

2RPU/UPR+RP五自由度混联机器人参数标定研究

许允斗, 王超, 赵春霖, 杨帆, 姚建涛, 赵永生

引用本文:

许允斗, 王超, 赵春霖, 等. 2RPU/UPR+RP五自由度混联机器人参数标定研究[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(1): 119–129.

XU Yun-dou, WANG Chao, ZHAO Chun-lin, et al. Parameter calibration of five-degree-of-freedom hybrid robot 2RPU/UPR+RP[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 119–129.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202801.0119>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

运动副间隙引起的并联机器人误差及其补偿

Error and compensation of parallel robot with joint clearances

光学精密工程. 2015, 23(5): 1331–1339 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152305.1331>

可变胞并联机械臂样机的研制与误差分析

Development and error analysis of metamorphic parallel manipulators

光学精密工程. 2018, 26(7): 1698–1707 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182607.1698>

(2PRR)2+R平面并联机构的刚度与固有频率

Stiffness and natural frequency of a (2PRR)2+R planar parallel mechanism

光学精密工程. 2017, 25(11): 2904–2913 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172511.2904>

激光测量标定机器人坐标系位姿变换的正交化解算

Laser measurement based evaluation for orthogonal transformation calibration of robot pose

光学精密工程. 2018, 26(8): 1985–1993 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182608.1985>

新型四足步行机器人串并混联腿的运动学分析

Kinematics analysis on the serial-parallel leg of a novel quadruped walking robot

光学精密工程. 2015, 23(11): 3147–3160 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152311.3147>

文章编号 1004-924X(2020)01-0119-11

2RPU/UPR+RP 五自由度混联机器人 参数标定研究

许允斗^{1,2}, 王超¹, 赵春霖¹, 杨帆¹, 姚建涛^{1,2}, 赵永生^{1,2*}

1. 燕山大学 河北省并联机器人与机电系统实验室, 河北 秦皇岛 066004;
2. 燕山大学 先进锻压成型技术与科学教育部重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为了提高 2RPU/UPR+RP 过约束混联机器人在实际运用中的精度, 达到生产实践的需求, 对该机器人进行误差补偿研究。首先介绍了过约束混联机器人的运动原理, 随后分析影响混联机器人末端精度的各项几何误差的来源, 并对提高混联机器人精度的零点标定与全标定方法进行介绍。将混联机器人分为并联机构和单摆头两部分, 分别对两部分进行零点标定和全标定理论研究, 然后基于激光跟踪仪搭建了标定实验系统, 得到了标定后的误差参数的真实值, 补偿到运动学算法中。实验结果表明, 本文提出的全标定和零点标定方法可以有效提高混联机器人的定位精度。

关键词: 混联机器人; 误差补偿; 全标定; 零点标定

中图分类号: TP212 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20202801.0119

Parameter calibration of five-degree-of-freedom hybrid robot 2RPU/UPR+RP

XU Yun-dou^{1,2}, WANG Chao¹, ZHAO Chun-lin¹, YANG Fan¹,
YAO Jian-tao^{1,2}, ZHAO Yong-sheng^{1,2*}

1. *Laboratory of Parallel Robot and Mechatronic System of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;*
2. *Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science of Ministry of National Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)*

* *Corresponding author, E-mail: yszhao@ysu.edu.cn*

Abstract: In order to improve the accuracy of the 2RPU/UPR+RP over-constrained hybrid robot in practical application and meet the requirements of production practice, the error compensation research of the robot was carried out. Firstly, the motion principle of the over-constrained hybrid robot was introduced. Then, the geometric error sources that affect the end precision of the hybrid robot were analyzed, and the zero calibration and full calibration method for improving the accuracy of the hybrid robot were introduced. The hybrid robot was divided into the parallel mechanism and the swing head with single-degree-of-freedom. Theoretical research on zero calibration and full calibration were

收稿日期: 2019-05-21; 修订日期: 2019-06-04.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2017YFB1301901); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51875495, No. 51405425)

conducted on these two parts respectively. Then the calibration experiment system was built up based on the laser tracker, and true values of error parameters were obtained by using algorithm after calibration, which were compensated to the kinematics algorithm. The result, indicates that the proposed full calibration and zero calibration method can effectively improve the positioning accuracy of the hybrid robot.

Key words: hybrid robot; error compensation; full calibration; zero calibration

1 引言

相较于并联机构的工作空间小、调姿能力差等特点,混联机器人^[1-2]综合了串联机器人与并联机器人的特点,具有工作空间大、调姿能力强、刚度高等优点。

目前世界上已得到成功应用的几款混联机器人均来自于国外,包括瑞典的 Neos Robotics 公司开发的 Tricept^[3] 五自由度混联机器人,德国 DS-Technologie 公司研制的 Ecospeed-Sprint Z3 加工中心^[4],以及瑞典 Exechon 公司研制的 Exechon 混联加工中心^[5-6],它们已成功应用于航空结构件的铣削和冲压模具制作等方面。

国内学者同样进行了五自由度混联机器人的研究,包括天津大学研制的 TriVariant 混联机器人以及最新提出的 Trimule 混联机器人^[7],清华大学与齐齐哈尔第二机床厂于 2003 年联合研制的大型龙门式五轴联动混联机器人 XNZD2415,清华大学与江东机床联合研发制造的 XNZ2010 型混联机器人,浙江理工大学研制的 2UPR/RPU+RR 结构混联机器人^[8]等,但我国研发的混联机器人仍停留在实验研究阶段。本课题组基于 2RPU/UPR 并联机构提出了一种完全具有连续转轴的过约束五自由度混联机器人^[9-10]。

