

精密装配用并联机器人标定及机构误差分析

张国庆, 杜建军

(哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 518055 广东 深圳)

摘要: 为了提高手机摄像头的装配精度, 设计开发一款用于精密装配的小型并联机器人, 并对机器人进行标定以及机构误差分析. 用数值方法推导机器人的正逆运动学模型和误差模型, 并探讨机器人运动学模型和误差补偿模型衔接的问题; 设计在桥式三坐标测量机上进行测量标定的方法, 并对机器人进行标定实验; 从机构角度对机器人的间隙误差来源进行分析, 分析机器人构型对间隙误差的约束, 并对机器人进行重复定位精度测试. 经过标定及机构误差控制, 机器人位姿坐标的最大位移误差由 0.345 9 mm 降为 0.012 1 mm, 最大转角误差由 0.007 3 rad 降为 0.001 1 rad, 重复定位精度为 0.004 8 mm. 实验结果表明该标定方法及机构误差分析方法能有效提高机器人的精度.

关键词: 并联机器人; 标定; 运动学; 误差补偿; 测量

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)02-0047-06

Calibration and mechanical error analysis of a parallel manipulator used for a precise assembly

ZHANG Guoqing, DU Jianjun

(Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, 518055 Shenzhen, Guangdong, China)

Abstract: To improve the assembly precision of mobile phone camera, a small-sized parallel manipulator (SSPM) used for precise assembly was developed, and a calibration test and mechanical error analysis were conducted. First, an error model and the forward-inverse kinematic model were derived using numerical method, and the connection problem between the error model and the kinematic model was studied. Second, a calibration procedure was designed and a calibration test was conducted on coordinate measuring machine (CMM). Finally, an analysis on the error sources of SSPM was conducted from the mechanical view, the effect of SSPM's structure on the gap error was analyzed, and a repeatability test of SSPM was conducted to represent the gap error. After calibration and mechanical error control, the maximum displacement error decreases from 0.345 9 mm to 0.012 1 mm, the maximum angular error decreases from 0.007 3 rad to 0.001 1 rad, and the repeatability of SSPM is 0.004 8 mm. Experimental results show that the calibration and mechanical error control method on SSPM can effectively improve the accuracy of SSPM.

Key words: parallel manipulators; calibration; kinematics; error compensation; measurement

手机摄像头的装配是一项精密复杂的工作. 在某些情况下, 需要将手机摄像头粘在 PCB 板上的某个固定位置, 这时对摄像头安装精度的要求更高: 一是安装摄像头位置的精度要求; 二是摄像

头镜头轴线与 PCB 板垂直度的精度要求. 在此情形下, 一般手工安装既费时, 又保证不了安装精度, 生产效率低下.

为了提高手机摄像头的装配精度, 提高生产率, 开发了一款基于 6-SPS 机构的小型并联机器人并对其进行运动学标定. 通常来说, 通过机器人结构参数的辨识补偿能够显著提高机器人的运行精度^[1-2], 但要使机器人具有较高的重复定位精度和运行精准度, 就需要控制及减小机构件的间隙误差及尺寸误差^[3].

收稿日期: 2012-03-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805030); 深圳市科技研发资金资助项目(JC2010005260164A; CXB201105100074A; JC201105160518A).

作者简介: 张国庆(1982—), 男, 博士研究生.

通信作者: 杜建军, jjdu@hit.edu.cn.

对于 6-SPS 型机器人的运动学参数标定, 科研学者们做了很多研究. 杨晓钧等^[4]对 6-SPS 结构的自标定方法进行了研究; 其他学者的研究主要集中在测量方法的改进^[5-7]以及标定理论^[8-10]的探讨等方面. 然而, 对于精密型 6-SPS 机器人的标定测量方法以及机构误差分析的研究却很少. 另外, 由于较难获得 6-SPS 机器人的运动学封闭解^[11], 一般是通过数值计算方法求解, 故存在着误差模型补偿运动学参数后无法自动趋近目标点, 即运动学模型和误差补偿模型衔接的问题, 对于该问题的研究目前还未见报道.

本文在利用全微分法推导其误差模型的基础上, 对机器人运动学模型和误差补偿模型衔接的问题进行了探讨. 针对机器人的尺寸较小、精度要求高的特点, 设计了在精密型桥式三座标测量机上进行测量标定的方法及步骤, 并对机构间隙误差的来源及控制方法进行了研究. 本文提出的标定方法及机构误差分析与控制方法对开发精密型并联机器人具有参考价值.

