

基于拉线传感器的位姿测量及精度补偿方法研究*

蒋欣怡¹ 乔贵方^{1,2} 聂新港¹ 高春晖¹ 田荣佳³

(1. 南京工程学院自动化学院 南京 211167; 2. 东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096;

3. 南京工业大学浦江学院工程与创新训练中心 南京 211134)

摘要: 工业机器人的精度性能较大程度地影响其在各领域中的应用。为实现并联机器人的位姿测量和参数标定,设计了基于拉线传感器的位姿测量系统,并针对该系统研究了位姿测量精度的补偿方法,从而满足性能要求。首先,根据位姿测量系统的机械结构建立其运动学模型;其次,分析位姿测量系统的传感器误差和结构参数误差,并通过误差拟合将拉线传感器的测量误差降低到 0.1 mm 以下;最后,通过实验验证该位姿测量系统的位姿测量精度和标定效果。实验结果表明,经过激光跟踪仪标定后的位姿测量系统的平均位置精度和平均姿态精度分别达到 0.216 mm 和 0.055°。利用该位姿测量系统对六自由度 Stewart 并联机器人进行标定,标定后的六自由度 Stewart 并联机器人平均位姿误差从(2.706 mm, 1.067°)降低到(0.778 mm, 0.493°)。因此,所设计的基于拉线传感器的位姿测量系统能够精确测量机器人位置和姿态,并且能够满足并联机器人运动学参数标定的要求。

关键词: 拉线传感器; 并联机器人; 运动学模型; 姿态测量; 精度补偿

中图分类号: TH7; TB92; TN2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Research on the pose measurement and accuracy compensation method based on draw-wire sensors

Jiang Xinyi¹ Qiao Guifang^{1,2} Nie Xingang¹ Gao Chunhui¹ Tian Rongjia³

(1. School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Engineering and Innovation Training Center, Nanjing Tech University Pujiang Institute, Nanjing 211134, China)

Abstract: The accuracy performance of industrial robots largely affects their applications in various fields. To realize the pose measurement and parameter calibration of parallel robots, a pose measurement system based on draw-wire sensors is designed. In order to meet the accuracy performance requirements, the pose measurement accuracy compensation method based on this system is proposed. Firstly, the kinematic model of the pose measurement system is established according to its mechanical structure. Secondly, the draw-wire sensors error and structural parameter error of the pose measurement system are analyzed. The measurement error of the draw-wire sensor is reduced to less than 0.1mm by error fitting. Finally, the measurement accuracy and calibration effect of the posture measurement system are verified through experiments. The experimental results show that the average positioning error and attitude error of the posture measurement system after calibration are 0.216 mm and 0.055°, respectively. The proposed posture measurement system is applied to calibrate the 6 DOF Stewart parallel robot. The average pose error of the calibrated 6 DOF Stewart parallel robot is reduced from (2.706 mm, 1.067°) to (0.778 mm, 0.493°). Therefore, the proposed posture measurement system based on draw-wire sensors can satisfy the requirements of pose measurement and kinematic parameter calibration for parallel robots.

Keywords: draw-wire sensors; parallel robots; kinematic model; posture measurement; accuracy compensation

0 引言

随着机器人技术的快速发展,工业机器人在智能制造领域中占据了重要地位^[1-3],并联机器人由于其负载能力强等特点被广泛应用于精密装配等领域。但并联机器人的精度性能是限制其应用的主要因素,现阶段通过机器人标定技术能有效提高机器人的绝对定位精度^[4],机器人标定技术通常分为建模、测量、辨识、补偿 4 个基本步骤。当前用于机器人误差测量的设备主要有经纬仪^[5]、三坐标测量机^[6]、激光跟踪仪^[7-8]、视觉系统^[9-10]、拉线传感器^[11-12]。其中激光跟踪仪、经纬仪等测量设备的价格昂贵,三坐标测量机则不易部署。而基于拉线传感器的测量系统能够根据实际需要进行部署,灵活性强,并且也能够满足精度测量的需求,引起了众多研究人员的关注。Ceccarelli 等^[13]设计了 Cassino Tracking System,并将其应用于 PUMA 机器人的工作空间测量领域;罗振军等^[14]提出了一种单拉线复用三维测量系统,将机器人位置误差由 12.52 mm 减小到 8.26 mm;张得礼等^[15]提出了一种四站式拉线编码器初始位置校准方法以及拉线导向结构,该测量系统以激光跟踪仪作为精度参考,测量数据的精度在 ± 0.29 mm;Gao 等^[16]基于拉线传感器对机器人进行参数辨识,将机器人绝对定位精度提升至 2 mm;Boschetti 等^[17]设计了一种基于单维拉线编码器的距离测量方法,将机器人的距离误差从 1.976 mm 降低到 0.317 mm。在上述的研究中,虽然基于拉线传感器的测量系统能够实现机器人位置测量,并成功地提升了机器人的位置精度性能,但对于无法测量机器人的姿态,无法满足机器人姿态测量和姿态精度提升的需求,极大地限制了机器人标定技术的效果。

为了解决拉线传感器测量机器人的位姿信息完整性的问题,本文提出了一种基于拉线传感器的位姿测量系统,不仅可以实现机器人位置数据的精确测量,还能精确测量机器人姿态信息。同时考虑到位姿测量系统精度受拉线传感器的测量误差影响较大,本文提出了一种基于拉线传感器的位姿测量系统的精度补偿方法,该方法能够大幅提升拉线传感器位姿测量系统的精度,满足机器人位置和姿态精度性能提升的需求。

