

# 并联机器人的标定建模\*

彭斌彬

(北京航空航天大学机器人研究所 北京 100083)

高 峰

(上海交通大学振动、冲击和噪声国家重点实验室 上海 200030)

摘要：并联机器人标定时测量数据的参考系与其运动参考系不一致将导致系统误差的产生，通过改进标定建模方式将两个参考系统一，并用数值模拟—5 自由度并联机器人的标定过程，对比其结果发现改进模型可以完全消除测量的系统误差对并联机器人标定精度的影响，进一步提高并联机器人的标定精度。这种标定建模方式具有很高的实用价值。

关键词：并联机器人 标定 建模 系统误差

中图分类号：TP24

## 0 前言

由于机械加工误差，安装误差等因素的影响，并联机器人的理想结构参数(铰链位置、杆长等)与实际的结构参数相比存在偏差，使得并联机器人的运动学模型不准确，从而影响并联机器人的精度。解决这个问题有两种方法：一是直接提高机械加工精度及安装精度；另一种方法是采用运动学标定识别并联机器人的运动学模型。直接提高机械加工精度及安装精度能够提高并联机器人的结构参数的精度，但其代价将是极大地增加制造成本。采用运动学标定识别并联机器人的运动学模型的方法则只需要按普通精度要求进行机械加工，但安装完并联机器人后要通过运动学标定获得更接近实际的结构参数。与直接提高机械加工精度及安装精度的方法相比，通过标定提高并联机器人精度的方法成本低且可行性比较好。国内外众多学者对并联机器人的运动学标定进行了广泛和深入的研究<sup>[1~4]</sup>，但是对标定建模的研究不多。L.J.Everett 等<sup>[5]</sup>提出标定模型要满足完整性、比例性、等价性的要求。R.P. Judd 和 A.B. Knasinski<sup>[6]</sup>、B.W. Mooring 和 S.S. Padavala<sup>[7]</sup>研究了模型的复杂性对机器人精度的影响，他们的研究表明，只有在无法达到所需的精度要求时，才考虑非几何误差来源。J. Wang 和 Q. Masory<sup>[8]</sup>将铰链的运动误差考虑进去分析了并联机构的精度，得到铰链的运动误差对并联机构精度的影响比其他环

节的误差对并联机构精度的影响小。K.S. Chai 等<sup>[9]</sup>在进行运动标定时只考虑杆件的误差。这些标定建模方式都只考虑与并联机器人运动学有关的几何结构参数对标定结果的影响，实际上由于标定时需要用到测量仪器测量并联机器人的位姿参数，测量数据的参考系和并联机器人的运动参考系不一致，必然会引入测量误差，尤其是测量产生的系统误差。测量的系统误差一般比较大，这些误差将严重地污染所测量的数据，从而影响标定精度。

考虑到标定时测量的系统误差对标定结果的影响，将并联机器人的基准参考坐标系变换到测量仪器的基准坐标系中，改进并联机器人的标定建模方式，并模拟标定过程中测量产生的系统误差对标定结果的影响，另外也将系统误差加于没改进的标定模型中，通过对比标定后的结果，发现改进后的标定建模方式可以完全消除测量时产生的系统误差对标定结果的影响。这种标定建模方式对并联机器人精度的提高具有很高的实用价值。

## 1 并联机器人标定步骤

并联机器人的标定一般可以按以下四个步骤进行。

(1) 建立运动学标定模型。这一步要选择和确定合适的函数形式，建立满足标定要求的运动学模型。该模型必须包含一组足够数量的参数使其能够完全满足并联机器人运动描述的需要，而且标定模型应当包含最少数量的独立的误差参数以满足误差补偿的需要。另外，并联机器人几何结构上的微小变化也应当能够反映到模型参数的变化上来。

\* 国家杰出青年基金(50125516)、振动、冲击、噪声国家重点实验室(VSN-2005-07)及天津市自然科学基金重点(043801811)资助项目。20041129 收到初稿，20050425 收到修改稿

(2) 测量。不管采用哪种标定方法，都要对并联机器人的运动信息进行全部或部分测量。由于测量值是作为真值用于标定中，测量的准确性对并联机器人的标定的精度有很大的影响。为取得好的标定结果，选择一种有效的、合适的测量装置是非常关键的。

