

直线驱动型并联机器人误差模型与灵敏度分析

于今¹ 余伟¹ 吴超宇¹ 程敏¹ 钱小吾²

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 镇江高等专科学校数理化工系, 镇江 212002)

摘要: 为提高直线驱动型并联机器人动平台末端执行器位置精度, 根据并联机构结构和运动学模型, 对影响末端位置精度的各项误差源进行了分析, 利用解析法建立动平台末端操作空间与关节空间之间的误差映射模型; 在灵敏度误差模型的基础上, 依据全域灵敏度评价指标, 提出了一种误差源筛选方案, 筛选影响位置精度的主要误差源, 利用蒙特卡洛法随机模拟并联机器人中各零部件的尺寸误差、驱动误差和装配误差, 得知筛选前后动平台位置误差基本一致, 验证了评价指标的正确性。以激光跟踪仪为测量工具在任务空间中取点测量, 对筛选后的主要误差源进行辨识, 修正并联机构的正向运动学模型后, 并联机构末端位置精度改善显著, 验证了误差源筛选方案的有效性和可行性, 减轻了误差参数辨识的复杂程度和计算量, 对结构较复杂的机构误差补偿具有一定的指导意义。

关键词: 并联机器人; 误差模型; 全域灵敏度; 误差源筛选方案

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)07-0383-08

Error Modeling and Sensitivity Analysis of Linear Driven Parallel Robot

YU Jin¹ YU Wei¹ WU Chaoyu¹ CHENG Min¹ QIAN Xiaowu²

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2. Department of Mathematics, Physics and Chemistry, Zhenjiang College, Zhenjiang 212002, China)

Abstract: In order to improve the position precision of moving platform end effector of linear driven parallel robot, based on structure and kinematic model of parallel mechanism, the dimension errors, driving errors and assembly errors of parallel robot which influenced accuracy of the moving platform end effector were analyzed, the non-linear mapping from the actuated variables in joint space to the pose of the end-effector in operating space was established with analytic method. On the basis of the sensitivity error model, an error source selection scheme was proposed according to the global sensitivity evaluation index, which was defined to evaluate the error source on the position error of the moving platform in given workspace, and the main error sources that affected the location accuracy was selected. It was found that the position error of the moving platform was basically the same between all error sources and selected error sources by randomly simulating the dimension errors, driving errors and assembly errors of the parallel robot with Monte Carlo method, which verified the consistency of the evaluation index. By taking laser tracker as measurement tool, the position precision of the moving platform end effector of the parallel mechanism was improved remarkably after detecting the selected main errors of the parallel robot and calibrating the forward kinematic model, which verified the validity and feasibility of the error source selection scheme and reduced the complexity and computation of the error parameter identification. It had greatly important guidance to the error compensation of the complex structure.

Key words: parallel robot; error modeling; global sensitivity; error source selection scheme

引言

并联机器人作为工业机器人的一个重要分支, 虽然其具有负载能力强、速度快、重复性能好等多种

优势而日益受关注, 但精度差, 没有进行标定的机器人, 精度误差可以达到几毫米, 因此在很多应用中必须对机器人进行精确标定。标定过程主要为: 建立误差模型、仪器测量、误差参数辨识和误差补

偿^[1-3]。在4个步骤中,第3步误差参数辨识最为复杂、重要。因此很多学者在参数辨识这方面做了很多研究工作,参数辨识常用的算法有最小二乘法^[4-5],但由于其需要轨迹规划且计算量大,所以不实用。LEVENBERG - MARQUARDT算法将牛顿法和最陡下降法相结合,尽管该算法有收敛速度快和稳定性强等优势,但其需很大的内存^[6-7];扩展卡尔曼滤波法虽然是处理非线性系统的经典方法,但因其未考虑误差的分布情况并且认为状态误差可通过一个独立的线性系统产生,从而造成估计精度较低并容易出现滤波发散等情况^[8];随后,一些学者也提出了提高参数辨识效率的方法。MARCO等^[9]对机器人冗余参数误差辨识进行了分析;KHALIL等^[10]利用了辨识雅克比矩阵的条件数;唐国宝等^[11]利用并联机构操作空间与关节空间非线性映射的性质,仅需检测末端 z 向的位置误差以及在初始位形的姿态误差便可辨识出几何参数;张文昌等^[12]基于步进迭代法以实测信息与理想模型输出之间的残差构造误差辨识模型,进而辨识几何参数。

上述学者们提出解决几何参数误差辨识的方法都是在数学方法上作研究和探讨,本文在前人工作基础上,通过解析法建立动平台末端操作空间与关节空间之间的误差映射模型;在分析灵敏度误差模型的基础上,依据全域灵敏度评价指标,提出一种误差源筛选方案,对误差模型中的误差源进行简化,在保证末端位置精度的基础上,去除对位置精度影响较弱的误差源,减轻误差参数辨识的复杂程度和计算量,缩短计算时间,提高参数辨识效率,并通过激光跟踪仪误差标定实验验证所提出的误差源筛选方案的有效性和可行性。

1 结构模型介绍

直线驱动型并联机器人的三维模型示意如图1所示,该机构主体结构由静平台、动平台、同步带电机、滑块、U型虎克铰、3组平行四边形支链杆件组成,每组支链分别通过2个虎克铰(U副)来连接动平台与滑块,滑块通过平移副(P副)由同步带电机驱动。3个电机安装在同步电机的上方,直线驱动3个滑块,杆件连接处采用一种特殊设计的U型虎克铰结构(图2),该虎克铰采用U型铰链轴与单耳环相连,U型铰链可以通过键槽实现两侧的同向性,旋转副U1是U型连接轴绕连接轴的转动,可以实现360°转动,旋转副U2是单耳环绕轴的运动,设计的约束是 $-40^\circ \sim 40^\circ$,该结构能够保证平行四边形两组杆件的同向性,并能扩大关节的转动能力。平行四边形支链杆件可以保证动平台在平动时不发生翻