1 数学模型

1.1 机器人的运动学模型

图 1 所示为精密装配用并联机器人的结构图.

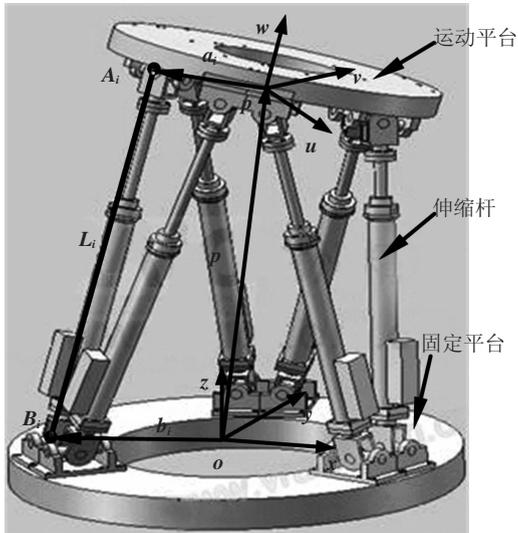


图 1 精密装配用并联机器人结构图

在图 1 中, 机器人的固定平台和运动平台中心点分别固连坐标系 $o-xyz$ 和坐标系 $p-uvw$, B_i 点在坐标系 $o-xyz$ 中的坐标表示为向量 b_i , A_i 点在坐标系 $p-uvw$ 中的坐标表示为向量 a_i , 向量 p , a_i, b_i, L_i 形成了封闭的向量环. 从这个向量环中

可以求得

$$l_i u_i = p + {}^B R_A a_i - b_i, \quad (i = 1, 2, \dots, 6). \quad (1)$$

式中: l_i 为 L_i 的长度, u_i 为伸缩杆的单位方向向量,

$${}^B R_A = \text{Rot}(z, \gamma) \text{Rot}(y, \beta) \text{Rot}(x, \alpha) =$$

$$\begin{bmatrix} c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \\ s\gamma c\beta & s\gamma s\beta s\alpha + c\gamma c\alpha & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha \end{bmatrix}$$

为旋转矩阵, α, β, γ 为欧拉角 c 代表 \cos , s 代表 \sin .

式(1)即是该并联机器人的逆运动学模型, 对式(1)两端求微分可得

$$\delta l_i u_i + l_i \delta u_i = \delta p + \delta {}^B R_A a_i, \quad (i = 1, 2, \dots, 6). \quad (2)$$

式(2)中旋转矩阵的微分 $\delta {}^B R_A$ 可以表示为

$$\delta {}^B R_A = \Omega {}^B R_A = \delta \omega \times {}^B R_A, \quad (3)$$

式(3)中,

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\delta\gamma & \delta\beta \\ \delta\gamma & 0 & -\delta\alpha \\ -\delta\beta & \delta\alpha & 0 \end{bmatrix},$$

$$\delta \omega = [\delta\alpha \quad \delta\beta \quad \delta\gamma]^T.$$

将式(3)代入式(2)并用伸缩杆的单位方向向量 u_i 点乘式(2)的两端, 可得

$$\begin{aligned} \delta l_i &= u_i \cdot \delta p + u_i \cdot \delta \omega \times {}^B R_A a_i = \\ & [u_i^T \quad ({}^B R_A a_i \times u_i)^T] \begin{bmatrix} \delta p \\ \delta \omega \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (i = 1, 2, \dots, 6). \quad (4)$$

由式(4)可得机器人的伸缩杆长度变分与位姿坐标变分间的关系表达式为

$$\delta l = J \delta X. \quad (5)$$

式中:

$$\delta l = [\delta l_1 \quad \delta l_2 \quad \delta l_3 \quad \delta l_4 \quad \delta l_5 \quad \delta l_6]^T$$

为机器人伸缩杆长度变分;

$$\delta X = [\delta p_x \quad \delta p_y \quad \delta p_z \quad \delta\alpha \quad \delta\beta \quad \delta\gamma]^T$$

为机器人的位姿坐标变分;

$$J = \begin{bmatrix} u_1^T & ({}^B R_A a_1 \times u_1)^T \\ \vdots & \vdots \\ u_6^T & ({}^B R_A a_6 \times u_6)^T \end{bmatrix}$$

为 Jacobian 矩阵.