1 基于拉线传感器的位姿测量系统及模型

1.1 位姿测量系统机械结构

本文设计的位姿测量系统如图 1 所示,主要包含上平台、下平台、拉线传感器和万向节。6 个拉线传感器通过螺栓固定安装在下平台上,万向节通过螺栓固定安装于上平台。拉线传感器的拉线头通过双头螺栓与万向节

固定连接。图 1 中点 A_i 为第 i 个万向节的中点;点 B_i 为第 i 个拉线传感器的出线口中点。本文设计的位姿测量系统主要用于安装在六自由度 Stewart 并联机器人中,该位姿测量系统的下平台固定在六自由度 Stewart 并联机器人静平台的电器柜上表面,位姿测量系统上平台安装在六自由度 Stewart 并联机器人的动平台上,如图 2 所示。

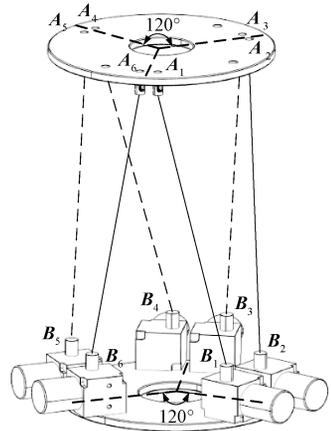


图 1 位姿测量系统的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of posture measurement system

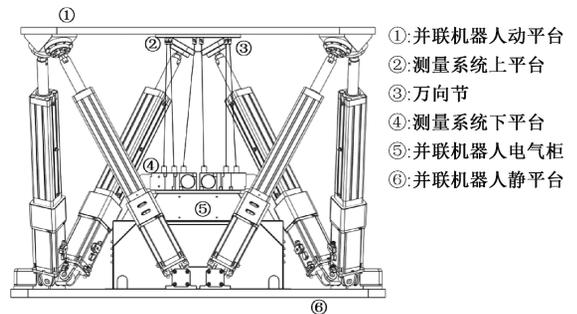


图 2 本文设计的位姿测量系统安装示意图

Fig. 2 Installation illustration of the pose measurement system proposed in this paper

1.2 位姿测量系统数学模型

假设在六自由度 Stewart 并联机器人的第 j 位姿下, P_j 表示六自由度 Stewart 并联机器人动平台坐标系的原点在其静平台坐标系中的位置矢量; R_j 表示六自由度 Stewart 并联机器人动平台坐标系与其静平台坐标系之间的姿态旋转矩阵; l_{ij} 为第 i 个拉线传感器在六自由度 Stewart 并联机器人静平台坐标系中的位置矢量; 位姿测量系统的上平台与六自由度 Stewart 并联机器人动平台之间的位姿关系为 $(x_A, y_A, z_A, \alpha_A, \beta_A, \gamma_A)$, 其姿态旋转矩阵为 R_A ; 位置平移矩阵为 P_A ; 位姿测量系统的下平台与六自由度 Stewart 并联机器人静平台之间的位姿关系为 $(x_B, y_B, z_B, \alpha_B, \beta_B, \gamma_B)$; 其姿态旋转矩阵为 R_B , 位置平移

矩阵为 P_B 。根据以上参数建立位姿测量系统的拉线位置矢量 l_{ij} 与六自由度 Stewart 并联机器人位姿之间的表达式如式(1)所示。

$$l_{ij} = R_j(R_A a_i + P_A) + P_j - (R_B b_i + P_B) \quad (1)$$

式中: a_i 表示第 i 个万向节中点 A_i 在测量系统上平台坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 中的位置矢量; b_i 表示第 i 个拉线传感器出线口中点 B_i 在测量系统基坐标系 $O-XYZ$ 中的位置矢量。

当已知位姿测量系统的结构参数 a_i, b_i 以及位姿测量系统与六自由度 Stewart 并联机器人之间的转换矩阵参数时,结合如式(2)所示目标函数,利用文献[18]的方法求解六自由度 Stewart 并联机器人的位姿 $(x_j, y_j, z_j, \alpha_j, \beta_j, \gamma_j)$ 。

$$F_j = [f_{1j} \ f_{2j} \ \dots \ f_{6j}]^T \quad (2)$$

式中: $f_{ij} = (R_j(R_{Aj} a_i + P_{Aj}) + P_j - (R_{Bj} b_i + P_{Bj}))^2 - l_{ij}^2$ 。

2 基于拉线传感器的位姿测量系统精度优化

2.1 单拉线传感器误差测量与建模

本文设计的位姿测量系统精度受拉线传感器的测量误差影响较大,因此首先搭建拉线传感器误差测量实验平台如图3所示,在串联工业机器人的末端安装连接件,拉线传感器的拉线头与激光跟踪仪的靶球基座固定安装在连接件上。利用工业机器人控制拉线传感器末端,激光跟踪仪测量拉线传感器的空间运动距离,同时记录拉线传感器的反馈数据 l_k 和激光跟踪仪测量的距离数据 d_k ($k=1,2,3,\dots$)。拉线传感器的核心部件是角度编码器,根据文献[19]的研究可知,角度编码器的误差呈现正弦变化确实。而通过分析对比激光跟踪仪测量的距离数据 d_k 与拉线传感器的测量数据 l_k ,拉线传感器的误差 $(d_k - l_k)$ 同样呈现正弦分布特点。因此,本文采用式(3)对误差 $(d_k - l_k)$ 进行拟合。