转,并且采用碳纤维制造,质量小,体积小,具有较好的动态响应性能。

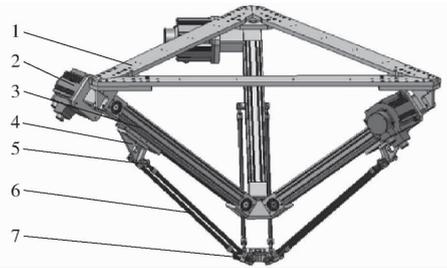


图1 直线驱动型并联机器人三维模型

Fig.1 Three dimensional model of linear driven parallel robot
1. 静平台 2. 交流伺服电机 3. 同步带电机 4. 滑块 5. U型虎克铰 6. 平行四边形支链 7. 动平台

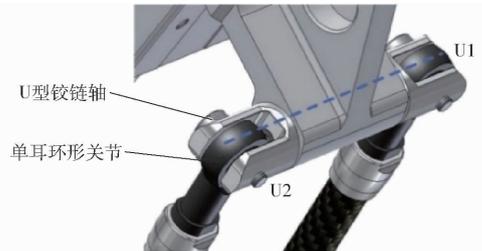


图2 虎克铰示意图

Fig.2 Schematic diagram of Hooke joint

针对直线驱动型并联机器人,由于有动平台和静平台,3组平行四边形支链,3个滑块,所以机构数 $n = 1 + 1 + 3 + 3 = 8$,包含有6个虎克铰以及3个移动副,所以运动副数量 $g = 6 + 3 = 9$,每个虎克铰包含2个转动副,每个移动副包括1个平移副,所以自由度 f_i 之和为 $6 \times 2 + 3 = 15$ 。所以自由度之和 M 为

$$M = 6 \times (8 - 9 - 1) + \sum_{i=1}^g f_i = -12 + 15 = 3 \quad (1)$$

由式(1)可以看出,由于有平行四边形支链,直线驱动型并联机器人只有3个方向的平动自由度。

2 误差分析与模型的建立

2.1 几何误差定义

为了建立直线驱动型并联机器人的误差运动学模型,定义图3所示空间坐标系中的简化结构图。设定并联机器人基坐标系 $OXYZ$ 原点建立在静平台等边三角形 $\Delta A_1A_2A_3$ 的中心 O 点处, XY 平面与3个伺服电动机转动副理想轴线共面, X 轴指向第1条支链与静平台底面的交点处, Z 轴方向与静平面垂直向下,过渡坐标系由坐标系 $\{O\}$ 绕着 Z 轴旋转 $\alpha_i = 2\pi/3(1-i)$ ($i = 1, 2, 3$)得到。将过渡坐标系 $\{O_i\}$ 的原点从 O 点平移到 A_i 点,就得到了主动臂坐标系 $\{A_i\}$,再将坐标系 $\{A_i\}$ 绕着 Y_{A_i} 轴旋转 θ_i 得到坐标系 $\{A'_i\}$, $Z'_{A'_i}$ 轴与支链 i 中电机的中心轴线重合, $X'_{A'_i}$ 轴垂直于电机中心轴线。坐标系 $\{O'\}$ 固接在

动平台上, $X'Y'$ 平面与各四边形从动臂与动平台铰接处球铰中心所构成的平面共面, X' 指向第 1 条支链中从动臂下端连接轴上两球铰中心连线的中点处, 过渡坐标系 $\{O'_i\}$ 由坐标系 $\{O'\}$ 绕着 Z' 轴旋转 β_i 得到。

影响并联机器人位置精度有动态误差和静态误差^[13-16], 动态误差通常包括机器人本身各部件在重力下的变形、温度对关节间运动副的间隙影响和周围噪声的影响等, 静态误差主要有零部件尺寸加工误差和装配定位误差; 本文只分析静态误差对并联机器人末端位置精度的影响, 即分析机器人关键零部件尺寸误差和装配定位误差。由于机器人 3 条支链对称分布, 现以直线驱动型并联机器人的第 i 条支链为例, 如图 3 所示。

的坐标为 $(x_{D_i}, y_{D_i}, z_{D_i})$, E_i 点的坐标为 $(x_{E_i}, y_{E_i}, z_{E_i})$, 则式(2)可整理为

$$(x_{D_i} - x_{E_i})^2 + (y_{D_i} - y_{E_i})^2 + (z_{D_i} - z_{E_i})^2 = L_i^2 \quad (3)$$