目前,关于并联机器人、串联机器人标定算法的研究较多,例如 Neagoe^[11]提出了一种通用标定算法来进行对串联机械臂的标定。Gattringer^[12]提出了一种低成本的工业机器人几何标定策略,并使用激光干涉仪和工业摄像机进行标定。Khalil^[13]通过经纬仪辨识出串联机器人的几何参数。Nubiola^[14]提出了 6D 测量系统用来测量工业 6 轴机器人,提高了机器人的绝对精度,戴智

武^[15]提出一种采用粒子群算法对 Delta 并联机器人的误差参数进行辨识的方法,省去了测量坐标系与机器人坐标系的转换。潘伯钊^[16]提出了通过激光跟踪仪研究混联机器人标定。本文以本课题组提出的 2RPU/UPR+RP 五自由度混联机器人为对象,结合机器人自身的结构特征,建立其标定原理与算法,采用激光跟踪仪搭建标定实验平台进行标定实验研究。

2 运动原理与误差分析

2.1 运动原理

本文所研究的混联机器人是在两转一移并联机构 2RPU/UPR 基础上构造的^[17-18],在并联机构动平台上串接一单自由度摇摇头,并在其下方单独安装一单自由度移动平台,如图 1 所示。

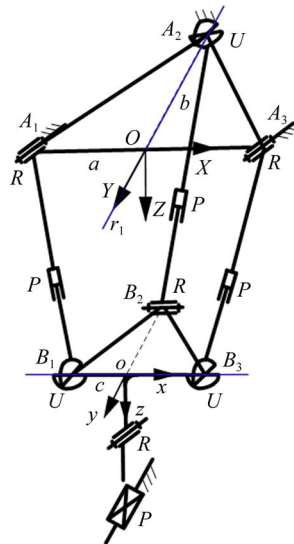


图 1 混联机器人的机构简图

Fig. 1 Schematic diagram of the hybrid robot

文献[9]和文献[19]已经对该混联机器人机构的位置正反解进行了详细分析,但是由于实际

加工与装配的需求,样机的安装尺寸与原来的理论模型存在微小的差别。这里主要考虑该差别后,对位置反解模型进行解释。

由于该混联机器人机构所有转轴均是连续的,所以可以等效为如图 2 所示的五自由度串

联机器人机构。这里与原来理论模型的差别在于:摇摆头轴线(z_0 轴)与,转动副 R_2 轴线和 R_3 轴线的公垂线之间存在偏距 l_3 (理论上为 0),考虑该偏距后,等效串联机构的反解解析模型如下:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan[(-l_2 a_x - l_3 o_x + p_x)/(-l_2 a_z - l_3 o_z + p_z)] \\ \theta_3 = \arcsin(a_x \cos \theta_1 - a_z \sin \theta_1) \\ \theta_2 = \arcsin(-a_y/\cos \theta_3) \\ d_1 = (-l_2 a_z + p_z - l_3 o_z - l_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2)/\cos \theta_1 - d_0 \\ d_2 = p_y - l_2 a_y - l_1 a_y/\cos \theta_3 - l_3 \cos \theta_2 \end{cases}, \quad (1)$$

其中: $T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 表示机器人末端的

位姿矩阵, l_1 表示 R_2 与 R_3 副轴线的距离, l_2 表示机器人末端点相对于 R_3 副轴线的距离。

再将 θ_1, d_1 和 θ_2 值带入并联机构的反解计算公式可得三个直线驱动支链的输入分别为 $q_i = |\mathbf{B}_i - \mathbf{A}_i| - q_{i0}, (i=1, 2, 3)$ 。

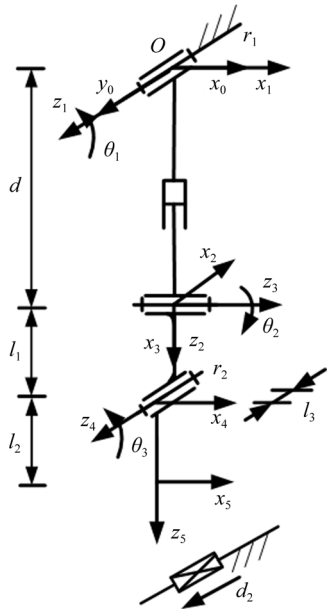


图 2 混联机器人等效的 RPRR+P 串联机器人模型
Fig.2 Equivalent RPRR+P serial robot model of hybrid robot

2.2 误差分析

机器人误差的主要来源为几何误差,即在机

器人的制造与装配过程中,由于误操作或者加工装配的精度低,致使机器人的关节轴线的位置和各关节轴线之间的相对位姿关系产生误差。一般办法是通过提高加工与装配的精度来尽量避免这样的几何误差,但是由于数控加工机床本身加工精度以及不可避免地人工操作误差,这种方法显然不能完全避免这样地误差。所以,需要通过参数补偿地方法来提高混联机器人的精度,即首先找出关键的几何误差参数,然后通过运动学标定方法辨识出参数实际值,并将其代入到理论模型中进行补偿。

并联机构部分的几何误差来包括连接动、定平台铰点中心的位置误差,具体为定平台上的铰点 A_i 的位置误差 $(\Delta x_{Ai} \ \Delta y_{Ai} \ \Delta z_{Ai})^T$,动平台上的铰点 B_i 的位置误差 $(\Delta x_{Bi} \ \Delta y_{Bi} \ \Delta z_{Bi})^T$,以及始状态下各分支的初始杆长误差,但是独立的误差项仅为 18 项,因为杆长误差与两点位置误差之间存在一个相关项。