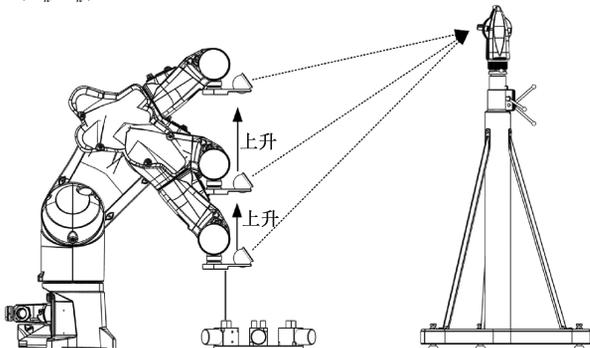


图3 单拉线传感器的误差测量实验

Fig. 3 Error measurement experiment of single draw-wire sensor

$$d_k - l_k = \sum_{n=1}^8 a_n \sin(b_n \times l_k + c_n) \quad (3)$$

式中: a_n, b_n, c_n 分别是待辨识的正弦函数系数。

2.2 位姿测量系统的结构参数辨识方法

由于位姿测量系统在加工、组装和安装过程中会引入一定的结构误差,这将影响位姿测量系统的测量精度。因此,利用标定算法实现结构参数的精确辨识,保证位姿测量系统的测量精度。式(1)中的结构参数主要有拉线传感器的长度 l_i ,万向节中点的坐标 a_i ,拉线传感器出线口中点坐标 b_i ,位姿测量系统的上平台坐标系与机器人的动平台坐标系之间的旋转矩阵 R_A 、位置矢量 P_A ,位姿测量系统的下平台坐标系与机器人的静平台坐标系之间的旋转矩阵 R_B 、位置矢量 P_B 。为实现位姿测量系统的结构参数辨识,首先建立其结构参数误差模型。将式(2)改写成式(4)。

$$f_i = l_i^2 - [R(R_A a_i + P_A) + P - (R_B b_i + P_B)]^T \cdot [R(R_A a_i + P_A) + P - (R_B b_i + P_B)] \quad (4)$$

将式(4)中的 f_i 对结构参数 $l_i, \alpha_i, b_i, P, \alpha, \beta, \gamma, P_A, \alpha_A, \beta_A, \gamma_A, P_B, \alpha_B, \beta_B, \gamma_B$ 求偏微分可得:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f_i}{\partial l_i} \delta l_i + \frac{\partial f_i}{\partial a_i} \delta a_i + \frac{\partial f_i}{\partial b_i} \delta b_i + \frac{\partial f_i}{\partial P} \delta P + \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial f_i}{\partial \beta} \delta \beta + \\ & \frac{\partial f_i}{\partial \gamma} \delta \gamma + \frac{\partial f_i}{\partial P_A} \delta P_A + \frac{\partial f_i}{\partial \alpha_A} \delta \alpha_A + \frac{\partial f_i}{\partial \beta_A} \delta \beta_A + \frac{\partial f_i}{\partial \gamma_A} \delta \gamma_A + \\ & \frac{\partial f_i}{\partial P_B} \delta P_B + \frac{\partial f_i}{\partial \alpha_B} \delta \alpha_B + \frac{\partial f_i}{\partial \beta_B} \delta \beta_B + \frac{\partial f_i}{\partial \gamma_B} \delta \gamma_B = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\frac{\partial f_i}{\partial l_i} \delta l_i = 2l_i$ ($i=1 \dots 6$),其他偏微分项如式(6)和(7)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial F_i}{\partial a_i} &= -2M_i^T R R_A \\ \frac{\partial F_i}{\partial b_i} &= 2M_i^T R_B \\ \frac{\partial F_i}{\partial P} &= -2M_i^T \\ \frac{\partial F_i}{\partial \alpha} &= -2M_i^T \frac{\partial R}{\partial \alpha} a_i \\ \frac{\partial F_i}{\partial \beta} &= -2M_i^T \frac{\partial R}{\partial \beta} a_i \\ \frac{\partial F_i}{\partial \gamma} &= -2M_i^T \frac{\partial R}{\partial \gamma} a_i \\ \frac{\partial F_i}{\partial P_B} &= 2M_i^T R \frac{\partial F_i}{\partial \alpha_B} = 2M_i^T R \frac{\partial R_B}{\partial \alpha_B} b_i \\ \frac{\partial F_i}{\partial \beta_B} &= 2M_i^T R \frac{\partial R_B}{\partial \beta_B} b_i \\ \frac{\partial F_i}{\partial \gamma_B} &= 2M_i^T R \frac{\partial R_B}{\partial \gamma_B} b_i \end{aligned} \right. \left\{ \begin{aligned} \frac{\partial F_i}{\partial P_A} &= -2M_i^T R \\ \frac{\partial F_i}{\partial \alpha_A} &= -2M_i^T R \frac{\partial R_A}{\partial \alpha_A} a_i \\ \frac{\partial F_i}{\partial \beta_A} &= -2M_i^T R \frac{\partial R_A}{\partial \beta_A} a_i \\ \frac{\partial F_i}{\partial \gamma_A} &= -2M_i^T R \frac{\partial R_A}{\partial \gamma_A} a_i \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \alpha} &= \begin{bmatrix} 0 & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha & -c\gamma s\beta s\alpha + s\gamma c\alpha \\ 0 & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha & -s\gamma s\beta s\alpha - c\gamma c\alpha \\ 0 & c\beta c\alpha & -c\beta s\alpha \end{bmatrix} \\ \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \beta} &= \begin{bmatrix} -c\gamma s\beta & c\gamma c\beta s\alpha & c\gamma c\beta c\alpha \\ -s\gamma s\beta & s\gamma c\beta s\alpha & s\gamma c\beta c\alpha \\ -c\beta & -s\beta s\alpha & -s\beta c\alpha \end{bmatrix} \\ \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \gamma} &= \begin{bmatrix} -s\gamma c\beta & -s\gamma s\beta s\alpha - c\gamma c\alpha & -s\gamma s\beta c\alpha + c\gamma s\alpha \\ c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{M}_i = \mathbf{R}(\mathbf{R}_A \mathbf{a}_i + \mathbf{P}_A) + \mathbf{P} - (\mathbf{R}_B \mathbf{b}_i + \mathbf{P}_B)$ 。

