method for error parameters based on planar circular trajectories. The identified error parameters are incorporated into the compensation model to verify the spatial positioning accuracy of the system. The experimental results show that the error between the distance from the measurement point to the center of the circle and the standard circle radius is 0.38 mm before compensation and 0.05 mm after error parameter compensation, confirming that the passive pose tracking measurement system can achieve accurate measurement.

Keywords: passive tracking measurement; error model; parameter identification; spatial accuracy

0 引言

随着工业自动化的快速发展,工业机器人在工业生产中应用越来越广泛^[1]。目前最常用来标定校准工业机器人的测量仪器为激光跟踪仪。激光跟踪仪是采用伺服电机驱动,以主动跟踪的方式来获得目标位置的距离与角度信息,经过转换关系获得目标的空间坐标信息。采用激光跟踪仪来对工业机器人的末端位置进行测量并进行误差补偿^[2-4],或者是对机器人运动位姿进行实时在线补偿,是提高工业机器人绝对定位精度的有效途径^[5-7]。Ying等^[8]建立了轴系偏心误差的数学模型,对轴系偏心误差产生的测量误差进行了仿真分析,为提高激光跟踪仪的测量精度提供了理论依据。Zhang等^[9]对激光跟踪仪反射镜倾斜误差、光束倾斜误差及轴系倾斜误差进行了分析,并

提出了对这些单项误差进行标定的测量方法。Conte等^[10]基于Denavit-Hartenberg方法提出一种新的激光跟踪仪运动误差模型,并使用这个误差模型对激光跟踪仪进行了标定。

激光跟踪仪的内部系统比较复杂,误差参数比较多,误差参数辨识难度较大,为研制一款操作简便、成本低廉及环境要求较低的机器人测量仪器,本文设计了一种用于测量机器人末端位姿的被动式三维空间测量仪器。根据多体理论的方法建立了系统的理论误差模型。分析测量系统各项误差对于最终测量结果的影响。最终通过采用平面约束的方式基于几何误差模型非线性优化误差辨识的方法对各个单项误差进行标定,实现设备系统误差的精确标定与补偿,提升了设备的测量精度。

基金项目:国家自然科学基金项目(52275521)

第一作者简介:鄂云亮(1999—),男,辽宁大连人,硕士研究生,研究方向为精密仪器研制,eyl0214@163.com。

1 被动式位姿跟踪测量原理及误差模型

1.1 位姿原理测量原理

被动式位姿跟踪测量仪结构如图1所示,主要由精密二维转台、伸缩机构及姿态测量机构所组成。精密二维转台是整个测量系统的基座,竖直轴垂直于地面,水平轴与竖直轴垂直相交,其中有两个圆光栅分别测量竖直轴偏摆角 θ 和水平轴俯仰角 φ 。伸缩机构与精密二维转台固连,其是由滑块、线性导轨、直线光栅尺和光栅读数头所组成,基准激光束从精密二维转台竖直轴与水平轴的交点处发出,在伸缩机构末端有位置敏感探测器(PSD)用于测量伸缩机构在运动过程中的直线度变化,伸缩机构的伸长量 R_i 由直线光栅尺测量得到。

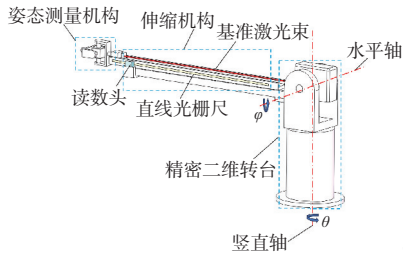


图1 被动式位姿跟踪测量仪结构示意图

在位置测量过程中,在获得了测量点在球坐标系下的位置信息 (R, θ, φ) 之后。通过笛卡儿坐标系与球坐标系的转换关系如式(1)所示,就可以得到测量位置的空间位置信息

$$\begin{cases} x = R \cos \varphi \cos \theta \\ y = R \cos \varphi \sin \theta \\ z = R \sin \varphi \end{cases} \quad (1)$$