由于下方独立的移动平台设计技术较为成熟,精度很高,因此这里不需要进行参数标定。所以串联部分只需考虑摇摆头部分,这部分误差包括连杆长度 l_1 、摆头长度 l_2 和轴线偏置 l_3 的误差 $\Delta l_1, \Delta l_2$ 和 Δl_3 ,以及单自由度摆头的初始角度误差 $\Delta \theta_{30}$ 。故串联分支共有 4 个独立的几何误差项。

综上所述,混联机器人的几何误差项共有 25 项,其中相互独立的几何误差项共有 22 项。其中杆长误差 Δq_i 与摆头误差 $\Delta \theta_{30}$ 由于装配过程中跟驱动器零位相关,容易产生较大误差。而其他几何误差仅与加工制造以及装配的精度相关,误差

相对较小。故对混联机器人进行误差补偿时,首先要考虑的就是杆长误差 Δq_i 与摇头误差 $\Delta \theta_{30}$ 的标定辨识。对仅对初始杆长值 q_{i0} 和摇头初始摆角 θ_{30} 进行的标定我们称之为零点标定,这对机器人精度的提供至关重要。然后对剩下几何误差参数以及零点标定完的初始杆长值和摇头初始摆角的标定,此次标定也称为全标定。各误差参数的理论值如表 1 所示。

表 1 误差参数理论值

Tab. 1 Theoretical value of error parameters (mm)

参数	支链 1	支链 2	支链 3
x_{A_i}	-410	0	410
y_{A_i}	0	-506	0
z_{A_i}	0	0	0
x_{B_i}	-200	0	200
y_{B_i}	0	-246	0
z_{B_i}	0	0	0
q_{i0}	1 185, 744 1	1 195, 612 4	1 185, 744 1

3 标定原理与实验研究

3.1 标定原理分析

这里混联机器人的 2RPU/UPR 并联机构与单自由度摇头分别进行标定。

3.1.1 并联部分标定

(1) 零点标定原理与算法

根据并联机构部分反解可得:

$$q_i = | \mathbf{R}^G \mathbf{B}_i + \mathbf{P} - {}^G \mathbf{A}_i |, (i = 1, 2, 3), \quad (2)$$

其中: \mathbf{R} 表示并联机构动平台坐标系 $\{g\}$ 相对于参考坐标系 $\{G\}$ 的旋转变换矩阵, \mathbf{P} 表示平移向量。

当并联机构的姿态发生改变时, 3 条支链的长度均会发生改变。每改变一次姿态, 通过伺服系统可以读取电机的转动的圈数, 根据传动比可以计算出支链运动的变化量。那么各分支的杆长为:

$$q_i = q_{i0} + \Delta q_{ij}, \quad (3)$$

其中: q_{i0} 表示带有误差的 3 条支链初始杆长, Δq_{ij} 表示在变换第 j 个位姿时, 第 i 个支链杆长的改变量。

由式(2)和式(3)可得:

$$q_{i0} + \Delta q_{ij} = | \mathbf{R}_j^G \mathbf{B}_i + \mathbf{P}_j - {}^G \mathbf{B}_i |, (i = 1, 2, 3), \quad (4)$$

其中: \mathbf{R}_j 为第 j 次改变位姿时的姿态矩阵, \mathbf{P}_j 为第 j 次改变位姿时的平移向量, 可以通过外部高精度测量元件测量。

在研究零点位置误差时, 只考虑初始杆长误差共有 3 个未知数, 那么只需要改变 1 次位姿就可以根据式(4)构造出 3 个相互独立的方程, 我们不妨设:

$$\begin{aligned} f_{ij} &= f_{ij}(q_{i0}) = \\ &(|q_{i0} + \Delta q_{ij} - | \mathbf{R}_j^G \mathbf{B}_i + \mathbf{P}_j - {}^G \mathbf{B}_i ||)^2 = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 f_{ij} 表示动平台处于第 j 个位姿第 i 个支链所构造的函数。理论上只需要动平台变换 1 次姿态即可求出 3 条支链初始杆长, 但是由于测量过程中的可能误操作, 测量一次显然不能满足精度的要求, 所以需要进行多次测量, 综合 n 次的测量结果才能使最终得到的结果更加逼近实际杆长。构造的方程组为:

$$\begin{cases} f_{i1} = f_{i1}(q_{i0}) = 0 \\ f_{i2} = f_{i2}(q_{i0}) = 0 \\ \dots \\ f_{in} = f_{in}(q_{i0}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

因此求解零点位置误差的问题转化成了求解参数 q_{i0} 使得目标函数 F 的值最小的区域寻优问题。其中:

$$F = \sum_{j=1}^n k_i f_{ij}, \quad (7)$$

式中 k_i 为式(7)中各方程所占的比重, 由于各分支相互独立, 且各方程的对目标函数的影响相同, 所以将 k_i 的值设为 1。

综上所述, 2RPU/UPR 并联机构零点位置误差标定问题可以转化为函数最优值问题。

(2) 全标定原理与算法

同样由式(4)可知, 每变换一次位姿, 可构造 3 个方程, 而全标定共有 18 个独立参数需要辨识, 因为初始杆长可由支链与动定平台连接两点的距离求得, 所以至少需要变换 6 次位姿, 但是为了提高识别精度, 这里还是变换 n 次位姿 ($n > 6$), 构造的方程组如下所示。

$$\begin{cases} f'_{i1} = f'_{i1}(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}, x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi}, q_{i0}) = 0 \\ f'_{i2} = f'_{i2}(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}, x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi}, q_{i0}) = 0 \\ \dots \\ f'_{in} = f'_{in}(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}, x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi}, q_{i0}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