在坐标系 $C_i X_{C_i} Y_{C_i} Z_{C_i}$ 下, D_i 点的坐标为 $(0, -e_{1i}, 0)$, 又坐标系 $C_i X_{C_i} Y_{C_i} Z_{C_i}$ 首先由基坐标系 $OXYZ$ 绕着 Z 轴旋转 α_i 得坐标系 $O_i X_i Y_i Z_i$ ($i=1, 2, 3$), 这一变换过程用矩阵 A 表示, 然后由坐标系 $O_i X_i Y_i Z_i$ 沿着 $\vec{O_i A_i}$ 平移 R 得到坐标系 $A_i X_{A_i} Y_{A_i} Z_{A_i}$, 并绕着 Y_{A_i} 旋转 θ_i 得到坐标系 $A'_i X_{A'_i} Y_{A'_i} Z_{A'_i}$, 这一变换过程用矩阵 B 表示, 最后坐标系 $A'_i X_{A'_i} Y_{A'_i} Z_{A'_i}$ 沿着 $X_{A'_i}$ 和 $Z_{A'_i}$ 分别平移 h_i 和 s_i 得到坐标系 $C_i X_{C_i} Y_{C_i} Z_{C_i}$, 所以 D_i 在坐标系 $A'_i X_{A'_i} Y_{A'_i} Z_{A'_i}$ 下可以表示为 $(h_i, -e_{1i}, s_i)$, 则 D_i 在坐标系 $OXYZ$ 下的坐标 $(x_{D_i}, y_{D_i}, z_{D_i})$ 为

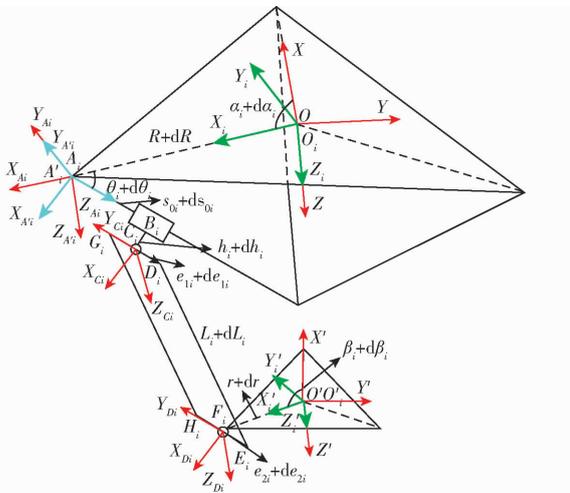


图 3 直线驱动型并联机器人支链 i 误差源简图

Fig. 3 Error sources scheme of the i th chain of linear driven parallel robot

$O A_i, B_i C_i, D_i E_i, F_i O'_i$ 的几何尺寸分别为 R, h, L, r , 其加工误差分别为 dR_i, dh_i, dL_i, dr_i ; 装配误差为: 电缸与静平台安装接触点 A_i 在静平台的均布安装角为 $\alpha_i = (i-1)2\pi/3$ ($i=1, 2, 3$), 电缸与静平台底面夹角 $\theta_i = 38^\circ$, 从动臂与动平台安装接触点 F_i 在动平台的均布安装角为 $\beta_i = (i-1)2\pi/3$ ($i=1, 2, 3$), 对应装配误差为 $d\alpha_i, d\theta_i, d\beta_i$; C_i, F_i 在杆件 $G_i D_i, H_i E_i$ 的定位尺寸为 e_{1i} 和 e_{2i} , 对应装配误差为 de_{1i} 和 de_{2i} 。所以, 直线驱动型并联机构静态误差源共有 30 项。

2.2 误差模型的建立

考虑到在 3 条支链中, 电缸滑块与动平台之间的距离为平行四边形从动杆的杆长, 所以以杆长约束建立关系式为

$$\sqrt{|D_i E_i|^2} = L_i \quad (2)$$

式中 L_i ——第 i 条支链中从动杆杆长

假设在并联机器人固定坐标系 $OXYZ$ 中, D_i 点

其中

$$\begin{bmatrix} x_{D_i} \\ y_{D_i} \\ z_{D_i} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{AB} \begin{bmatrix} h_i \\ -e_{1i} \\ s_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 & 0 \\ \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & 0 & \sin\theta_i & R_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_i & 0 & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

设动平台质心坐标系 $O'X'Y'Z'$ 的原点 O' 在机器人固定坐标系 $OXYZ$ 的坐标为 (X, Y, Z) , 即机器人操作末端的位置坐标, E_i 点在坐标系 $F_i X_{F_i} Y_{F_i} Z_{F_i}$ 中的坐标为 $(0, -e_{2i}, 0)$, 又坐标系 $F_i X_{F_i} Y_{F_i} Z_{F_i}$ 首先是由坐标系 $O'_i X'_i Y'_i Z'_i$ 经坐标系 $O'X'Y'Z'$ 绕 Z' 旋转 α_i , 再沿 X'_i 轴平移 r 得到, 于是 D_2 的坐标在机器人固定坐标系可以表示为

$$\begin{bmatrix} x_{E_2} \\ y_{E_2} \\ z_{E_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta_2 & -\sin\beta_2 & 0 \\ \sin\beta_2 & \cos\beta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_i \\ -e_{2i} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(4)和式(5)代入式(3)可得

$$\begin{aligned} & [X - (R_i \cos\alpha_i - r_i \cos\beta_i - e_{2i} \sin\beta_i + \\ & h_i \cos\alpha_i \cos\theta_i + e_{1i} \sin\alpha_i + s_i \cos\alpha_i \sin\theta_i)]^2 + \\ & [Y - (R_i \sin\alpha_i - r_i \sin\beta_i + e_{2i} \cos\beta_i + \\ & h_i \sin\alpha_i \cos\theta_i - e_{1i} \cos\alpha_i + s_i \sin\alpha_i \sin\theta_i)]^2 + \\ & [Z - (s_i \cos\theta_i - h_i \sin\theta_i)]^2 = L_i^2 \quad (i=1, 2, 3) \quad (6) \end{aligned}$$