理想情况下,机器人末端姿态(不考虑滚转姿态)由3部分组成:机器人坐标系与测量系统坐标系的旋转变换角度;测量系统的方位角和俯仰角;姿态模块的俯仰角和偏摆角。机器人的姿态角 $^{[11]}$ W 和 V 如式(2)所示

$$\begin{cases} V = R_y + \varphi + \psi \\ W = R_z + \theta + \omega \end{cases} \quad (2)$$

姿态测量机构的结构如图2所示,主要由连接杆、下U形块、方形连接块、姿态俯仰角编码器、上U形块、回转轴以及姿态偏摆角编码器所组成。

1.2 误差建模

在分析被动式位姿跟踪系统的各项误差,对

测量结果的影响过程中,使用多体系统理论 $^{[12-13]}$ 。测量系统的拓扑结构如图3所示,包含的坐标系有基座坐标系、偏摆角转台坐标系、俯仰角转台坐标系、十字轴中心坐标系。

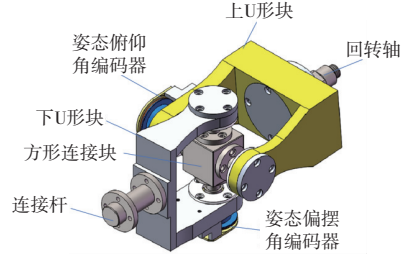


图2 姿态测量机构的结构图

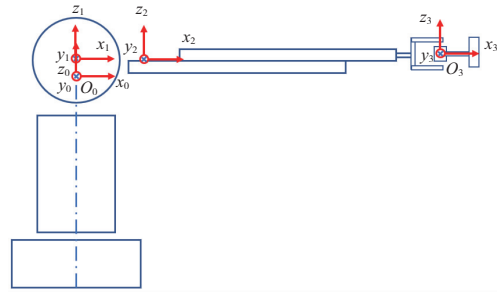


图3 被动式位姿跟踪测量仪拓扑结构图

在测量过程中,可以将测量系统的运动分解为竖直轴、水平轴、伸缩机构以及姿态测量机构绕着 z_0 轴进行旋转,旋转的角度为偏摆角 θ ,偏摆角 θ 的正方向符合右手定则;接下来水平轴、伸缩轴和姿态测量机构绕着 y_1 轴旋转,旋转角度为俯仰角 φ ,俯仰角 φ 的正方向与右手定则相反;伸缩机构和姿态测量机构沿着 x_2 轴移动。通过齐次坐标变换的方法将设备末端坐标系 $O_3-x_3y_3z_3$ 的原点转换到基准坐标系 $O_0-x_0y_0z_0$ 中如式(3)所示

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{bmatrix} = T_{01} \times T_{12} \times T_{23} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

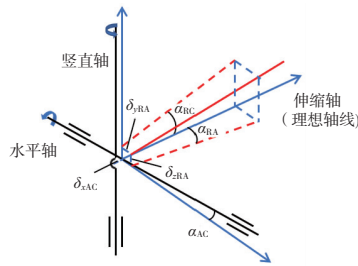
式中:

$$T_{01} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

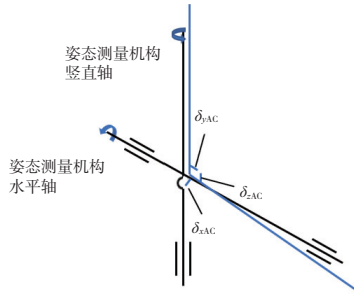
$$T_{12} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R_0 + R_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

影响末端位置测量结果的误差如图4所示主要有:精密二维转台水平轴(A轴)与竖直轴(C轴)之间的垂直度误差(α_{AC});水平轴与竖直轴中心线偏移误差(δ_{xAC});伸缩轴(R轴)与转台水平轴的垂直度误差(α_{RA});伸缩轴(R轴)与转台竖直轴的垂直度误差(α_{RC});两个中心线偏移误差(δ_{yRA} 和 δ_{zRA});伸缩机构在运动过程中两个直线度误差($\delta_y(R)$ 和 $\delta_z(R)$);姿态测量机构的水平轴(A轴)竖直轴(C轴)之间的离轴量(δ_{xAC} 、 δ_{yAC} 、 δ_{zAC})。