全误差标定时 18 个独立误差参数的辨识同样也可以转化成式(7)目标函数的优化问题。

3.1.2 摇头部分标定

(1) 零点标定原理

由于单自由度摇头摆角可以通过测量摆头平面相对于动平台平面的夹角直接得到,其中动平台平面 A 和摆头侧面 B 均为光滑加工面,如图 3 所示,所以这里只需要通过测量平面 A 和平面 B 的夹角,就可以对摆头初始摆角直接进行补偿。

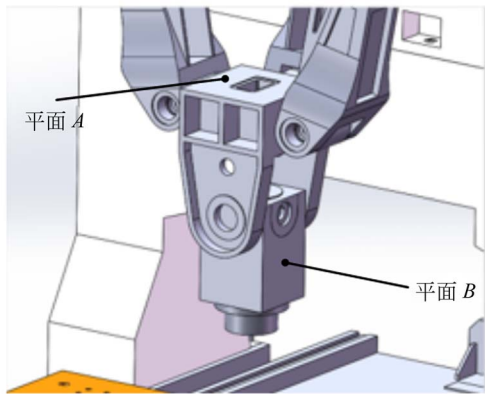


图 3 待测量平面 A 和平面 B

Fig. 3 Planes A and B to be measured

(2) 全标定原理与算法

因为连杆长度和轴线偏置都是针对的关节轴线之间的相对位置关系,所以这里的标定算法还是通过测量的方法将关节轴线直接测量出来,分别为等效串联机构中 z_3 轴、 z_4 轴和 z_5 轴,然后求解轴线之间的公垂线长度即为这些参数的实际值。这里通过激光跟踪仪采集多组连杆运动轨迹,进而拟合出机器人关节轴线。

3.2 标定系统搭建与标定实验研究

3.2.1 基于激光跟踪仪的位姿测量原理

由激光跟踪仪搭建的标定实验平台如图 4 所示。

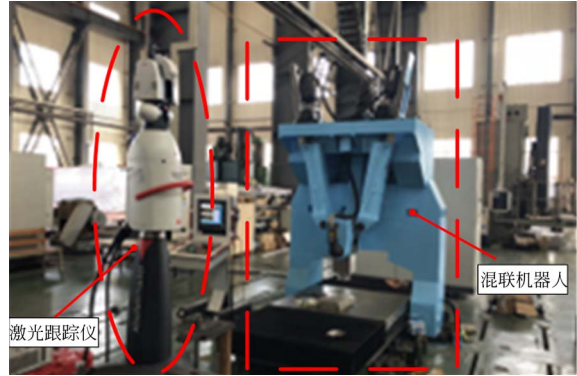


图 4 基于激光跟踪仪标定实验平台

Fig. 4 Calibration experimental platform on laser tracker

图 5 所示为基于激光跟踪仪的位姿测量原理。激光跟踪仪作为外部测量元件,其可以精确的测量出跟踪仪(绝对)坐标系下目标点的三维信息,并可以通过特征点建立起坐标系。

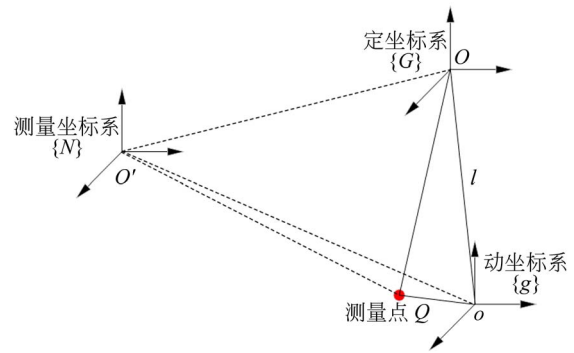


图 5 激光跟踪仪的位姿测量原理

Fig. 5 Pose measurement principle of laser tracker

通过外部测量传感器建立测量坐标系 $\{N\}$, 定坐标系 $\{G\}$ 以及动坐标系 $\{g\}$ 。当动平台开始运动时,动坐标系的位置与姿态的测量就变得十分困难,故引入一个辅助点来进行间接测量,设 Q 点为动平台上一个已知测量点。通过驱动数控系统改变并联机器人的杆长,从而改变动平台相对于定平台的位姿。

其中 l 表示定坐标系 $\{G\}$ 原点 O 到动坐标系 $\{g\}$ 原点 o 的矢量, 于是, 根据图 5 可以得到:

$$l = {}^G OQ - {}^G oQ, \quad (9)$$

根据刚体位姿的描述, 可以得到:

$${}^G OQ = {}^G Q - {}^G O = {}^G_N R {}^N Q - {}^G_N R {}^N O, \quad (10)$$

$${}^G oQ = {}^G Q - {}^G o = {}^G_g R {}^g Q - {}^G_g R {}^g o, \quad (11)$$

式中: ${}^G_N R$ 为定坐标系 $\{G\}$ 与测量坐标系 $\{N\}$ 间的转换矩阵, ${}^G_g R$ 为定坐标系 $\{G\}$ 与动坐标系 $\{g\}$ 间的转换矩阵, ${}^N O$ 为 O 点在测量坐标系 $\{N\}$ 下的坐

$$\begin{pmatrix} d \sin \theta_1 \\ 0 \\ d \cos \theta_1 \end{pmatrix} = {}^G_N R \begin{pmatrix} {}^N Q_x - {}^N O_x \\ {}^N Q_y - {}^N O_y \\ {}^N Q_z - {}^N O_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ 0 & \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^g Q_x \\ {}^g Q_y \\ {}^g Q_z \end{pmatrix}, \quad (14)$$