将式(5)改写为:

$$\begin{aligned} & \mathbf{T}_j [\delta \mathbf{P} \quad \delta \alpha \quad \delta \beta \quad \delta \gamma]^T = \\ & \mathbf{H}_j [\delta l_1 \cdots \delta l_6 \quad \delta a_1 \cdots \delta a_6 \quad \delta b_1 \cdots \\ & \cdots \delta b_6 \quad \delta P_A \quad \delta \alpha_A \quad \delta \beta_A \quad \delta \gamma_A \quad \delta P_B \quad \delta \alpha_B \quad \delta \beta_B \quad \delta \gamma_B]^T \end{aligned} \quad (8)$$

简化后如式(9)所示。

$$\mathbf{T}_j \Delta \mathbf{X}_j = \mathbf{H}_j \Delta \mathbf{S} \quad (9)$$

当 \mathbf{T}_j^{-1} 存在时,则写成如式(10)所示。

$$\Delta \mathbf{X}_j = \mathbf{T}_j^{-1} \mathbf{H}_j \Delta \mathbf{S} \quad (10)$$

若有 n 组位姿用于辨识,则矩阵方程组如式(11)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_1 \\ \Delta \mathbf{X}_2 \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{X}_n \end{bmatrix}_{6n \times 1} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1^{-1} \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{T}_2^{-1} \mathbf{H}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{T}_n^{-1} \mathbf{H}_n \end{bmatrix}_{6n \times 54} \Delta \mathbf{S}_{54 \times 1} \quad (n \geq 9) \quad (11)$$

可简写成如式(12)所示。

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{S} \quad (12)$$

式中: $\Delta \mathbf{S}$ 为位姿测量系统的结构参数误差向量; \mathbf{J} 为结构参数误差模型的雅可比矩阵; $\Delta \mathbf{X}$ 为 n 组位姿点的误差向量。

3 实验结果与分析

为了验证本文所提出的基于拉线传感器的位姿测量系统以及精度补偿方法的有效性,进行了3组的误差测量实验,并结合误差补偿方法进行测量系统的精度优化,最终在六自由度 Stewart 并联机器人的误差测量和精度标定上进行了应用。

3.1 拉线传感器误差测量与补偿

如图3所示,实验中使用了拉线传感器误差测量实验平台,检测1~6号拉线传感器的测量精度,将激光跟踪仪测量的数据与拉线传感器测量的数据对比可以得到的6个拉线传感器的误差值。1~6号拉线传感器在全量程范围内的平均距离误差分别为0.26、0.44、0.78、0.37、0.54和0.27 mm,如表1所示。由于拉线传感器的拉线

缠绕在圆形码盘上,拉线传感器的距离误差呈现类正弦周期性变化规律,图4中的误差曲线也呈现该规律。因此,结合式(3)对6个拉线传感器进行误差拟合,可以得到每个拉线传感器的误差函数,并对拉线传感器进行误差补偿,补偿前后的误差情况如图4所示。由图4可以看出,误差补偿后拉线传感器测量精度得到了明显地提升,1~6号拉线传感器的补偿后平均误差值如表1所示,6个拉线传感器的测量误差分别降低至0.06、0.04、0.06、0.06、0.05和0.09 mm,均低于0.1 mm,满足测量精度要求。本文针对拉线传感器的误差拟合方法能够有效提升测量精度,保证位姿测量系统的精度性能。

表1 位姿测量系统中的1~6号拉线传感器
补偿前后平均误差值

Table 1 The average errors of the 1st to 6th draw-wire sensors in the pose measurement system before and after compensation

编号	补偿前误差/mm	补偿后误差/mm
1	0.26	0.06
2	0.44	0.04
3	0.78	0.06
4	0.37	0.06
5	0.54	0.05
6	0.27	0.09