将式(6)简写为

$$\begin{cases} f_1(X, Y, Z, s_1, R_1, r_1, e_{11}, e_{21}, h_1, \alpha_1, \theta_1, \beta_1, L_1) = 0 \\ f_2(X, Y, Z, s_2, R_2, r_2, e_{12}, e_{22}, h_2, \alpha_2, \theta_2, \beta_2, L_2) = 0 \\ f_3(X, Y, Z, s_3, R_3, r_3, e_{13}, e_{23}, h_3, \alpha_3, \theta_3, \beta_3, L_3) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7),推算并联机器人正运动学问题时,除机器人结构参数集合 \mathbf{p} ($\mathbf{p} = \{R_i, r_i, h_i, e_{1i}, e_{2i}, \alpha_i, \theta_i, \beta_i, L_i\}$) 为已知外,3个滑块的位置 \mathbf{m} ($\mathbf{m} = [s_1 \ s_2 \ s_3]$) 也为已知,机器人正向运动学模型可以表示为: $\mathbf{q} = f(\mathbf{m}, \mathbf{p})$,运用 Matlab 中 solve 函数可以求解出相应的动平台质心坐标 \mathbf{q} ($\mathbf{q} = [x \ y \ z]^T$);在推算并联机器人逆运动学时,已知

$$\begin{bmatrix} -\frac{\partial f_1}{\partial s_1} ds_1 - \frac{\partial f_1}{\partial R_1} dR_1 - \frac{\partial f_1}{\partial r_1} dr_1 - \frac{\partial f_1}{\partial e_{11}} de_{11} - \frac{\partial f_1}{\partial e_{21}} de_{21} - \frac{\partial f_1}{\partial h_1} dh_1 - \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_1} d\alpha_1 - \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} d\theta_1 - \frac{\partial f_1}{\partial \beta_1} d\beta_1 - \frac{\partial f_1}{\partial L_1} dL_1 \\ -\frac{\partial f_2}{\partial s_2} ds_2 - \frac{\partial f_2}{\partial R_2} dR_2 - \frac{\partial f_2}{\partial r_2} dr_2 - \frac{\partial f_2}{\partial e_{12}} de_{12} - \frac{\partial f_2}{\partial e_{22}} de_{22} - \frac{\partial f_2}{\partial h_2} dh_2 - \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_2} d\alpha_2 - \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} d\theta_2 - \frac{\partial f_2}{\partial \beta_2} d\beta_2 - \frac{\partial f_2}{\partial L_2} dL_2 \\ -\frac{\partial f_3}{\partial s_3} ds_3 - \frac{\partial f_3}{\partial R_3} dR_3 - \frac{\partial f_3}{\partial r_3} dr_3 - \frac{\partial f_3}{\partial e_{13}} de_{13} - \frac{\partial f_3}{\partial e_{23}} de_{23} - \frac{\partial f_3}{\partial h_3} dh_3 - \frac{\partial f_3}{\partial \alpha_3} d\alpha_3 - \frac{\partial f_3}{\partial \theta_3} d\theta_3 - \frac{\partial f_3}{\partial \beta_3} d\beta_3 - \frac{\partial f_3}{\partial L_3} dL_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

将式(8)简化为

$$\mathbf{M}\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{N} \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X} & \frac{\partial f_1}{\partial Y} & \frac{\partial f_1}{\partial Z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial X} & \frac{\partial f_2}{\partial Y} & \frac{\partial f_2}{\partial Z} \\ \frac{\partial f_3}{\partial X} & \frac{\partial f_3}{\partial Y} & \frac{\partial f_3}{\partial Z} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [dX \ dY \ dZ]^T$$

$$\mathbf{N} = [N_1 \ N_2 \ N_3]^T \quad N_i = \mathbf{C}_i \delta \mathbf{p}_i$$

$$\mathbf{C}_i =$$

$$-\begin{bmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial s_i} & \frac{\partial f_i}{\partial R_i} & \frac{\partial f_i}{\partial r_i} & \frac{\partial f_i}{\partial e_{1i}} & \frac{\partial f_i}{\partial e_{2i}} & \frac{\partial f_i}{\partial h_i} & \frac{\partial f_i}{\partial \alpha_i} & \frac{\partial f_i}{\partial \beta_i} & \frac{\partial f_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial f_i}{\partial L_i} \end{bmatrix}$$

$$\delta \mathbf{p}_i =$$

$$[ds_i \ dR_i \ dr_i \ de_{1i} \ de_{2i} \ dh_i \ d\alpha_i \ d\beta_i \ d\theta_i \ dL_i]^T$$

式中 $\boldsymbol{\varepsilon}$ ——动平台质心位置误差

$\delta \mathbf{p}_i$ ——机器人3条支链中零部件加工过程中的尺寸误差、驱动误差和装配误差在内的各项几何误差源的集合

\mathbf{C}_i ——与具体机械结构相关的位置误差系数矩阵

\mathbf{M}' ——直线驱动型并联机器人的逆雅可比矩阵 \mathbf{J}^{-1} ,与并联机器人位置及结构参数有关

若并联机器人处于奇异位置时, $|\mathbf{J}^{-1}| = 0$,该方程没有研究意义。因为此时动平台处于奇异位置,在这种情况下,机构的实际自由度不再与理论自由度相等,即存在2种情况:①机构丧失了应有的自由

度。②机构获得了额外的自由度。机构自由度的丧失意味着机构某种功能的丧失;机构获得额外的自由度则意味着即使锁定所有的驱动输入,机构在外力的作用下仍能运动,导致机构失控;当 $|\mathbf{J}^{-1}| \neq 0$ 时,并联机器人处于非奇异位置,式(9)可以表示为