(a) 精密二维转台及伸缩轴之间的主要误差



(b) 万向节姿态测量机构的主要误差

图4 影响末端位置测量结果的误差

考虑到系统存在的各项误差对测量结果的实际影响,实际将设备末端坐标系 $O_3-x_3y_3z_3$ 的原点如式(4)表示

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{bmatrix} = T_{01} \times \Delta E_{01} \times T_{12} \times \Delta E_{12} \times T_{23} \times \Delta E_{23} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:

$$\Delta E_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_{xAC} \\ 0 & 1 & -\alpha_{AC} & 0 \\ 0 & \alpha_{AC} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta E_{12} = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{RA} & \alpha_{RC} & 0 \\ \alpha_{RA} & 1 & 0 & \delta_{yRC} + \delta_y(R) \\ -\alpha_{RC} & 0 & 1 & \delta_{zRA} + \delta_z(R) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta E_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_{xAC} \\ 0 & 1 & 0 & \delta_{yAC} \\ 0 & 0 & 1 & \delta_{zAC} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2 基于误差模型的非线性优化误差参数辨识

2.1 辨识方法

如图5为标准圆轨迹发生器结构,该装置由驱动电机提供动力,通过减速机和联轴器带动回转臂进行圆周运动;回转臂上的固定底座与被动式位姿跟踪测量仪的末端相连,由此实现对测量仪的平面约束。

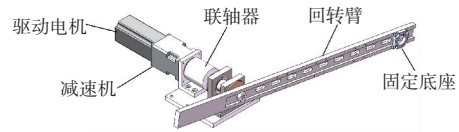


图5 标准圆轨迹发生器结构图

2.2 辨识原理

在三维空间中一个圆平面可以视为是由一个球面与一个平面相交得到。所以平面约束方程可以由一个平面方程与一个球面方程联立的结果。如式(5)所示

$$\begin{cases} \sqrt{(X_p - C_x)^2 + (Y_p - C_y)^2 + (Z_p - C_z)^2} - R = 0 \\ aX_p + bY_p + cZ_p + 1 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: X_p, Y_p, Z_p 即是前文中设备末端坐标系 $O_3-x_3y_3z_3$ 的原点坐标; R 为标准圆轨迹的半径; C_x, C_y, C_z 为标准圆轨迹圆心坐标; a, b, c 为空间平面方程的系数。

此时在这一标定位置上,如果采集到 n 个测量点,通过式(5)就可以得到 $2n$ 个方程如式(6)所示

$$\begin{cases} \sqrt{(X_{p1} - C_x)^2 + (Y_{p1} - C_y)^2 + (Z_{p1} - C_z)^2} - R = 0 \\ aX_{p1} + bY_{p1} + cZ_{p1} + 1 = 0 \\ \sqrt{(X_{p2} - C_x)^2 + (Y_{p2} - C_y)^2 + (Z_{p2} - C_z)^2} - R = 0 \\ aX_{p2} + bY_{p2} + cZ_{p2} + 1 = 0 \\ \vdots \\ \sqrt{(X_{pn} - C_x)^2 + (Y_{pn} - C_y)^2 + (Z_{pn} - C_z)^2} - R = 0 \\ aX_{pn} + bY_{pn} + cZ_{pn} + 1 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

在每个位置的标定过程中,标准圆轨迹圆心坐标和空间平面方程的系数均为未知数,因此需要求解的未知向量如式(7)所示

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} \alpha_{AC}, \delta_{xAC}, \alpha_{RA}, \delta_{zRA}, \alpha_{RC}, \delta_{yRC}, \delta_{xAC}, \delta_{yAC}, \delta_{zAC}, \\ R_0, R, C_x, C_y, C_z, a, b, c \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

求解的未知参数向量 $\boldsymbol{\Omega}$ 总共有17个参数,其中:被动式位姿跟踪测量仪有10项参数,包括9项轴系相关误差和伸缩机构初始长度;第11项参数是标准圆轨迹半径;后6项是空间圆平面位置相关的参数。