3.2 位姿测量系统精度优化

为验证位姿测量系统的整体精度,本文搭建了位姿测量系统如图5所示,将位姿测量系统安装在六自由度 Stewart 并联机器人中。利用本文所提出的拉线传感器测量系统以及激光跟踪仪分别测量机器人的位姿数据。该系统中采用 Leica AT930 激光跟踪仪,其测量精度为 $16 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}/\text{m}$ 。

如图2可见,通过六自由度 Stewart 并联机器人带动位姿测量系统,并利用激光跟踪仪测量六自由度 Stewart 并联机器人的位姿。将激光跟踪仪的位姿测量数据作为测量系统的真实值,用于评价位姿测量系统的误差。

首先,分别通过激光跟踪仪和位姿测量系统同时测量150组位姿点,使得位姿点均匀分布在六自由度 Stewart 并联机器人的工作空间内。在参数辨识过程中,将测量数据随机分为100组辨识集和50组验证集,以提高辨识模型的泛化性。根据式(12)的误差模型,结合非线性最小二乘(levenberg-marquardt, LM)算法实现基于拉线传感器的位姿测量系统结构参数的精确辨识。辨识集优化前后的位姿误差对比结果如图6所示,从图6可以看出精度优化后的位姿测量系统的精度有了显著提升。辨识集的100组位姿点在精度优化前的最大位姿误差为(5.996 mm, 0.931°),平均位姿误差为(4.246 mm,

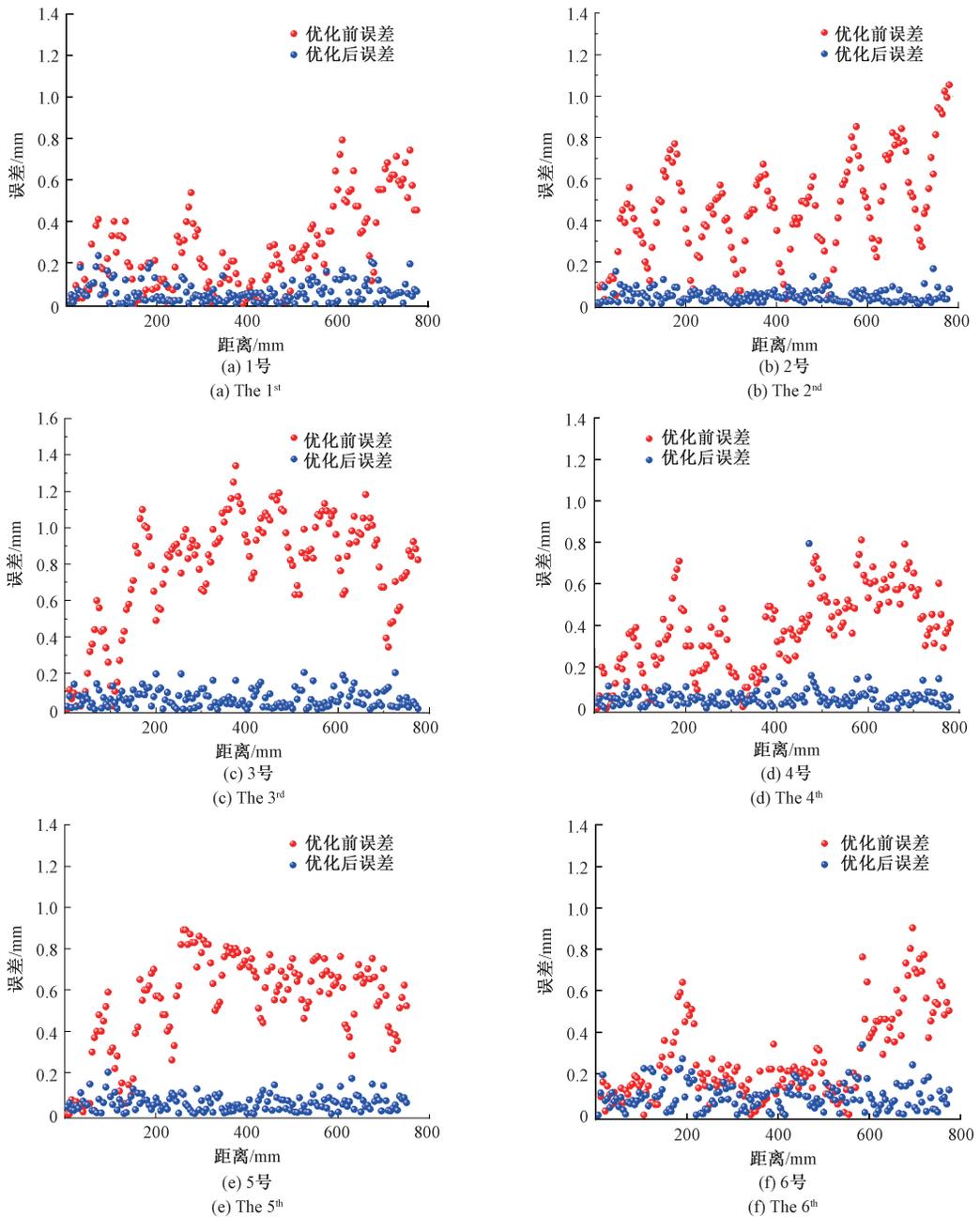


图4 位姿测量系统中1~6号拉线传感器原始误差和补偿后误差对比

Fig. 4 Comparison results of the original error and the compensated error of the 1st to 6th draw-weir sensors used in the proposed pose measurement system