对式(7)进行微分得

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X} & \frac{\partial f_1}{\partial Y} & \frac{\partial f_1}{\partial Z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial X} & \frac{\partial f_2}{\partial Y} & \frac{\partial f_2}{\partial Z} \\ \frac{\partial f_3}{\partial X} & \frac{\partial f_3}{\partial Y} & \frac{\partial f_3}{\partial Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} =$$

度。②机构获得了额外的自由度。机构自由度的丧失意味着机构某种功能的丧失;机构获得额外的自由度则意味着即使锁定所有的驱动输入,机构在外力的作用下仍能运动,导致机构失控;当 $|\mathbf{J}^{-1}| \neq 0$ 时,并联机器人处于非奇异位置,式(9)可以表示为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N} \quad (10)$$

式(10)为直线驱动型并联机器人的误差映射函数,从式(10)可以看出,影响并联机器人动平台末端位置精度的误差源共有30项。

3 误差灵敏度分析

3.1 误差灵敏度模型建立

由于影响直线驱动型并联机器人动平台末端位置精度的误差源共有30项,对其逐一进行误差辨识相当复杂和繁琐,所以,在此建立灵敏度模型来分析各个误差源对动平台末端位置精度的影响^[17-20],并定义全局灵敏度指标,根据全局灵敏度指标值来筛选对动平台位置精度影响较大的误差源进行辨识。在建立灵敏度模型之前,先作2个假设:①式(9)中 $\delta \mathbf{p}_i$ 的所有误差元素在统计学上是独立的,即它们之间的协方差为零。②所有误差元素都服从标准正态分布,即它们均值为零。根据2个假设和式(10),可以得出

$$D(\boldsymbol{\varepsilon}) = E(\boldsymbol{\varepsilon}^2) = E(dX^2 + dY^2 + dZ^2) =$$

$$E(dX^2) + E(dY^2) + E(dZ^2) =$$

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^{10} \lambda_{ik}^2 E(\delta p_{ik}^2) \quad (11)$$

式中 λ_{ik} —— $\boldsymbol{\lambda}_i$ 中第 k 个元素

δp_{ik} —— δp_i 中第 k 个元素

其中

$$\lambda_i = M^{-1} C_i$$

又因为直线驱动型并联机器人中 3 条支链呈 120° 对称分布, 可以认为各条支链中同类的几何误差具有相同的数字特征, 于是有

$$E(\delta p_k^2) = E(\delta p_{1k}^2) = E(\delta p_{2k}^2) = E(\delta p_{3k}^2) \quad (12)$$

据此, ε 的标准差可以表示为

$$\sigma(\varepsilon) = \sqrt{D(\varepsilon)} = \sqrt{\sum_{k=1}^{10} \omega_k^2 D(\delta p_k)} = \sqrt{\sum_{k=1}^{10} \omega_k^2 \sigma^2(\delta p_k)} \quad (13)$$

其中

$$\omega_k = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^{10} \lambda_{ik}^2}$$

式中 ω_k —— δ 关于 δp_k 的灵敏系数

ω_k 表征由 δp_k 各误差源的单位标准差所引起动平台质心位置误差 ε 的标准差, 又注意到 λ_{ik} 随着机器人的位置变化而变化, 所以用其在整个任务空间中的全域均值作为灵敏度评价指标, 该指标可表示为

$$\bar{\omega}_k = \frac{\int_V \omega_k dV}{V} \quad (14)$$

3.2 误差灵敏度分析

利用式(14)对直线驱动型并联机器人进行误差灵敏度分析, 取并联机器人任务空间为 $\phi 600 \times 200$ 的圆柱体, 并联机器人主要部件参数如表 1 所示。

表 1 直线驱动型机器人主要部件参数

Tab.1 Main parameters of linear driven robot

参数	R/mm	r/mm	h/mm	L/mm	$\theta/(^\circ)$
数值	740	60	98.5	610	38

由图 4 可以看出, 电缸与静平台底面安装夹角 θ 和 3 条支链在静平台上的分布角度 α 对整个工作空间内机器人动平台末端执行器定位精度影响最大, 其次是电缸滑块的驱动 s 和平行四边形从动杆杆长 L 对末端执行器定位精度较大, 对末端执行器定位精度影响稍大的是静平台半径 R 、动平台半径 r 和从动杆在动平台上的分布角度 β , 对末端执行器定位精度影响最小的是平行四边形从动杆分别与滑块和动平台接触处的定位尺寸 e_1 、 e_2 和滑块高度 h ; 为此, 在进行参数误差辨识时, 将不考虑定位尺寸 e_1 、 e_2 和 h 的误差对机器人末端执行器位置精度的影响。

为了验证定位尺寸 e_1 、 e_2 和滑块高度 h 确实对末端位置精度影响不大, 利用蒙特卡洛模拟法计算末端位置误差在不同高度上的分布规律, 利用 Matlab 中 randn 函数随机产生均值为零的参数误