在机器人的工作空间内, Jacobian 矩阵 J 可逆, 所以式(5)可写成式(6)的形式:

$$\delta X = J^{-1} \delta l. \quad (6)$$

由于 6-SPS 型机器人没有正运动学封闭解, 所以在实际计算中一般是采用数值迭代求解. 在得到伸缩杆长度变分与位姿坐标变分间的关系表达式的基础上, 就可以用牛顿迭代法求解机器人的正运动学解, 求解流程如图 2 所示.

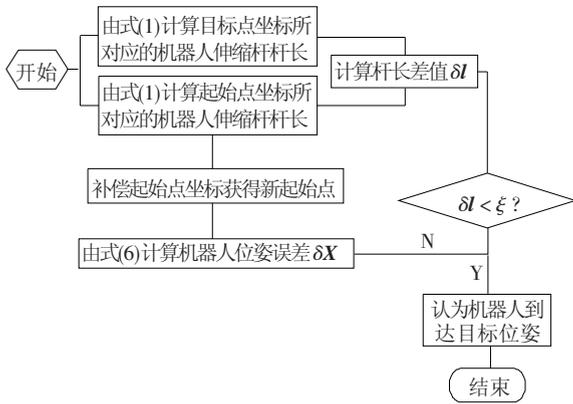


图 2 机器人正运动学计算流程图

1.2 机器人的误差模型

如果将式(1)两端分别点乘自身并写成泛函形式, 可得如下表达式:

$$F_i = l_i^2 - (\mathbf{p} + {}^B\mathbf{R}_A \mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i)^T (\mathbf{p} + {}^B\mathbf{R}_A \mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i) = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, 6). \quad (7)$$

将式(7)中泛函 F_i 写成参数 $l_i, \mathbf{b}_i, \mathbf{a}_i, \mathbf{p}, \alpha, \beta, \gamma$ 的全微分, 可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_i}{\partial l_i} \delta l_i + \frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{b}_i} \delta \mathbf{b}_i + \frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{a}_i} \delta \mathbf{a}_i + \frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{p}} \delta \mathbf{p} + \\ \frac{\partial F_i}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial F_i}{\partial \beta} \delta \beta + \frac{\partial F_i}{\partial \gamma} \delta \gamma = 0, \end{aligned} \quad (i = 1, 2, \dots, 6). \quad (8)$$

式中: $\partial F_i / \partial l_i = 2l_i$, 假定 $\mathbf{C}_i = \mathbf{p} + {}^B\mathbf{R}_A \mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i$, 易知 \mathbf{C}_i 是列向量并且有

$$\begin{cases} \frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{b}_i} = 2\mathbf{C}_i^T, \\ \frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{a}_i} = -2\mathbf{C}_i^T {}^B\mathbf{R}_A, \\ \frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{p}} = -2\mathbf{C}_i^T, \\ \frac{\partial F_i}{\partial \alpha} = -2\mathbf{C}_i^T \frac{\partial {}^B\mathbf{R}_A}{\partial \alpha} \mathbf{a}_i, \\ \frac{\partial F_i}{\partial \beta} = -2\mathbf{C}_i^T \frac{\partial {}^B\mathbf{R}_A}{\partial \beta} \mathbf{a}_i, \\ \frac{\partial F_i}{\partial \gamma} = -2\mathbf{C}_i^T \frac{\partial {}^B\mathbf{R}_A}{\partial \gamma} \mathbf{a}_i. \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中:

$$\frac{\partial {}^B\mathbf{R}_A}{\partial \alpha} = \begin{bmatrix} 0 & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha & -c\gamma s\beta s\alpha + s\gamma c\alpha \\ 0 & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha & -s\gamma s\beta s\alpha - c\gamma c\alpha \\ 0 & c\beta c\alpha & -c\beta s\alpha \end{bmatrix},$$

$$\frac{\partial {}^B\mathbf{R}_A}{\partial \beta} = \begin{bmatrix} -c\gamma s\beta & c\gamma c\beta s\alpha & c\gamma c\beta c\alpha \\ -s\gamma s\beta & s\gamma c\beta s\alpha & s\gamma c\beta c\alpha \\ -c\beta & -s\beta s\alpha & -s\beta c\alpha \end{bmatrix},$$

$$\frac{\partial {}^B\mathbf{R}_A}{\partial \gamma} = \begin{bmatrix} -s\gamma c\beta & -s\gamma s\beta s\alpha - c\gamma c\alpha & -s\gamma s\beta c\alpha + c\gamma s\alpha \\ c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