式中 ${}^N O$, ${}^N Q$, ${}^G_g R$ 和 ${}^g Q$ 可以通过激光跟踪仪测出, 将其代入式(14)可以求出 θ_1 , θ_2 和 d , 进而可以得到 2RPU/UPR 并联机构动坐标系与定坐标系间的位姿变换矩阵 R 和 P 。

3.2.2 动、定坐标系测量

由上述原理可知, 需要测量出混联机器人机构动、定坐标系的原点位置和各坐标轴矢量, 根据激光跟踪仪拟合的关节轴线和定平台及动平台法线, 在激光跟踪仪软件 SA-job 中建立坐标系。

(1) 动平台动坐标系的建立。通过拟合动平台上的 U 副近动平台端的轴线, 将其作为动坐标系的 X 轴; 再拟合出单自由度摇摆头的轴线, 将

标, 其可表示为 ${}^N O = ({}^N O_x \quad {}^N O_y \quad {}^N O_z)^T$ 。

将式(10)和式(11)代入式(9)中整理得:

$$l = {}^G_N R {}^N ({}^N Q - {}^N O) - {}^G_g R {}^g Q. \quad (12)$$

根据前面分析可以得知混联机器人并联部分具有三个自由度, 并且动平台在运动的过程中没有 Y 轴方向的耦合位移量, 则 l 可表示为:

$$l = (d \sin \theta_1 \quad 0 \quad d \cos \theta_1)^T. \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)中整理得:

其作为动坐标系的 Y 轴的矢量方向; 接下来沿着两条直线的公垂线平移单自由度摇摆头的轴线, 相交的点作为动坐标系原点, Z 轴通过“右手定则”判断。

(2) 混联机器人定坐标系的建立。由于定平台铰链无法直接测量, 故先通过拟合定平台上两个 R 副轴线, 再做出两 R 副轴线的中心线, 将其作为定坐标系的 Y 轴; 再拟合出工作台平面的垂直向量, 将其作为定坐标系的 Z 轴, X 轴通过“右手定则”判断。

经过上述建系过程, 得到测量坐标系与定坐标系间的转换矩阵 ${}^G_N T$ 和测量坐标系与动坐标系间的转换矩阵 ${}^g_N T$ 如下:

$${}^G_N T = \begin{pmatrix} -0.986\ 556 & 0.162\ 859 & -0.013\ 579 & -429.366\ 613 \\ 0.162\ 832 & 0.986\ 649 & 0.002\ 786 & -2981.490\ 164 \\ 0.013\ 851 & 0.000\ 537 & -0.999\ 903 & 428.058\ 102 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$${}^g_N T = \begin{pmatrix} -0.986\ 337 & 0.164\ 012 & -0.012\ 655 & -442.012\ 575 \\ 0.163\ 981 & 0.986\ 457 & 0.003\ 433 & -2978.767\ 212 \\ 0.013\ 047 & 0.001\ 310 & -0.999\ 914 & -738.127\ 312 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

由于定坐标系 Y 轴是根据左右两 R 副拟合得到, 故 A_1 和 A_3 铰点的实际位置应关于原点对称, 即:

$$\begin{cases} x_{A1} = -x_{A3} \\ z_{A1} = -z_{A3} \end{cases}. \quad (17)$$

综上, 混联机器人标定实验的定坐标系与动坐标系建立完毕。

3.2.3 并联机构部分标定

(1) 零点标定

规划混联机器人三根驱动杆以 0.3 mm 的增量运行, 共运行 30 次, 按照图 6 示意摆放靶球至动平台上表面。测量得到靶球在动坐标系下的坐标为:

$${}^sQ =$$

$$(-317.422\ 201\ -2\ 877.571\ 022\ -639.540\ 642)^T$$

通过数控系统改变混联机器人的驱动杆长的同时,记录出靶球的在激光跟踪仪坐标系下的坐标如表 2 所示。

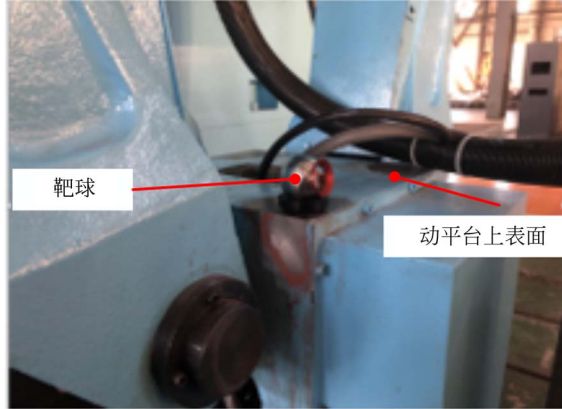


图 6 靶球摆放示意图

Fig. 6 Schematic the target ball placement

表 2 杆长变化时靶球的坐标

Tab. 2 Coordinates of target ball with varying rod length

测量点	靶球坐标
1	(-317.425 7, -2 877.553 5, -639.850 9)
2	(-317.409 1, -2 877.533 4, -640.164 3)
3	(-317.393 0, -2 877.512 6, -640.469 8)
...	
28	(-317.494 7, -2 877.490 9, -648.048 3)
29	(-317.480 5, -2 877.493 9, -648.342 0)
30	(-317.473 8, -2 877.498 4, -648.649 6)