0.657°);精度优化后最大位姿误差为(0.380 mm, 0.137°),平均位姿误差为(0.216 mm,0.055°)。可以看到,经过精度优化后,位姿测量系统的平均位置误差和平均姿态误差分别降低了94.91%和91.63%。

为验证辨识结构参数的泛化能力,验证集优化前后的位姿误差对比结果如图7所示。验证集50组位姿点在精度优化前的最大位姿误差为(5.730 mm,0.931°),平均位姿误差为(4.365 mm,0.671°);精度优化后的最

大位姿误差为(0.476 mm,0.163°),平均位姿误差为(0.242 mm,0.061°),平均位置精度和姿态精度分别提升了94.46%和90.91%。实验结果表明本文提出的误差模型和辨识方法能够有效地提升位姿测量系统的精度,可以在实际应用中进一步推广。

3.3 测量系统精度验证实验

为了验证基于拉线传感器的位姿测量系统的性能,将其应用于六自由度 Stewart 并联机器人的误差测量和

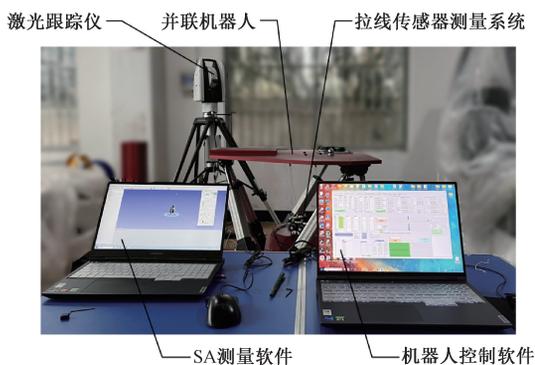


图 5 位姿测量系统精度优化实验

Fig. 5 The accuracy optimization experiment of the proposed pose measurement system

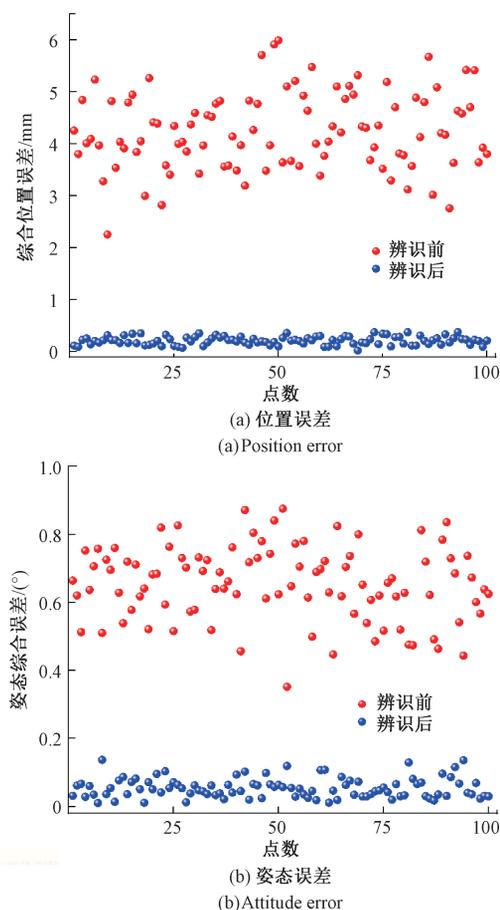


图 6 辨识集中位姿测量系统的精度优化前后结果对比

Fig. 6 Comparison results of the pose measurement system before and after accuracy optimization in the identification group

精度标定。实验过程分为 3 个主要步骤:首先,在六自由度 Stewart 并联机器人运动空间内随机测量 50 组位姿数据;其次,结合文献[20]的标定方法,使用拉线传感器测量的位姿与六自由度 Stewart 并联机器人的理论位姿对

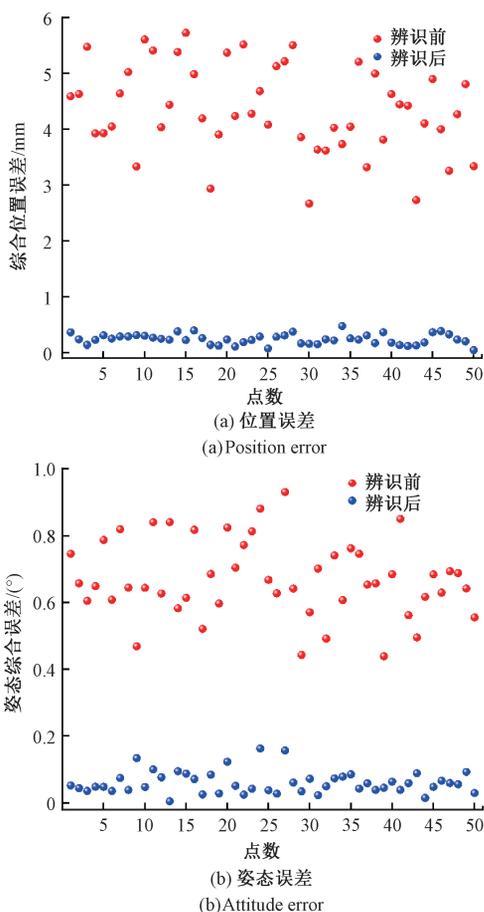


图 7 验证集中位姿测量系统的精度优化前后结果对比
Fig. 7 Comparison results of the pose measurement system before and after accuracy optimization in the verification group