将式(8)写成矩阵形式可得

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \mathbf{p}} & \frac{\partial F_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_1}{\partial \beta} & \frac{\partial F_1}{\partial \gamma} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_6}{\partial \mathbf{p}} & \frac{\partial F_6}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_6}{\partial \beta} & \frac{\partial F_6}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \mathbf{p} \\ \delta \alpha \\ \delta \beta \\ \delta \gamma \end{bmatrix} = \mathbf{M}_j [\delta l_1 \ \dots \ \delta l_6 \ \delta \mathbf{b}_1 \ \dots \ \delta \mathbf{b}_6 \ \delta \mathbf{a}_1 \ \dots \ \delta \mathbf{a}_6]^T. \quad (10)$$

在式(10)中, \mathbf{M}_j 表示为

$$\mathbf{M}_j = - \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial l_1} & 0 & 0 & \frac{\partial F_1}{\partial \mathbf{b}_1} & 0 & 0 & \frac{\partial F_1}{\partial \mathbf{a}_1} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial F_6}{\partial l_6} & 0 & 0 & \frac{\partial F_6}{\partial \mathbf{b}_6} & 0 & 0 & \frac{\partial F_6}{\partial \mathbf{a}_6} \end{bmatrix}.$$

如令

$$\mathbf{Q}_j = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \mathbf{p}} & \frac{\partial F_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_1}{\partial \beta} & \frac{\partial F_1}{\partial \gamma} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_6}{\partial \mathbf{p}} & \frac{\partial F_6}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_6}{\partial \beta} & \frac{\partial F_6}{\partial \gamma} \end{bmatrix}, \quad \Delta \mathbf{X}_j = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{p} \\ \delta \alpha \\ \delta \beta \\ \delta \gamma \end{bmatrix},$$

$\Delta \mathbf{S} = [\delta l_1 \ \dots \ \delta l_6 \ \delta \mathbf{b}_1 \ \dots \ \delta \mathbf{b}_6 \ \delta \mathbf{a}_1 \ \dots \ \delta \mathbf{a}_6]^T$, 则式(10)可以写成

$$\mathbf{Q}_j \Delta \mathbf{X}_j = \mathbf{M}_j \Delta \mathbf{S}. \quad (11)$$

如果机器人运行在其工作空间内, 此时 \mathbf{Q}_j^{-1} 存在, 则式(11)可以写成

$$\Delta \mathbf{X}_j = \mathbf{Q}_j^{-1} \mathbf{M}_j \Delta \mathbf{S}. \quad (12)$$

在方程组(12)中有 6 个位姿坐标分量已知, 却要求标定 42 个结构参数, 所以至少需要测量机器人 7 个位姿, 方能求解出机器人的 42 个结构参数, 矩阵方程组如下所示:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_1 \\ \Delta \mathbf{X}_2 \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{X}_n \end{bmatrix}_{6n \times 1} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1^{-1} \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{Q}_2^{-1} \mathbf{M}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_n^{-1} \mathbf{M}_n \end{bmatrix}_{6n \times 42} \Delta \mathbf{S}_{42 \times 1}, \quad n \geq 7. \quad (13)$$

如令

$$\Delta \mathbf{X} = [\Delta \mathbf{X}_1 \ \Delta \mathbf{X}_2 \ \dots \ \Delta \mathbf{X}_n]^T,$$

$$\mathbf{J} = [\mathbf{Q}_1^{-1} \mathbf{M}_1 \ \mathbf{Q}_2^{-1} \mathbf{M}_2 \ \dots \ \mathbf{Q}_n^{-1} \mathbf{M}_n]^T,$$

则式(13)可以表示为

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{S}. \quad (14)$$

对于式(14)中机器人结构参数误差 $\Delta \mathbf{S}$, 可以采用 MATLAB 中的 lsqr 工具箱进行求解, 能得到理想的计算结果。

1.3 机器人运动学模型与误差模型的衔接

在 6-SPS 型机器人的正运动学计算过程中,机器人的起点和目标点都必须事先知道(见图 2),因此,无法用 6-SPS 补偿后的运动学模型去预测测试点的位姿新坐标,即存在着误差模型补偿结构参数后不能用补偿后的运动学模型直接去计算测试点离测量值更近的位姿坐标值的问题。