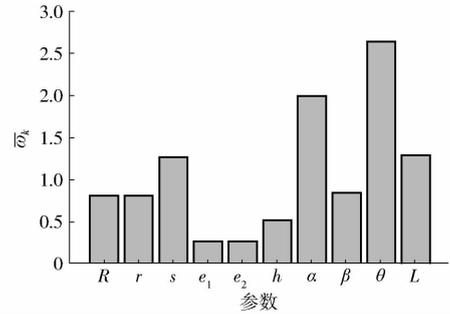


图 4 灵敏度直方图

Fig. 4 Histogram of sensitivity

差, 其中, 线性误差的标准差为 0.01 mm , 角度误差的标准差为 0.02 mm/m ; 分未考虑和考虑定位尺寸 e_1 、 e_2 和滑块高度 h 2 种情况, 在每种情况下, 在任务空间中分别取上、下 2 个平面, 利用 Matlab 进行 50 次的模拟误差仿真, 仿真结果如图 5 所示。

由分布图可以看出, 随着工作平面到静平台距离的增大, 相应工作平面的位置误差也随之增大; 通过对比可以看出, 2 种情况下不同平面的位置误差分布图基本上是吻合的, 所以灵敏度系数小的误差源对位置误差影响极小, 基本可以忽略。因此只需要进行 21 项误差参数的辨识, 就能有效地补偿直线驱动型并联机器人的位置误差。

4 实验验证

为验证上述所得结论对直线驱动型并联机器人精度标定的有效性和可行性, 对并联机器人进行测量。实验所用测试平台如图 6 所示, 测量工具是 FARO 公司的激光跟踪仪 Vantage (测试精度为 $(16 + 0.8) \mu\text{m/m}$), 并用相应的辅助装夹设备来实时测量动平台中心的位置。在直线驱动型并联机器人理论工作空间中选取一些测量点, 通过位置逆解出这些点的电缸滑块位置, 控制机器人运动到所选取点处, 用激光跟踪仪测量其在激光跟踪仪坐标系下的空间坐标, 限于篇幅, 选取部分点的理论坐标和实测坐标如表 2 所示。

由误差灵敏度分析得, 只需要进行 21 项误差参数的辨识, 就能有效地补偿机器人的标定精度。这里选用遗传算法对其进行参数辨识, 设任意 2 个测量点在机器人正解模型下的坐标分别为 r_i 和 r_j , 在激光跟踪仪坐标下的坐标为 R_i 和 R_j , 为了避免标定测量过程中机器人坐标系与测量装置坐标系之间转换带来的误差, 采用相对位置替代绝对位置, 所以定义残差

$$\tau_{ij} = |R_i - R_j| - |r_i - r_j| = |R_i - R_j| - |f(m_i + dm, p + dp) - f(m_j + dm, p + dp)| \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

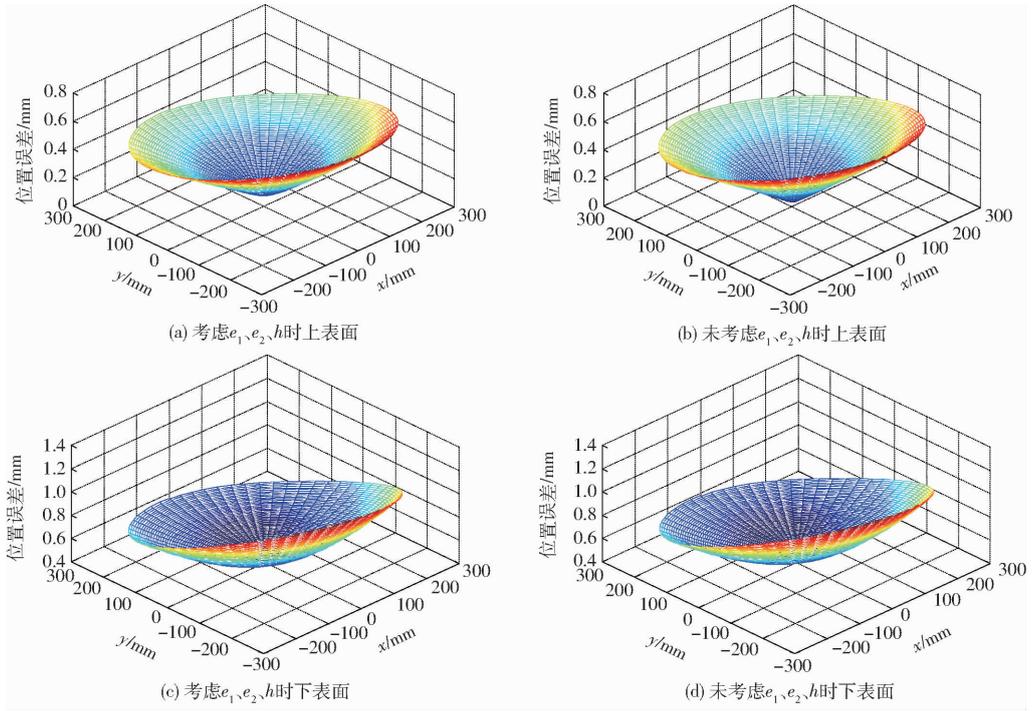


图5 不同平面下的位置误差分布

Fig.5 Distribution maps of position error within different planes

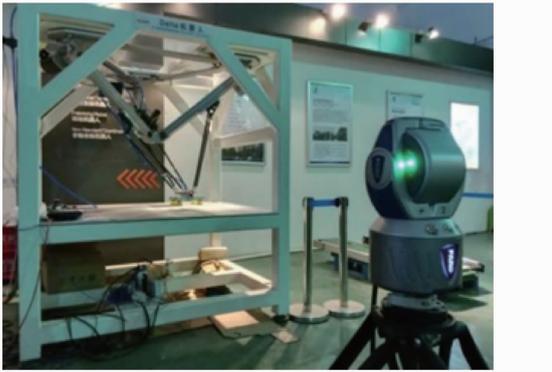


图6 机器人标定测量现场

Fig.6 Scene of test equipment

选定遗传算法的适应度函数为

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tau_{ij}^2 \tag{16}$$

理论上存在某一 dm 和 dp , 使得 F 能够取到最小值 0, 但由于存在一些不可避免的动态误差和测量误差, 所以只能让 F 尽可能地接近 0, 利用 Matlab 遗传算法工具箱解得各项误差源结果如表 3 所示。为评估误差补偿效果, 定义机器人综合误差为 $\sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$, 以 $z = 959.070$ mm 平面为例, 由测量结果可知, 标定前平均综合误差为 0.7827 mm, 最大综合误差为 1.2365 mm, 如图 7 所示; 用辨识的各