在实验过程中通过式(6)所建立的约束,令 $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{\Omega}) = [f_1, g_1, \dots, f_n, g_n]^T$ 并构建目标函数式(8),将原非线性超定方程组求解问题转化为非线性最小二乘问题

$$\min_{\boldsymbol{\Omega} \in R^{17}} S(\boldsymbol{\Omega}) = \frac{1}{2} \boldsymbol{F}(\boldsymbol{\Omega})^T \boldsymbol{F}(\boldsymbol{\Omega}) \quad (8)$$

L-M算法可以解决算法不收敛的问题,所以选择L-M算法来对式(8)所示,非线性最小二乘问题进行迭代求解。

3 实验及结果

在标定过程中为保证圆轨迹发生器尽可能匀速稳定,实验装置如图6所示。在整个标准圆轨迹上采集约800个测量点,均匀选择其中300个点作为标定点,代入标定算法中求解单项误差值。

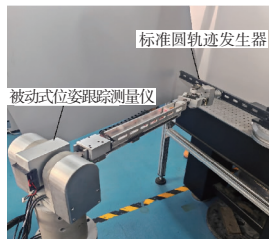


图6 被动式位姿跟踪测量仪标定实验装置

按照非线性优化误差参数辨识标定原理调整实验装置的位置进行实验,最终得到的实验结果如表1所示。

表1 标定实验结果

单项误差项	标定实验结果	单项误差项	标定实验结果
$\delta_{xAC}/\mu\text{m}$	-127.50	$\alpha_{RC}/(^{\circ})$	178.30
$\alpha_{AC}/(^{\circ})$	430.90	R_0/mm	636.99
$\delta_{yRC}/\mu\text{m}$	-109.20	$\delta_{xAC}/\mu\text{m}$	85.28
$\delta_{zRA}/\mu\text{m}$	-416.40	$\delta_{yAC}/\mu\text{m}$	50.50
$\alpha_{RA}/(^{\circ})$	150.80	$\delta_{zAC}/\mu\text{m}$	-107.70

将求解出来的单项误差参数代入误差模型,对圆轨迹进行重新测量,得到实际测量点到标准圆圆心之间距离和标准半径的误差值,结果如图7所示。标定范围内,补偿前和补偿后的误差值分别为0.38 mm和0.05 mm,误差模型的补偿率达到了86.8%,测量系统的精度得到了显著提高,证实了被动式位姿跟踪测量系统的测量性能。

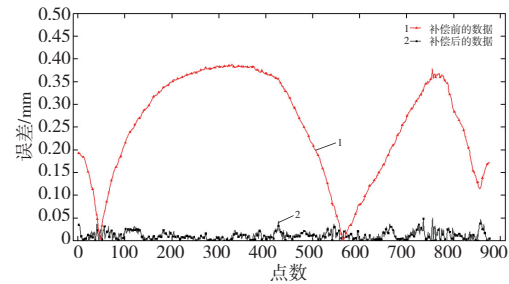


图7 实际测量点到标准圆圆心之间距离和标准半径的误差值

4 结语

本文介绍了一种用于测量机器人末端位姿的被动式位姿跟踪测量系统,建立了测量系统的误差模型。利用标准圆轨迹发生器提供平面约束,提出了基于测量系统几何误差模型的非线性优化误差辨识算法,实现了系统误差参数的精确求解。

参考文献:

- [1] Karabegović I, Turmanidze R, Dašić P. Robotics and automation as a foundation of the fourth industrial revolution - industry 4.0 [M]//Advanced Manufacturing Processes. Cham: Springer International Publishing, 2020: 128-136.
- [2] Du L, Zhang T, Dai X L. Compliance error calibration for robot based on statistical properties of single joint[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(4): 1861-1868.
- [3] Xu K, Xu S, Qi Q. Research on high-precision positioning method of robot based on laser tracker[J]. Intelligent Service Robotics, 2023, 16(3): 361-371.
- [4] Li R, Ding N, Zhao Y, et al. Real-time trajectory position error compensation technology of industrial robot[J]. Measurement, 2023, 208: 112418.
- [5] Zhao D, Dong C L, Guo H, et al. Kinematic calibration based on the multicollinearity diagnosis of a 6-DOF polishing hybrid robot using a laser tracker[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 5602397.