机器人进行参数辨识;最后,将辨识前后的运动学模型计算结果与激光跟踪仪的测量数据进行对比,计算六自由度 Stewart 并联机器人标定前后的位姿误差,对比结果如图 8 所示。利用基于拉线传感器的位姿测量系统进行位姿测量,并基于测量数据进行参数辨识,标定结果与激光跟踪仪的标定结果进行对比。六自由度 Stewart 并联机器人运动学模型得到了显著改善。标定前六自由度 Stewart 并联机器人最大位姿误差为 (5.089 mm, 1.862°),平均位姿误差为 (2.706 mm, 1.067°);标定后最大位姿误差降至 (1.632 mm, 0.865°),平均位姿误差降至 (0.778 mm, 0.493°),六自由度 Stewart 并联机器人的平均位置精度和姿态精度分别提升了 71.25% 和 53.80%。实验结果表明本文设计的位姿测量系统在工业机器人标定中的可行性和有效性。

综上所述,经过误差补偿后的位姿测量系统不仅能够实现机器人位置和姿态的精确测量,而且能够实现六自由度 Stewart 并联机器人位置精度和姿态精度的有效提升。

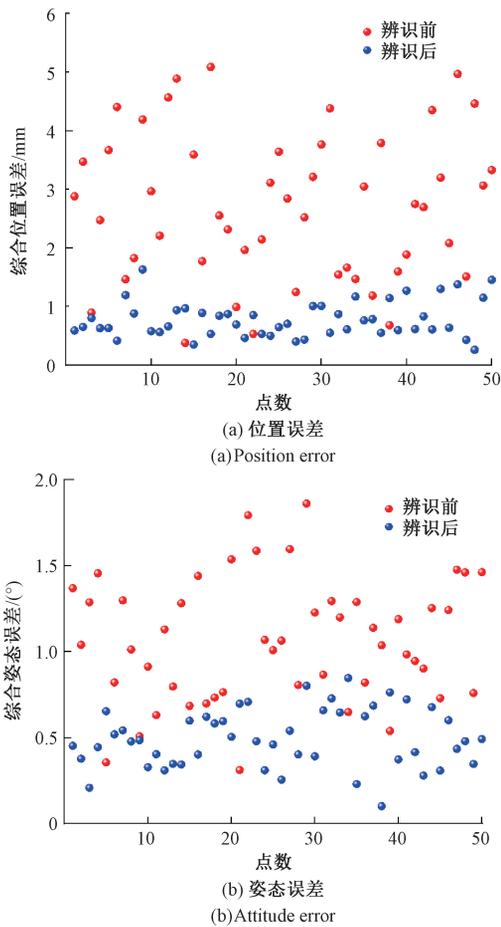


图8 六自由度 Stewart 并联机器人标定前后的精度结果对比
Fig. 8 Accuracy comparison results of 6-DOF Stewart parallel robot before and after calibration

4 结论

本文针对六自由度 Stewart 并联机器人的位姿测量与运动学参数标定的需求,设计了一种基于拉线传感器的位姿测量系统,该系统能够精确测量机器人位姿信息。首先,根据位姿测量系统的机械结构建立其运动学模型,完成了位姿测量系统的设计以及位姿测量方法的研究。其次,由于该系统测量精度受拉线传感器的测量误差影响较大,通过误差拟合将拉线传感器的测量误差降低到 0.1 mm 以下。同时本文提出了一种基于拉线传感器的位姿测量系统的精度补偿方法,该方法能够有效提升位姿测量系统的检测精度,辨识集的 100 组位姿点的平均位姿误差为(0.216 mm, 0.055°),验证集 50 组位姿点平均位姿误差为(0.242 mm, 0.061°),满足机器人位置和姿态精度性能提升的需求。最后,将该位姿测量系统应用在 Stewart 并联机器人的精度标定中。实验结果表明,标定后的六自由度 Stewart 并联机器人平均位姿误差从(2.706 mm, 1.067°)降低到(0.778 mm, 0.493°),位置

和姿态精度分别提升了 71.25% 和 53.80%。因此,本文设计的基于拉线传感器的位姿测量系统能够精确测量机器人位置和姿态,并且能够满足并联机器人运动学参数标定的要求。