表2 机器人理论坐标和激光跟踪仪测量坐标

Tab.2 Theoretical coordinates and measured coordinates

mm

序号	激光跟踪仪测量坐标值			理论模型的坐标值		
	x	y	z	x	y	z
1	-10.970	-10.294	915.422	0	0	959.070
2	-10.985	-162.215	914.195	0	-150.000	959.070
3	-11.009	-141.991	914.415	0	-130.000	959.070
4	-11.037	-111.549	914.705	0	-100.000	959.070
5	-11.049	-60.854	915.119	0	-50.000	959.070
6	-11.028	20.192	915.570	0	30.000	959.070
7	-10.910	70.719	915.766	0	80.000	959.070
8	-10.688	141.001	915.611	0	150.000	959.070
9	0.609	0.613	815.980	10.000	10.000	860.000
10	0.967	1.019	765.772	10.000	10.000	810.000
11	6.959	7.028	705.849	20.000	20.000	750.000
12	8.443	8.643	916.317	20.000	20.000	960.000
13	9.632	9.233	986.759	20.000	20.000	1030.000

续表 2

mm

序号	激光跟踪仪测量坐标值			理论模型的坐标值		
	x	y	z	x	y	z
14	10.089	9.095	1 006.901	20.000	20.000	1 050.000
15	8.884	-162.174	914.014	20.000	-150.000	959.070
16	8.854	-131.930	914.334	20.000	-120.000	959.070
17	-1.381	-10.342	915.464	10.000	0	959.070
18	38.106	-10.356	915.177	40.000	0	959.070
19	127.289	-10.537	914.691	140.000	0	959.070
20	-139.842	0.081	916.947	-130.000	10.000	959.070
21	-60.862	-0.007	916.028	-50.000	10.000	959.070
22	18.270	-0.146	915.334	30.000	10.000	959.070
23	-120.203	10.190	916.754	-110.000	20.000	959.070
24	47.968	9.908	915.206	60.000	20.000	959.070

表 3 各项误差近似解

Tab.3 Approximate solution of errors

支链	dR_i/mm	dr_i/mm	ds_i/mm	dL_i/mm	$d\alpha_i/(^\circ)$	$d\beta_i/(^\circ)$	$d\theta_i/(^\circ)$
1	-0.601	0.466	0.715	-0.468	-0.361	-1.083	-0.040
2	0.729	-1.042	-0.410	0.358	-0.963	1.123	-1.163
3	0.910	-0.844	0.669	-0.536	-1.203	1.324	-0.842

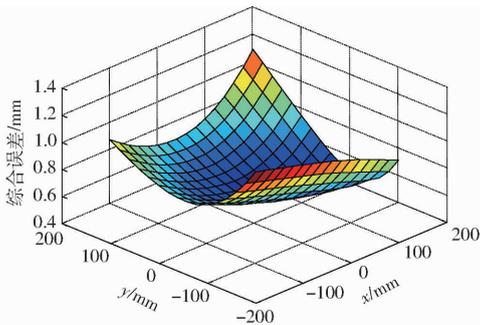


图 7 $z = 959.070$ mm 平面标定前动平台末端位置综合误差

Fig.7 End position volume errors of moving platform of $z = 959.070$ mm plane before calibration

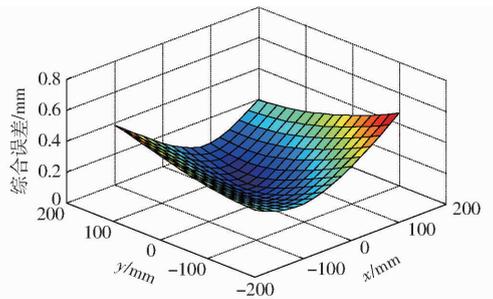


图 8 $z = 959.070$ mm 平面标定后动平台末端位置综合误差

Fig.8 End position volume errors of moving platform of $z = 959.070$ mm plane after calibration

项误差源值修正机器人的运动学模型后,用激光跟踪仪重新测量机器人动平台末端位置误差,测量结果为:综合误差为 0.261 7 mm,最大综合误差为 0.588 9 mm,如图 8 所示。由标定前后的测量结果表明,通过分析误差灵敏度,依据全域灵敏度指标,利用所提出的误差源筛选方案去除对直线驱动型并联机器人动平台末端位置误差影响较小的误差源,只考虑对筛选后的误差源进行辨识,不但提高了误差辨识的效率,而且保证了机器人的标定精度。

5 结论

(1)根据直线驱动型并联机器人几何结构模型和运动学模型,利用解析法建立动平台末端操作空

间与关节空间之间的误差映射模型。

(2)在误差灵敏度模型的基础上,依据全域灵敏度评价指标,提出了一种误差源筛选方案,筛选影响位置精度的主要误差源,利用蒙特卡洛法进行随机模拟实验仿真,发现筛选前后动平台位置误差基本一致,验证了全域灵敏度评价指标的正确性。