在本文中,首先通过逆运动学计算测试点 X 所对应得伸缩杆长度 l 并记录下来. 在机器人结构参数补偿后,利用先前记录的伸缩杆长度作为目标长度去计算机器人的正运动学(见图 2). 在这种情况下,测试点的位姿坐标能够更趋近于测量值一步. 因此迭代可以继续,迭代流程图如图 3 所示。

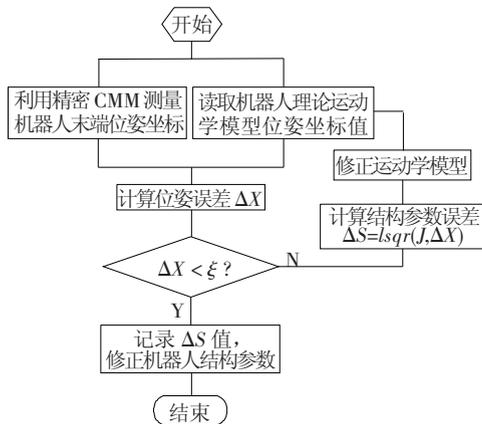


图 3 机器人结构参数迭代计算流程图

2 机器人的测量方法

由于精密装配用并联机器人尺寸较小,精度要求较高,故选择 ZEISS 桥式三坐标测量机作为测量设备,测量精度为 $0.6 \mu\text{m}$ 。

在测量前,需要在机器人的上、下平台上分别开设中心孔 h 和标识孔 q ,用以确定坐标系 $o-xyz$ 的原点 o 和 y 轴方向,如图 4 所示。

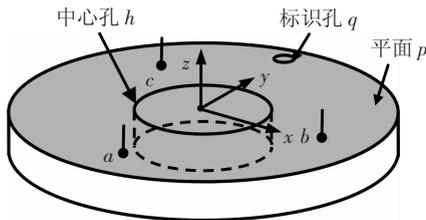


图 4 机器人测量模型简图

测量时,首先在下平台上测量 3 点 a, b, c 或更多点确定坐标平面 p ,以过 o 点并且垂直平面 p 的方向作为 z 轴,便可确定基坐标系 $o-xyz$. 用同样的方法可以确定上平台的坐标系 $p-uvw$,从而得到运动平台坐标系在基坐标系下的姿态。

为了测量方便,将机器人安装在事先设计的‘L’形固定座上,如图 5 所示。

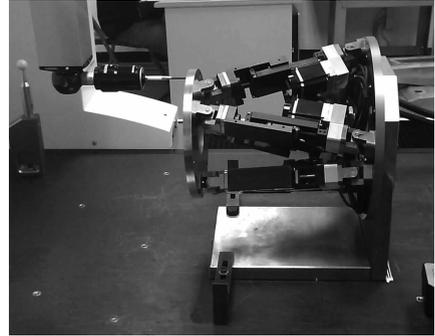


图 5 机器人标定测量图

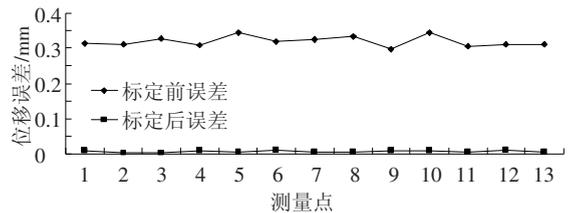
测量后测量计算软件会给出运动平台坐标系 $p-uvw$ 的各坐标轴在基坐标系下的坐标分量,表示为

$${}^oP_p = [x, y, z]^T, \quad {}^oR_p = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix}$$

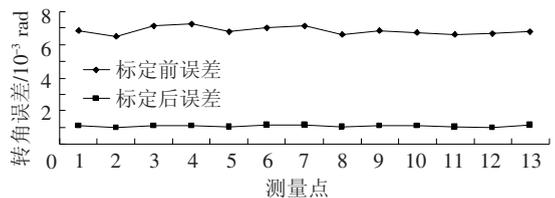
式中 oR_p 为旋转矩阵,通过旋转矩阵可以计算求得旋转角度 α, β, γ 。