参考文献

- [1] 姜吉光,侯爵,苏成志,等. 面向物理约束的机器人运动学标定最优位姿集规划方法研究[J]. 中国机械工程, 2024, 35(3): 472-480.
JIANG J G, HOU J, SU CH ZH, et al. Research on optimal pose set planning method under physical constraint robot kinematics calibration [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(3): 472-480.
- [2] 王红军,黄维轩,毛向向,等. 薄壁装配单元并联结构设计及性能分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4): 154-164.
WANG H J, HUANG W X, MAO X X, et al. Parallel structure design and performance analysis of thin-walled assembly unit [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4): 154-164.
- [3] 陈卓凡,周坤,秦菲菲,等. 基于改进量子粒子群优化算法的机器人逆运动学求解[J]. 中国机械工程, 2024, 35(2): 293-304.
CHEN ZH F, ZHOU K, QIN F F, et al. Inverse kinematics solution of robots based on IOPSO algorithm [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(2): 293-304.
- [4] 高文斌,罗瑞卿,江自真. 基于局部指数积的模块化机器人运动学参数标定[J]. 机器人, 2021, 43(1): 66-73.
GAO W B, LUO R Q, JIANG Z ZH. Kinematic-parameter calibration for modular robots based on the local POE [J]. Robot, 2021, 43(1): 66-73.
- [5] SIMAS H, DI GREGORIO R, SIMONI R, et al. Parallel pointing systems suitable for robotic total stations: Selection, dimensional synthesis, and accuracy analysis [J]. Machines, 2024, 12(1): 54.
- [6] LUO X, XIE F, LIU X, et al. Kinematic calibration of a 5-axis parallel machining robot based on dimensionless error mapping matrix [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 70: 102115.
- [7] LI R, DING N, ZHAO Y, et al. Real-time trajectory position error compensation technology of industrial robot [J]. Measurement, 2023, 208: 112418.
- [8] 乔贵方,蒋欣怡,高春晖,等. 基于多目标优化的工业机器人位置与姿态精度提升方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12): 217-224.
QIAO G F, JIANG X Y, GAO CH H, et al. Method for improving position and attitude accuracy of industrial robots based on multi-objective optimization [J]. Chinese

- Journal of Scientific Instrument, 2023, 44 (12): 217-224.
- [9] AU C K, LIM S H, DUKE M, et al. Integration of stereo vision system calibration and kinematic calibration for an autonomous kiwifruit harvesting system[J]. International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 2023, 7(2): 350-369.
- [10] CHEN C, CAI Z, CHEN T, et al. A vision-based calibration method for aero-engine blade-robotic grinding system [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(5) : 2195-2209.
- [11] SUN Z, WANG H, TIAN H, et al. Docking pose measurement method for large components based on draw-wire displacement sensors [J]. Measurement Science Review, 2023, 23(5) : 210-216.
- [12] GAN Y, DUAN J, DAI X. A calibration method of robot kinematic parameters by drawstring displacement sensor[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16: 1729881419883072.
- [13] CECCARELLI M, CARRASCO C A, OTTAVIANO E. Error analysis and experimental tests of CATRASYS [C]. IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 2000, 4: 2371-2376.
- [14] 罗振军,孙思嘉,梅江平,等. 基于拉线位移传感器的机器人标定应用研究[J]. 航空制造技术, 2017(9): 43-49.
LUO ZH J, SUN S J, MEI J P, et al. Application research of robot calibration based on draw-wire displacement sensors [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(9):43-49.
- [15] 张得礼,洪伟松,潘国威,等. 可灵活配置的四站式拉线编码器机器人测量系统[J]. 机电工程, 2017, 34(11):1249-1254.
ZHANG D L, HONG W S, PAN G W, et al. Measurement system of robot based on arbitrary layout for four base stations of cable encoders [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(11) : 1249-1254.
- [16] GAO S, MA K, GAO Y, et al. A robot coordinate measurement system based on pull wire sensor and its parameter identification method [C]. 12th International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems, 2022: 514-519.
- [17] BOSCHETTI G, SINICO T. A novel step-by-step procedure for the kinematic calibration of robots using a single draw-wire encoder [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 131(7-8) : 4129-4147.
- [18] 乔贵方,聂新港,付冬梅,等. 基于 DBO-PSO-BPNN 的 Stewart 平台正运动学求解方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2023(12) : 94-98.
QIAO G F, NIE X G, FU D M, et al. Research on forward kinematics solution method of stewart platform based on DBO-PSO-BPNN [J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(12) : 94-98.
- [19] 张文颖,朱浩然. 圆光栅测角系统误差分析与修正[J]. 应用光学, 2019, 40(3) : 399-403.
ZHANG W Y, ZHU H R. Error analysis and correction of circular grating angle measurement system[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(3) : 399-403.
- [20] 强红宾,薛大鹏,冯新宇,等. 基于无量纲化辨识雅可比矩阵选取测量位姿的 Stewart 并联机构运动学标定[J]. 光学精密工程, 2020, 28(7) : 1546-1557.
QIANG H B, XUE D P, FENG X, et al. Stewart parallel manipulator kinematic calibration based on the normalized identification Jacobian choosing measurement configurations [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(7) : 1546-1557.

作者简介



蒋欣怡, 2021 年于南京工程学院获得学士学位, 现为南京工程学院硕士研究生, 主要研究方向为机器人标定技术。

E-mail: jxy_lorriiss@163.com

Jiang Xinyi received her B. Sc. degree from Nanjing Institute of Technology in 2021.

She is now a M. Sc. candidate at Nanjing Institute of Technology. Her main research interest includes robot calibration technology.



乔贵方(通信作者), 2010 年于南京工程学院获学士学位, 2015 年于东南大学获得博士学位, 现为南京工程学院副教授, 主要研究方向为工业机器人测试与标定技术、机器人仿生控制技术。

E-mail: qiaoguifang@126.com

Qiao Guifang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing Institute of Technology in 2010 and Ph. D. degree from Southeast University in 2015. He is now an associate professor at Nanjing Institute of Technology. His main research interests include Industrial robot testing and calibration technology, and robot bionic control technology.