(下转第194页)

实验结果表明:电信号传输元件 x 方向、 y 方向装配尺寸偏差最大为 $36.4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $37.8\text{ }\mu\text{m}$;光电接收元件在 x 方向、 y 方向装配尺寸偏差最大为 $24.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $39.6\text{ }\mu\text{m}$;光源元件 x 方向装配尺寸偏差最大为 $29.6\text{ }\mu\text{m}$ 。各元件装配结果均满足装配要求。

4 结语

本文将机械臂的灵活性与微动滑台的高精度相结合,建立了集成机械臂的分离式构型精密微装配系统,并设计了可配置的并行气动零件吸附阵列,其末端可更换异型吸附头,以适应不同装配任务。针对机械臂运动位姿偏差造成视觉测量一致性差,待测目标点之间相对距离超出相机视野的问题,提出了标记点启发的视觉检测方法。通过标记点测量机械臂运动偏差,并以标记点为基准获取目标点之间相对距离,从而引导微动滑台进行运动补偿。基于该精密装配系统对微小组件进行装配,各零件装配误差最大不超过 $40\text{ }\mu\text{m}$,减小装配复杂程度的同时提高了装配效率,为后续全自动批量化装配的研究提供了理论基础。

参考文献:

- [1] Du K, Liu M F, Wang T, et al. Recent progress in ICF target fabrication at RCLF[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2018, 3(3): 135-144.
- [2] 张志雄,江志新,杨拥民,等. 关节对中误差对机械臂

末端定位精度影响[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(6): 185-190.

- [3] 时贝超. 面向微小器件精密装配的宏微结合机器人系统及关键技术研究[D]. 天津:天津大学, 2023.
- [4] Shao C, Ye X, Qian J H, et al. Robotic precision assembly system for microstructures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2020, 234(8): 948-958.
- [5] Wang F J, Shi B C, Huo Z C, et al. Design and control of a spatial micromanipulator inspired by deployable structure[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 971-979.
- [6] Ma Y Q, Du K, Zhou D F, et al. Automatic precision robot assembly system with microscopic vision and force sensor[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(3): 1729881419851619.
- [7] Shi B C, Wang F J, Han C C, et al. Design of a precise positioning stage actuated by a double-layer stick-slip actuator used for precise assembly[J]. Mechanism and Machine Theory, 2023, 185: 105336.
- [8] Chang W C, Wu C H. Hand-eye coordination for robotic assembly tasks[J]. International Journal of Automation and Smart Technology, 2012, 2(4): 301-308.
- [9] 王晓东,崔世鹏,徐征,等. 面向精密微装配的视觉复合定位[J]. 光学精密工程, 2023, 31(19): 2857-2866.

收稿日期: 2024-04-10

(上接第 151 页)

- [6] Shi X J, Zhang F M, Qu X H, et al. An online real-time path compensation system for industrial robots based on laser tracker[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13(5): 1729881416663366.
- [7] Ulrich T, Irgenfried S. Uncertainty estimation for kinematic laser tracker measurements incorporating the control information of an industrial robot[C]//2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Busan, Korea: IEEE, 2014: 68-76.
- [8] Ying Z W, Zhu H R. Mechanism analysis of influence of shafting error on laser tracker[C]//14th National Conference on Laser Technology and Optoelectronics (LTO 2019). Shanghai, China: SPIE, 2019: 148.
- [9] Zhang Z L, Lao D B, Dong D F, et al. Geometric error detection and calibration in laser trackers[J]. 2015 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and

Systems, 2015, 9623: 96230G.

- [10] Conte J, Majarena A C, Acero R, et al. Performance evaluation of laser tracker kinematic models and parameter identification[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(5/6/7/8): 1353-1364.
- [11] 陈俊. 工业机器人工具姿态的准确定义[J]. 机电信息, 2022(16): 58-63.
- [12] 童鹏飞,岳义,韦宝琛,等. 基于多体系统理论的三轴转台几何误差建模以及灵敏度分析[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(4): 108-112, 117.
- [13] Zhao J L, Liu Y, Li Q L. Research on error synthetical modeling of multi-functional composite five-axis CNC machine tool[C]//2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China: IEEE, 2016: 1814-1821.

收稿日期: 2024-03-12