3 标定实验结果

按照介绍的测量方法,在机器人的工作空间内选择 13 个分散点进行测量与标定,实验结果表明:经过一次误差补偿,机器人位姿坐标的最大位移误差由 0.3459 mm 降为 0.0121 mm ,最大转角误差由 0.0073 rad 降为 0.0011 rad . 标定前后误差对比如图 6 所示。



(a) 标定前后位移误差对比



(b) 标定前后转角误差对比

图 6 标定前后误差对比图

在机器人的标定中可根据精度要求进行多轮标定,但在经过了 1~2 轮的机器人标定后继续增加标定轮次,精度并不会显著提高,这主要是因为机构运动副的间隙等因素造成的误差起了主

导作用.

4 机构误差分析

在机器人的装配作业中, 误差的来源是多方面的: 既包括温度变化、振动等外界因素对装配造成的随机误差, 也包括机器人本身的运行误差, 还包括机器人机构间隙造成的重复性误差. 这些误差都会影响手机摄像头的装配精度. 在这些误差中, 环境和测量等外界因素造成的误差可以通过改善工作环境和测量设备来进行改善, 机器人本身的运行误差可通过标定进行补偿, 而对于由机构件间隙造成的重复性误差, 就需要对机器人机构件间隙误差的来源与控制进行研究.

4.1 机构件误差

在机器人中, 为了将电机的转动转化为移动, 选用了 MISUMI LX2001P 型精密直线滚珠导轨模组, 该模组的背隙为 $\Delta B = 0.003 \text{ mm}$; 万向节采用耐磨材料实配法制造, 经测量在 30 N 压力和拉力的作用下 12 个万向节间隙误差范围为 $\Delta U = 0.002 \text{ 65} \sim 0.003 \text{ 45} \text{ mm}$.

在机器人的单个伸缩杆中, 由于其万向节、直线滚珠导轨是串联连接, 故其间隙误差之和为

$$\delta = \Delta B + 2\Delta U = 8.3 \sim 9.9 \text{ }\mu\text{m}.$$

也就是说, 在 $8.3 \sim 9.9 \text{ }\mu\text{m}$ 这个误差范围内, 机器人伸缩杆无法给出更精确的位移信息.

4.2 机器人构型对机构误差的影响

并联机器人机构间隙误差的存在, 使得其刚度下降, 影响其重复定位精度及运行精准度.

图 7 所示为 6-SPS 机构简图, 为了便于分析, 假设伸缩杆与固定平台没有间隙误差, 所有误差都集中到了伸缩杆的上端. 一方面各个伸缩杆都有间隙误差, 另一方面各个伸缩杆的上端都与上平台形成闭环链接, 多个闭环的存在使得上平台误差趋于最小值. 在图 7 中, 机器人上平台与六个伸缩杆以误差存在的形式连接, 由于误差的不均等, 机器人上平台的上偏差由杆 2、4、6 确定, 而上平台的下偏差由杆 3、4、6 确定. 从图中可以看出, 在多个闭环的相互制约下, 上平台的间隙误差取伸缩杆长误差的最小值.

平台活动间隙误差的大小还与伸缩杆与平台面的夹角有关, 假设在机器人原点位置伸缩杆与平台面的夹角为 ϕ , 则此时沿伸缩杆轴线方向的杆长误差在竖直方向的分量为

$$\delta_i |\sin \phi|, \quad (i = 1, 2, \dots, 6). \quad (15)$$

由式(15)可见, 伸缩杆与平台面的夹角 ϕ 越小, 在同样的误差情况下, 平台的活动间隙误差也

越小, 机器人越精密. 当然, 在机器人不同位姿, 伸缩杆与平台面的夹角 ϕ 也不相同, 所以平台活动间隙误差在机器人的整个运动空间也不尽相同.

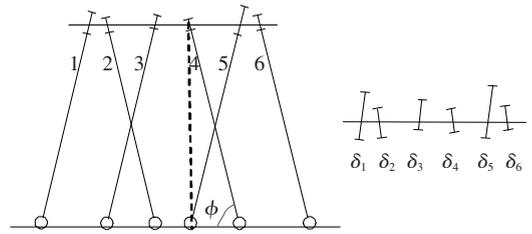


图 7 机器人的平台活动误差示意图

4.3 重复定位精度测量

重复定位精度反映的是机器人在多次往返运动中回到原来位置的能力, 是机器人间隙误差和刚度大小的直接反映. 机器人的机构间隙误差越大, 其刚度越差, 机器人的重复定位能力也就越差. 机器人的重复定位精度由统计计算得出, 其计算结果如表 1 所示.