将上述数据代入式(14),可以得到每次杆长改变时的 θ_1, θ_2 和 d 值如表 3 所示。

表 3 解算得到的 θ_1, θ_2 和 d 值

Tab. 3 Solved values of θ_1, θ_2 and d

测量点	解算姿态 $\theta_1/(^\circ)$	解算姿态 $\theta_2/(^\circ)$	解算位移 d/mm
1	0.616 903	-0.136 005	1 166.933 223
2	0.616 019	-0.123 079	1 167.221 018
3	0.615 175	-0.109 863	1 167.500 153
...
28	0.616 372	-0.107 071	1 175.071 253
29	0.615 431	-0.107 446	1 175.367 333
30	0.614 865	-0.109 329	1 175.679 794

然后采用求解的最优解,可得零点位置误差辨识的结果,如下表所示。

表 4 零点位置误差辨识结果

Tab. 4 Zero position error identification result

参数	理论值	辨识值
q_{10}	1 185.744 1	1 186.275 0
q_{20}	1 195.612 4	1 194.507 4
q_{30}	1 185.744 1	1 183.765 5

(2)全标定

同样地,对式(8)求各参数的最优解,全误差辨识结果如表 5 所示。

3.2.4 摇摆头部分标定

对单自由度摇摆头进行零点位置误差标定时,首先通过数据点拟合出动平台上平面和单自由度摇摆头的侧平面,然后求得两平面的法向量。表 6 为测量得到的两平面上的点坐标。

表 5 全误差辨识结果

Tab. 5 Full error identification results

(mm)

参数	第一支链		第二支链		第三支链	
	理论值	辨识值	理论值	辨识值	理论值	辨识值
x_{A_i}	-410	-410.056 9	0	0.323 2	410	410.056 9
y_{A_i}	0	0	-506	-505.955 6	0	0
z_{A_i}	0	-0.284 2	0	-0.101 3	0	0.284 2
x_{B_i}	-200	-200.636 0	0	0.323 2	200	200.161 2
y_{B_i}	0	0	-246	-246.137 1	0	0
z_{B_i}	0	0	0	-0.041 5	0	0
q_{i0}	1 185.744 1	1185.903 6	1 195.612 4	1 194.403 1	1 185.744 1	1 184.035 2

表 6 测量得到的两平面上的点坐标

Tab. 6 Point coordinates on two planes measured

测量点	动平台平面 A 上的点	摇摆头侧平面 B 上的点
1	(4 495.411, 293.186, 1 666.508)	(3 694.049, 298.048, -452.528)
2	(4 460.945, 292.945, 1 541.348)	(3 694.282, 330.175, -509.141)
...
99	(4 477.187, 292.235, 1 212.478)	(3 692.761, 402.532, -488.159)
100	(4 419.328, 291.323, 1 268.646)	(3 691.391, 464.237, -462.161)

由表 6 拟合出动平台上平面的法向量为 $(0.014\ 4, -0.999\ 8, 0.002\ 1)$, 单自由度摇摆头的侧平面的法向量为 $(-0.873\ 8, -0.036\ 7, -0.013\ 6)$, 计算出两向量夹角为 $88.620\ 11^\circ$, 故通过数控系统补偿的单自由度摇摆头零点位置误差为 $\Delta\theta_{30} = 1.379\ 89^\circ$ 。

在进行单自由度摇摆头全误差标定时, 需要通过激光跟踪仪拟合出混联机器人的 z_3 轴线、摇摆头转动轴线 (z_4 轴) 以及刀具轴线 (z_5 轴), 在建立动坐标系时已经拟合出 z_3 轴线和 z_4 轴线, 故还需要拟合出刀具轴线, 将磁性表座吸到刀轴表面进行测量, 如图 7 为刀具轴线的测量过程。



图 7 刀具轴线的测量过程

Fig. 7 Tool axis measurement process

通过拟合得到的 3 条轴线的函数表达式如表 7 所示, 计算得到 z_3 轴线与 z_4 轴线公垂线长度 l_1 为 $255.431\ 1\ \text{mm}$, z_3 轴线与 z_4 轴线的公垂线, 与刀具轴线的偏距 l_3 为 $5.018\ 1\ \text{mm}$ 。通过测量单自由度摇摆头末端点, 得到其与 z_4 轴线间的距离

l_2 为 $358.061\ 7\ \text{mm}$ 。

表 7 拟合的三条轴线表达式

Tab. 7 Three axis expressions of the fit

待拟合轴线	函数表达式
z_3 轴线	$\frac{x+751.252\ 2}{0.986\ 339} = \frac{y+2\ 927.248\ 7}{-0.164\ 218} = \frac{z+724.298\ 2}{-0.012\ 948}$
z_4 轴线	$\frac{x+462.322\ 2}{0.163\ 881} = \frac{y+3\ 081.274\ 2}{0.986\ 478} = \frac{z+993.940\ 4}{0.001\ 440}$
刀具轴线	$\frac{x+449.987\ 6}{0.011\ 815} = \frac{y+2\ 981.840\ 1}{-0.003\ 087} = \frac{z+1\ 322.678\ 7}{0.999\ 926}$

4 精度测量

本文主要使用中国国标 GBT17421.2-2000 的计算测量方式来对五自由度混联机器人进行精度测量^[20]。

根据国标规定, 数控设备的精度检测需要在设备的工作空间内, 沿平行于坐标轴的某一轴线方向选取若干个定位点 (5~15 个), 对于每个点分正负两个方向重复多次定位测量 (3~5 次), 将测到的真实数据点代入国标公式中即可完成对数控设备的精度检验。

使用全世界最大的激光干涉仪生产厂家之一的安捷伦科技公司生产的 Agilent (安捷伦) 5529A 激光干涉仪作为精度测量元件, 分辨率为 $10\ \text{nm}$, 该激光干涉仪使用双频激光作为测量激光, 有效的减小了空气扰动对测量的影响。具体的精度测量方案如下:

步骤 (1): 搭建起激光干涉仪测量系统, 安装好温度传感器, 材料传感器后, 将反射镜放置到混联机器人远端, 干涉镜放置到待测量目标处, 如图 8 所示。

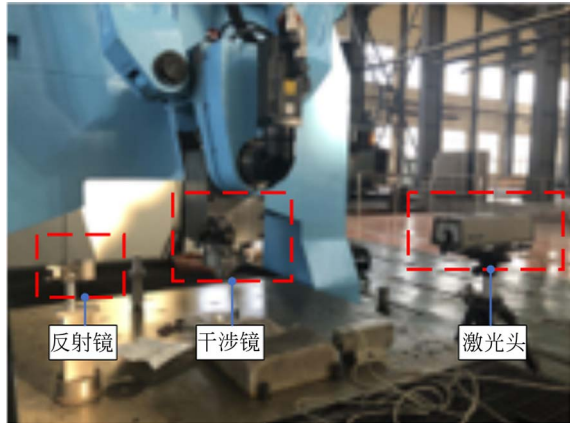


图 8 激光跟踪精度测量系统

Fig. 8 Laser tracking accuracy measurement system

步骤(2):调整好激光光路,使得在全工作空间内激光可以反射回干涉仪。

步骤(3):按照图 9 所示的测量行程路线示意图进行测量数据,表 8 为各轴的测量参数设置。

为了对比零点位置误差标定和全误差标定对混联机器人的精度影响,分别测量出混联机器人

未标定时、完成零点位置误差标定后以及完成全误差标定后,X轴与Z轴的定位精度。由于Y轴输出由独立的单自由度移动平台完成,这里没有给出标定过程,直接测量出其定位精度和重复定位精度为 0.015 mm 和 0.01 mm。表 9 和表 10 为 X 和 Z 轴的位置精度测量结果。

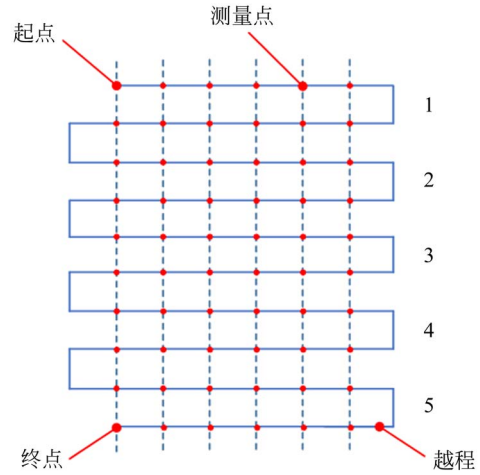


图 9 测量行程路线示意图

Fig. 9 Schematic diagram of measurement route

表 8 各轴的测量参数设置

Tab. 8 Measurement parameter settings for each axis

测量轴	测量行程/mm	起始位置/mm	终止位置/mm	间隔/mm	测量点数	测量模式	循环次数
X 轴	202	-100	100	20	11	双向	5
Y 轴	502	0	500	100	6	双向	5
Z 轴	102	-50	50	10	11	双向	5

表 9 X 轴定位精度

Tab. 9 X-axis positioning accuracy

	双向定位精度 A	双向重复定位精度 R
标定前	0.861 8	0.235 5
零点标定后	0.769 1	0.228 6
全误差标定后	0.766 4	0.228 6

表 10 Z 轴定位精度

Tab. 10 Z-axis positioning accuracy

	双向定位精度 A	双向重复定位精度 R
标定前	0.093 8	0.041 0
零点标定后	0.060 5	0.022 5
全误差标定后	0.060 4	0.022 4

5 结果讨论

从实验结果来看,五自由度混联机器人的 Y 轴定位精度最高,Z轴次之,X轴精度最低。一方面,由于 Y 轴运动由独立的单自由度移动完成,

而 Z 轴和 X 轴运动则是 4 个电机联动完成的。另一方面,从刚度角度分析,混联机器人整体处于悬臂状态,其侧向刚度(X轴方向)要低于轴向刚度(Z轴方向),这也是 X 轴定位精度较低的主要影响因素。

通过运动学标定,其定位精度和重复定位精

度较未标定时均有一定程度的提升, X 方向的定位精度提升了近 0.1 mm, Z 方向的定位精度提升了近 0.03 mm。其中零点标定对定位精度的提升比较明显, 在零点标定基础上完成的全标定对定位精度有较小幅度的提升。实验数据充分表明了本文所提出运动学标定方法的有效性。

6 结 论

本文针对 2RPU/UPR+RP 过约束混联机器人的结构特征, 分析了其误差源参数, 共有 22 个独立参数需要标定, 并将其分为并联机构和单自由度摇摆头两部分, 分别建立这两部分的零点标

定与全标定方法。提出了基于激光跟踪仪的位姿测量原理, 搭建了标定实验平台, 得到了误差参数的真实值, 计算了标定前后的混联机器人的定位精度, 结果表明, 零点标定对机器人定位精度的提升非常明显, X 轴和 Z 轴定位精度的分别从 0.861 8 mm 和 0.093 8 mm 提升到了 0.769 1 mm 和 0.060 5 mm, 在零点标定基础上的全标定对定位精度也有较小程度地提升。

通过标定后, X 方向定位精度仍然比较低, 分析其主要因为为并联机构在 X 方向的侧向刚度比较低, 主要支链驱动单元的导向部分结构刚度弱引起的, 目前正在研讨改进方案, 后续将进一步对该混联机器人进行改造。

参考文献:

- [1] CAMPOS A, BUDDE C, HESSELBACH J. A type synthesis method for hybrid robot structures [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, 43(8): 984-995.
- [2] HUANG T, LI M, ZHAO X M, et al.. Conceptual design and dimensional synthesis for a 3-DOF module of the TriVariant-a novel 5-DOF reconfigurable hybrid robot [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(3): 449-456.
- [3] HOSSEINI M A, DANIALI H M. Cartesian workspace optimization of Tricept parallel manipulator with machining application [J]. *Robotica*, 2015, 33(9): 1948-1957.
- [4] 李林. 虚拟轴数控加工中心摆角精度的补偿[J]. *航空制造技术*, 2014, 452(8): 76-78.
LI L. Compensation of swing angle accuracy of virtual axis NC machining center [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 452(8): 76-78. (in Chinese)
- [5] BI Z M, JIN Y. Kinematic modeling of Exechon parallel kinematic machine [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(1): 186-193.
- [6] AMINE S, CARO S, WENGER P. Constraint and singularity analysis of the exechon [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 162: 141-150.
- [7] 黎广喜, 刘海涛, 徐青山, 等. 铣削加工用混联机器人参数曲线插补方法[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(16): 43-50.
LI G X, LIU H T, XU Q SH, et al.. Parameter curve interpolation method for hybrid robots for milling [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(16): 43-50. (in Chinese).
- [8] 李寅翔. 2-UPR-RPU 并联机构运动学标定研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016: 9-10.
LI Y X. *Research on Kinematic Calibration of 2-UPR-RPU Parallel Mechanism* [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2016: 9-10. (in Chinese).
- [9] 许允斗, 胡建华, 张东胜, 等. 一种所有转轴均连续的五自由度混联机器人机构[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(21): 19-24.
XU Y D, HU J H, ZHANG D SH, et al.. A five-degree-of-freedom hybrid robot mechanism with continuous rotation axes [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(21): 19-24. (in Chinese).
- [10] XU Y D, ZHANG D S, YAO J T, et al.. Type synthesis of the 2R1T parallel mechanism with two continuous rotational axes and study on the principle of its motion decoupling [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, 108: 27-40.
- [11] NEAGOE M, GOGU G, DIACONESCU D. *High Degree Accuracy Modelling and Calibration of Serial Robots with Large Errors* [M]. Product Engineering. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004: 397-408.
- [12] GATTRINGER H, NEUBAUER M, KASERER D, et al.. A novel method for geometric robot calibration using laser pointer and cameras [C]. *International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region*. Springer, Cham, 2017, 49: 200-207.

- [13] KHALIL W, CAENEN J L, ENGUEHARD C. *Identification and Calibration of the Geometric Parameters of Robots* [M]. Experimental Robotics I. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1990, 13: 528-538.
- [14] NUBIOLA A, BONEV I A. Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar [J]. *Precision Engineering*, 2014, 38(3): 472-480.
- [15] 戴智武,刘超,盛鑫军,等. Delta 并联机器人机构参数误差分析及标定方法研究[J]. *机电一体化*, 2016, 22(03): 8-12.
- DAI ZH W, LIU CH, SHENG X J, *et al.*. Research on parameter error analysis and calibration method of Delta parallel robot mechanism [J]. *China Mechanical & Electrical Integration*, 2016, 22(3): 8-12. (in Chinese).
- [16] 潘伯钊,宋秩民,王攀峰,等. 基于激光跟踪仪的混联机器人快速零点标定方法[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(01): 31-37.
- PAN B ZH, SONG Y M, WANG P F, *et al.*. Fast zero calibration method for hybrid robot based on laser tracker [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(1): 31-37. (in Chinese).
- [17] 李秦川,柴馨雪,陈巧红. 两转一移三自由度并联机构研究进展[J]. *科学通报*, 2017, 62(14): 1507-1519.
- LI Q CH, CHAI X X, CHEN Q H. Review on 2R1T 3-DOF parallel mechanisms [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(14): 1507-1519. (in Chinese)
- [18] 张东胜,许允斗,姚建涛,等. 2-RPU/UPR 并联机构自由度和位置分析[J]. *机械设计与制造*, 2014(12): 53-56.
- ZHANG D SH, XU Y D, YAO J T, *et al.*. Degree of freedom and position analysis of 2-RPU/UPR parallel mechanism [J]. *Mechanical Design & Manufacture*, 2014(12): 53-56. (in Chinese).
- [19] DONGSHENG ZHANG, YUNDOU XU, JIANTAO YAO, *et al.*. Kinematics modeling of a 5-dof hybrid manipulator by means of equivalent model method [J]. *International Journal of Robotics and Automation*, 2018, 33(4): 407-417.
- [20] 吴江杰,陈伟庆,辛天飞. 激光干涉仪测量数控机床定位精度的方法研究[J]. *工业控制计算机*, 2017, 30(11): 159-160.
- WU J J, CHEN W Q, XIN T F. Research on the method of measuring the positioning accuracy of CNC machine tools by laser interferometer [J]. *Industrial Control Computer*, 2017, 30(11): 159-160. (in Chinese).

作者简介:



许允斗(1985—),男,浙江温州人,博士,副教授,分别于2007年和2012年在燕山大学获得学士和博士学位,主要从事并联机构学理论及其应用技术研究。E-mail: ydxu@ysu.edu.cn

通讯作者:



赵永生(1962—),男,吉林龙井人,教授,博士生导师,分别于1983年、1987年、1999年分别在东北重型机械学院、燕山大学获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为机构学理论及其应用技术。E-mail: yszhao@ysu.edu.cn