(3)以激光跟踪仪为测量工具,对筛选后的主要误差源进行辨识,并修正并联机构的运动学模型,补偿后的平均综合误差为 0.261 7 mm,与补偿前的平均综合误差 0.782 7 mm 相比,机器人的位置精度显著提高,验证了依据全域灵敏度指标所提出的误差源筛选方案对简化误差源和提高误差辨识效率是可行和有效的。

参 考 文 献

1 VISCHER P, CLAVEL R. Kinematic calibration of the parallel Delta robot[J]. Robotica,1998,6(2):207-218.

- 2 VEITSCHEGGER W K, WU C H. Robot calibration and compensation [J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1988, 4(6):643 – 656.
- 3 DEBLAISE D, MAUR P. Effective geometrical calibration of a Delta parallel robot used in neurosurgery [C] // *IEEE /RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005:1313 – 1318.
- 4 RENAUD P, ANDREFF N, MARQUET F, et al. Vision-based kinematic calibration of a H4 parallel mechanism [C] // *2003 International Conference on Robotics and Automation*, 2003, 1:1191 – 1196.
- 5 RENAUD P, ANDREFF N, LAVEST J M, et al. Simplifying the kinematic calibration of parallel mechanisms using vision-based metrology [J]. *IEEE Transaction on Robotics*, 2006, 22(1):12 – 22.
- 6 GROTJAHN M, DAEMI M, HEIMANN B. Friction and rigid body identification of robot dynamics [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, 38(10):1889 – 1902.
- 7 MARTINELLI A, TOMATIS N. Simultaneous localization and odometry calibration for mobile robot [C] // *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2003:1499 – 1504.
- 8 RAUF A, PERVEZ A, UCHIYAMA M. Experimental results on kinematic calibration of parallel manipulators using pose measurement device [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(2):379 – 384.
- 9 MARCO A, STEVEN D. An analytical method to eliminate the redundant parameters in robot calibration [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2000:3609 – 3615.
- 10 KHALIL M, GAUTIER M. Identifiable parameters and optimum configurations for robots calibration [J]. *Robotica*, 1991, 9(1):63 – 70.
- 11 唐国宝, 黄田. Delta 并联机构精度标定方法研究 [J]. *机械工程学报*, 2003, 39(8):55 – 60.
TANG Guobao, HUANG Tian. Research on precision calibration method of Delta parallel mechanism [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(8):55 – 60. (in Chinese)
- 12 张文昌, 梅江平, 刘艺, 等. 基于激光跟踪仪的 Delta 并联机构运动学误差标定 [J]. *天津大学学报*, 2013, 46(3):257 – 262.
ZHANG Wenchang, MEI Jiangping, LIU Yi, et al. Kinematic calibration error of Delta parallel mechanism based on laser tracker [J]. *Journal of Tianjin University*, 2013, 46(3):257 – 262. (in Chinese)
- 13 马晓丽, 马履中, 周兆忠. 新型 4 自由度并联机构的运动学建模与分析 [J]. *农业机械学报*, 2006, 37(3):100 – 104.
MA Xiaoli, MA Lüzhong, ZHOU Zhaozhong. Kinematics modeling and analysis of a 4-DOF parallel mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(3):100 – 104. (in Chinese)
- 14 VERL A, BOYE T, POTT A. Measurement pose selection and calibration forecast for manipulators with complex kinematic structures [J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2008, 57:425 – 428.
- 15 马晓丽, 陈艾华, 陈晓英, 等. 虚拟轴工作台机构的误差分析和补偿 [J]. *农业机械学报*, 2007, 38(11):123 – 128.
MA Xiaoli, CHEN Aihua, CHEN Xiaoying, et al. Error analysis and compensation of a parallel mechanism for virtual-axial worktable [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(11):123 – 128. (in Chinese)
- 16 谭兴强, 张键, 谢志江. 风洞 6_PUS 并联支撑机器人运动误差建模与补偿 [J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(4):334 – 340. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140453&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.053.
TAN Xingqiang, ZHANG Jian, XIE Zhijiang. Motion error modeling and compensating for 6_PUS parallel robot of wind tunnel support system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(4):334 – 340. (in Chinese)
- 17 CHEN Yuzhen, XIE Fugui, LIU Xinjun, et al. Error modeling and sensitivity analysis of a parallel robot with SCARA motions [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 27(4):693 – 702.
- 18 李晓丹. 3-SPR 机构的误差灵敏度分析 [J]. *机床与液压*, 2015, 15(8):44 – 46.
LI Xiaodan. Error sensitivity analysis of 3-SPR mechanism [J]. *Machine Tool and Hydraulic*, 2015, 15(8):44 – 46. (in Chinese)
- 19 洪振宇, 梅江平, 赵学满, 等. 可重构混联机械手——TriVariant 的误差建模与灵敏度分析 [J]. *机械工程学报*, 2006, 42(12):65 – 69.
HONG Zhenyu, MEI Jiangping, ZHAO Xueman, et al. Error modeling and sensitivity analysis of reconfigurable hybrid robot module TriVariant [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(12):65 – 69. (in Chinese)
- 20 FAN K C, WANG H, ZHAO J W, et al. Sensitivity analysis of the 3-PRS parallel kinematic spindle platform of a serial-parallel machine tool [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(15):1561 – 1569.