(3) 参数识别。并联机器人的参数识别是通过最小化理论值与实际值(测量值或外部传感器的读数)间的偏差来进行的，通常被看作是一种非线性最小二乘优化问题。

(4) 误差补偿。误差补偿是将识别出的模型参数代替标定前的模型参数。

## 2 并联机器人标定建模

对并联机器人而言，其运动模型误差主要来自以下几方面：连接运动平台和固定平台的杆的长度误差以及运动平台和固定平台上的铰链中心的位置误差；另外还有铰链本身的运动误差，这主要是由于受加工精度和安装精度的限制，铰链的转动轴线不共面，其运动中心的不重合，从而导致其运动的不准确。由于铰链的运动误差对并联机构精度的影响比其他环节的误差对并联机构精度的影响小<sup>[8]</sup>，建模中只考虑杆的长度误差参数和铰链中心的位置误差参数。

为便于分析，以一 5 自由度并联机器人机构为例说明标定建模过程。

5 自由度并联机器人机构如图 1 所示，其能实现三维移动和二维转动。

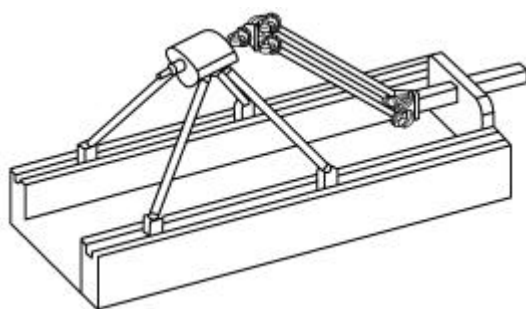


图 1 5 自由度并联机器人结构

这一并联机器人的运动学方程可以写成如下形式

$$L_i^2 = (x + x_i)^2 + (y + y_i - l_i)^2 + (z + z_i)^2 \quad (1)$$

$i = 1, 2, 3, 4, 5$

式中  $L_i$  ——定长杆的长度

$l_i$  ——输入变量

$x, y, z$  ——并联机器人的位置参数

$x_i, y_i, z_i$  ——并联机器人的铰链位置参数和姿态参数表达式

对式(1)两边求全微分，得到并联机器人的误差关系表达式

$$AdX = -[G \ F \ H \ N]dP \quad (2)$$

式中  $dP = [dP_1 \ dP_2 \ dP_3 \ dP_4]^T$

式(2)中  $dX$  为名义输出与实际输出的误差矩阵， $dP_1$ 、 $dP_2$ 、 $dP_3$  和  $dP_4$  为并联机器人的结构参数的名义值与实际值的误差矩阵， $A$ 、 $G$ 、 $F$ 、 $H$  和  $N$  为系数矩阵，系数矩阵是并联机器人位姿的函数。这种建模方式只考虑并联机器人几何参数误差对输出的影响，这也是通常采用的建模方式。为了将并联机器人的基准坐标变换到测量仪器坐标系中，并联机器人固定平台的铰链点的位置参数已经考虑了位置误差，还差固定平台的姿态误差没有考虑进模型中，将固定平台的姿态参数加入到并联机器人的运动学方程中，采用前面类似的方法，可以得到并联机器人新的误差关系表达式

$$-A_1dX = [G_1 \ F_1 \ H_1 \ N_1 \ S]dPP \quad (3)$$

式中  $dPP = [dP_1 \ dP_2 \ dP_3 \ dP_4 \ dP_5]^T$

式(3)中  $dP_5$  为并联机器人的固定平台姿态参数的名义值与实际值的误差矩阵， $A_1$ 、 $G_1$ 、 $F_1$ 、 $H_1$ 、 $N_1$  和  $S$  为系数矩阵，系数矩阵也是并联机器人位姿的函数。这种建模方式是以测量坐标系为参考系的，克服了测量数据的基准与并联机器人的基准不统一。

## 3 模拟标定过程

根据图 2 所示过程先对没改进的建模方式的标定进行模拟。

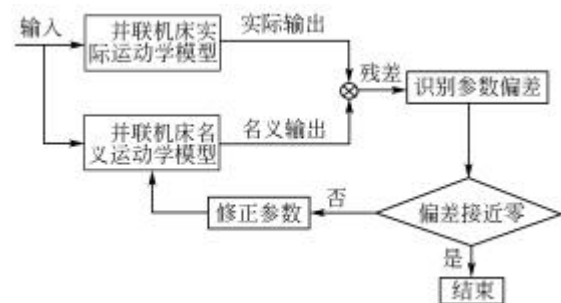


图 2 标定模拟过程

设并联机器人的运动平台上测量点的理论位姿值为  $X_{i,j}$ ，其中下角标  $i$  为  $X$  的第  $i$  个分量， $j$  表示在第  $j$  个位姿，其值可由正解表达式求得。若并联机器人的运动平台上在第  $j$  个位姿的测量值为