表 1 机器人重复定位精度计算结果 mm

X 方向 X_{rep}	Y 方向 Y_{rep}	Z 方向 Z_{rep}	R_{rep}
0.003 8	0.002 2	0.000 6	0.004 8

小型并联机器人的重复定位精度同样是在三坐标测量机上进行的, 在测量中共测量 475 个点, 测量结果如图 8 所示.

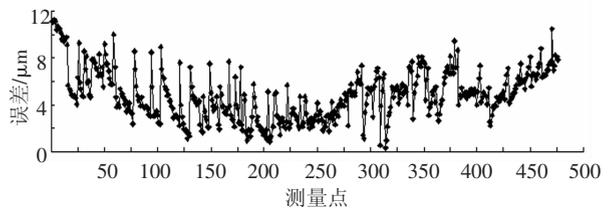


图 8 机器人重复定位精度测量结果

从表 1 及图 8 中可以看出, 机器人的重复定位精度为 $4.8 \text{ }\mu\text{m}$, 而机器人 6 根伸缩杆杆长误差范围为 $\delta = 8.3 \sim 9.9 \text{ }\mu\text{m}$, 由此说明并联结构具有收缩误差的功能. 另外, 机器人 Z 方向的重复定位精度相对于其它两个方向精度要高, 这主要是由于机器人的构型决定的.

5 结 论

1) 开发了一款用于精密装配的小型并联机器人, 并在桥式三坐标测量机上对其进行了标定试验. 经过标定, 机器人的最大位移误差由 $0.345 \text{ 9} \text{ mm}$ 降为 $0.012 \text{ 1} \text{ mm}$, 最大转角误差由 $0.007 \text{ 3} \text{ rad}$ 降为 $0.001 \text{ 1} \text{ rad}$.

2) 在标定算法中,利用机器人逆运动学计算并记录的伸缩杆的长度作为目标长度去计算机器人正运动学的方法,可以有效地解决6-SPS结构误差模型与正运动学模型衔接的问题。

3) 万向节间隙和滚珠导轨的背隙是机器人伸缩杆的主要机构误差来源。伸缩杆与下平台面的夹角越小,上平台的活动间隙误差也越小,机器人越精密。

4) 重复定位精度测量结果显示,该机器人的重复定位精度为0.004 8 mm,是一款高精度并联机器人。

参考文献

- [1] REN X D, FENG Z R, SU C P. A new calibration method for parallel kinematics machine tools using orientation constraint [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(9):708 - 721.
- [2] 单鹏, 谢里阳, 田万禄. 基于D-H矩阵的Stewart型并联机床位姿误差计算模型[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(17):186 - 191.
- [3] 赵新华, 李彬. 6-SPS 并联机器人机构误差综合[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(18):2223 - 2226.
- [4] 杨晓钧, 李兵, 张东来. 并联机床运动学自标定方法研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(9): 1825 - 1829.
- [5] MENG Y, ZHUANG H. Autonomous robot calibration using vision technology [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23(4): 436 - 446.
- [6] DANEY D, ANDREFF N, CHABERT G. Interval method for calibration of parallel robots: vision-based experiments [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2006, 41(8): 929 - 944.
- [7] MANSOUR A, HODJAT P, ARIA A, *et al.* Experimental kinematic calibration of parallel manipulators using a relative position error measurement system [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010, 26(6):799 - 804.
- [8] TING Y, JAR H C, LI C C. Measurement and calibration for stewart micromanipulation system [J]. *Precision Engineering*, 2007, 31(3):226 - 233.
- [9] GAO M, LI T M, TANG X Q. Estimates of identification result disturbances in parallel mechanism calibration[J]. *Tsinghua Science & Technology*, 2006, 11(1): 80 - 87.
- [10] HUANG P, WANG J S, WANG L P. Kinematical calibration of a hybrid machine tool with regularization method[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(3):210 - 220.
- [11] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:151 - 158.

(编辑 杨波)