$X_{M(i,j)}$  , 则测量值与理论值的偏差  $E_{i,j}$  为

$$E_{i,j} = X_{M(i,j)} - X_{i,j}; dX_{i,j} \tag{4}$$

$$\text{令 } E_j = [dX_{1,j} \quad dX_{2,j} \quad dX_{3,j} \quad dX_{4,j} \quad dX_{5,j}]^T$$

$$J_{a,j} = -A^{-1} [G_j \quad F_j \quad H_j \quad N_j] ,$$

$$dP = [dP_1 \quad dP_2 \quad dP_3 \quad dP_4]^T$$

则由式(2)和式(4)得

$$E_j = J_{a,j}dP \tag{5}$$

式中  $E_j$  ——第  $j$  个位姿时的测量值与理论值的  
偏差矩阵

$J_{a,j}$  ——第  $j$  个位姿时的参数识别雅可比  
矩阵

$dP$  ——参数识别矩阵

选取一序列点模拟标定过程,用最小二乘法求得并联机器人的参数误差并代入原来的运动模型进行修正,通过多次迭代就可以得到所要的结果。

图 3 是有测量位置参数的系统误差时迭代次数与残差(对数)的关系曲线,图4 是有测量姿态参数的系统误差时迭代次数与残差(对数)的关系曲线。从这两个图可以看出只考虑并联机器人的几何结构参数误差的标定建模方式对测量位置参数时产生的系

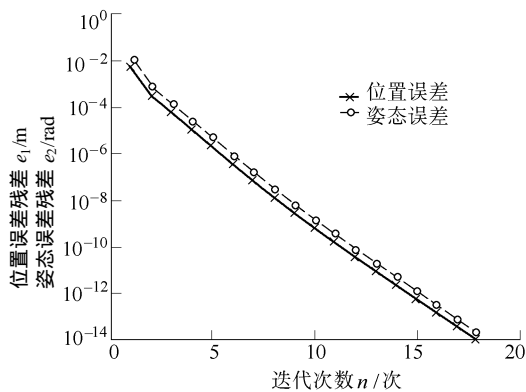


图 3 迭代次数与残差(对数)的关系  
(未改进模型时位置参数的测量值不含有系统误差)

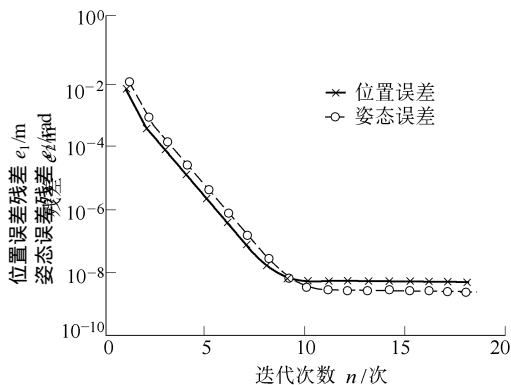


图 4 迭代次数与残差(对数)的关系  
(未改进模型时姿态参数的测量值含有系统误差)

统误差可以纠正过来,而对测量姿态参数时产生的系统误差就没有这样好的效果。

采用类似的方法用改进的模型对标定过程进行模拟。图 5 是有测量位置参数的系统误差时迭代次数与残差(对数)的关系曲线;图 6 是有测量姿态参数的系统误差时迭代次数与残差(对数)的关系曲线。从两个图可以看出改进后的模型对测量的位置和姿态参数的系统误差都可以修正过来,克服了原来建模方面的一些不足。

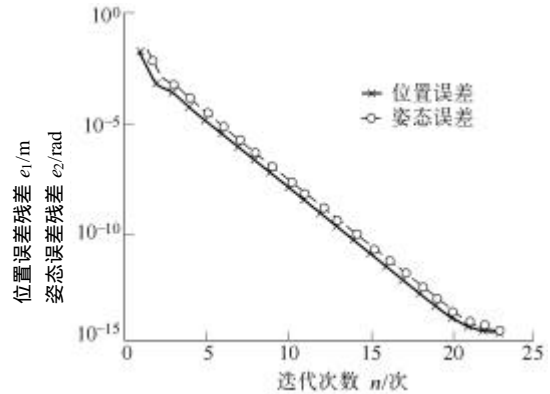


图 5 迭代次数与残差(对数)的关系  
(改进模型时位置参数的测量值不含有系统误差)

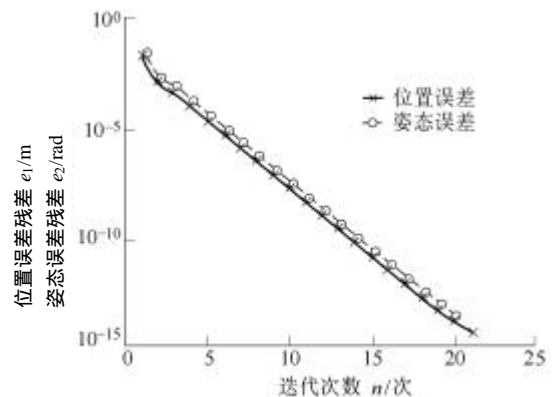


图 6 迭代次数与残差(对数)的关系  
(改进模型时姿态参数的测量值不含有系统误差)

### 4 结 论

分析并联机器人标定时测量数据中系统误差产生的原因,改进标定建模方式。对改进前的建模方式和改进后的建模方式都用数值模拟 5 自由度并联机器人的标定过程,结果表明改进后的建模方式可以消除测量位置和姿态参数时产生的系统误差对并联机器人标定精度的影响,而改进前的建模方式或者说只考虑并联机器人几何结构参数误差的建模方式对测量并联机器人姿态参数时产生的系统误差不能消除。这种标定建模方式对并联机器人精度的提高具有很高的实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Nahvi A, Hollerbach J M, Hayward V. Calibration of a parallel robot using multiple kinematic closed loop. In : Proceedings of IEEE Inter. Conf. on Robotics & Automation, 1996 : 407 ~ 412
- 2 Wampler C M, Hollerbach J M, Arai T. An implicit loop method for kinematic calibration and its application to closed-chain mechanism. IEEE Trans. on Robotics & Automation, 1995, 11(5) : 710 ~ 724
- 3 Zhuang H, Liu L. Self calibration of a class of parallel manipulators. In : Proceedings of IEEE Inter. Conf. on Robotics & Automation, Minneapolis, Minnesota, 1996 : 994~999
- 4 Zhuang H. Self calibration of parallel mechanisms with a case of study on Stewart platforms. IEEE Trans. on Robotics & Automation, 1997 : 387 ~ 397
- 5 Everett L J, Driels M, Mooring W. Kinematic modeling for robot calibration. In : Proceedings of IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, 1987 : 183 ~ 189
- 6 Judd R P, Knasinski A B. Technique to calibrate industrial robots with experimental verification. IEEE Trans. on Robotics & Automation, 1990, 6 : 20 ~ 30
- 7 Mooring B W, Padavala S S. Effect of kinematic model complexity on manipulator accuracy. In : Proceedings of IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, 1989 : 593 ~ 598
- 8 Wang J, Masory Q. On the accuracy of a Stewart platform-part X kinematic calibration and compensation. In : Proceedings of IEEE Inter. Conf. on Robotics & Automation, Atlanta, Georgia, 1993 : 725 ~ 731
- 9 Chai K S, Young K, Tuersley I. A practical calibration process using partial information for a commercial Stewart platform. *Robotics*, 2002, 20 : 315 ~ 322

MODELING FOR CALIBRATION  
OF PARALLEL ROBOT*Peng Binbin**(Institute of Robotics, Beihang University ,  
Beijing 100083)**Gao Feng**(State Key Laboratory of Vibration,  
Shock & Noise, Shanghai Jiaotong University,  
Shanghai 200030)*

**Abstract :** At the step of measurement for calibration of parallel robot, the system error will be created for the inconsistent reference frame between the spatial coordinate measuring device and the parallel robot. To eliminate the system error, the reference frame of the parallel robot is transformed to the one of the spatial coordinate measuring device at the step of modeling for calibration of parallel robot and a consistent reference frame is obtained. After simulating the process of calibration with the unimproved model and the improved model respectively to a 5-DOF parallel robot, the results indicate that the improved model can eliminate the system error completely while the unimproved model can not. So the improved model is better at improving the accuracy of calibration. The method of modeling for calibration of parallel robot has a highly use value.

**Key words :** Parallel robot Calibration Modeling

System error

作者简介：彭斌彬，男，1975 年出生，博士研究生。主要从事并联机器人技术及应用方面的研究。

E-mail : pbb2001cn@yahoo.com.cn