

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.04.017

新型二自由度并联机构的运动学标定方法

李寅翔¹, 张伟中^{1,2}, 吴伟峰¹, 包建潮³

- (1. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018;
2. 浙江机电职业技术学院 电气电子工程学院, 浙江 杭州 310053;
3. 杭州保迪自动化设备有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要:精度不足制约着并联机构的发展,传统的并联机构运动学标定方法可以在一定程度上提高并联机构的精度,但其缺点在于对测量仪器的要求较高,计算量较大。针对一种新型二自由度并联机构,运用无参数化标定的方法对机构进行运动学标定。该方法不需要进行参数辨识,只需要通过外部测量设备测出机械手末端执行器的位姿,利用运动学正反解解出实际位姿与期望位姿之间驱动输入的差值,补偿到理论的输入中,即可得到补偿后的动平台位姿。计算机仿真结果表明,这种方法可以有效地提高动平台定位精度,证明了无参数化标定方法的有效性和可靠性。

关键词:并联机构;无参数化标定;计算机仿真;精度等级

中图分类号:TP241 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2015)04-0069-04

Kinematic Calibration of Novel 2-DOF Parallel Mechanism

LI Yinxiang¹, ZHANG Weizhong^{1,2}, WU Weifeng¹, BAO Jianchao³

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Department of Electrical and Electronic Engineering, Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China;

3. Hangzhou Baodi Automation Equipment Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: Parallel mechanism has advantages of high stiffness, high load capacity, high precision, etc. For these reasons, it plays an extremely important role in the industrial fields. However, the limitation of accuracy often hinders the development of parallel mechanism. The traditional kinematic calibration method has been used to improve the accuracy of parallel mechanism, but the drawback is high demanding of measuring instrument and large amount of calculation. A novel 2-DOF Parallel mechanism and no parametric calibration method for kinematic calibration were presented. Parameter identification is not needed by this method, only through external measuring equipment to measure the position of manipulator actuator. The difference between actual position and expected position is obtained by solving direct kinematics and inverse kinematics. Then the moving platform of posture can be compensated. The computer simulation results show that this method can effectively improve the positional accuracy of the moving platform. The validity and reliability of the mentioned method is verified by simulation.

Key words: parallel mechanism; no parametric calibration; computer simulation; accuracy level

并联机构由于其优越的动态特性,高精度、高速度^[1-2]而被广泛应用在工业生产中。然而,由于制造公差,安装误差以及连杆偏差会导致并联机构出现精度不足的现象^[3-4]。因此在许多具有潜力的工业领域中,并联机构的应用还并没有达到预期的要求。因此,提

高机构的标定精度得到了很多国内外研究专家的高度重视,也成为国际上机构学研究的重点领域之一^[5]。

Zhuang等^[6]利用电子经纬仪沿着 Stewart 平台的边缘测量了其位姿误差全集。Huang等^[7]通过分离三自由度并联铣床位姿参数,提出了一种阶层式识别

收稿日期:2014-12-25;修回日期:2015-02-29

基金项目:浙江省新苗人才计划项目资助(2014R406070);浙江省滑动轴承工程技术研究中心项目资助(2012E10028)

作者简介:李寅翔(1990),男,新疆石河子人,硕士研究生,主要从事并联机器人机构学、运动学标定方面的研究。E-mail: liyinxiang1018@163.com

几何参数的方法。Chang 等^[8]依靠一组最小的线性独立的参数,即原始误差参数的线性组合,指出机械手运动学是唯一确定的。但是,目前的标定方法可靠性仍然不足,尽管在构建一个高精度的并联机构中付出了很多代价,但是依旧没有达到最初的目标。

本文根据机构的特点采用了一种无参数的运学标定方法^[9-10]。其优点在于运动学标定的过程中可以不用进行参数辨识,因而很好地解决了病态位姿下的参数辨识问题。因此,这种方法可以对很多类型下的并联机构进行标定,并提高其精度,极大程度上改善机构绝对位置精度。其相对应的算法也比较简单,易于实现,在一些需要降低计算复杂性的场合下,可以完成对控制系统实时监控。通过大量的仿真证明了这是一个可靠地标定方法,它可以用在无约束情况下的更高自由度的场合中。

1 机构简介

本文针对一种新型二自由度并联机构^[11],其机构简图如图1所示。该机构通常用于工业生产线上产品的快速抓取和放置^[12]。机构的驱动为2个移动滑块A、B,使得该机械手具有2个平动自由度,能实现一个平面内的二维移动。

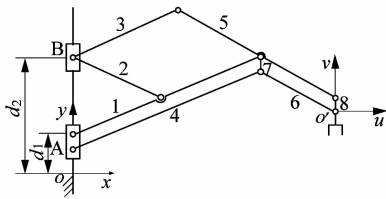


图1 二自由度并联机构简图

Figure 1 Sketch of 2-DOF parallel mechanism

图中滑块A和B代表2个直线驱动副,分别通过滚珠丝杠和联轴器连接2个伺服电机及驱动器,可以实现沿导轨水平方向的上下快速移动。连杆1,4和6,7为一个平行四边形结构,因此末端动平台无法实现自身的转动,也就是说在机构运动过程中,整个动平台的方向保持不变,且始终处在同一个平面内运动。

2 运动学分析

并联机构的运动学分析包括对其进行位置正解分析,工作空间分析等,这些都是研究并联机构运动学标定的前提。

2.1 位置反解分析

为了验证二自由度并联机构运动学标定后的正确性,需要建立理想的位置反解模型,以及带有实际几何参数误差的位置正解模型。

该并联机构的位置反解,即已知动平台参考点 o' 的位置求得2个滑块的位移量 d_1, d_2 的过程。现设定动平台参考点 o' 在定坐标系 xoy 下的坐标为 $o'(x, y)$,则根据矢量关系式可反求得理想的位置反解方程为:

$$d_1 = y - \sqrt{l^2 - \left(\frac{x}{3}\right)^2}; \quad (1)$$

$$d_2 = y + \sqrt{l^2 - \left(\frac{x}{3}\right)^2}. \quad (2)$$

其中, l 表示杆长(这里假设所有杆长都一致)。

2.2 位置正解分析

图2所示为考虑误差后的二自由度并联机构运动学简图,为得到带有实际几何参数的位置正解模型,我们将该并联机构做了相应的简化。在已知2个滑块位移量 d_1, d_2 的情况下,根据机构间的几何矢量关系式,得到了动平台参考点 o' 的位置。

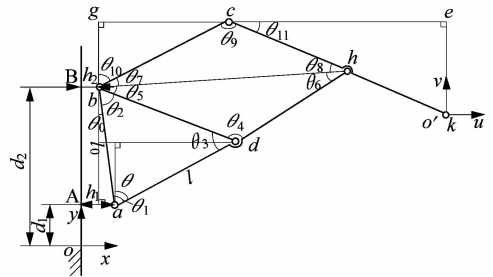


图2 带有几何参数误差的二自由度并联简图

Figure 2 Sketch of 2-DOF parallel mechanism with geometric parameter error

在定坐标系 xoy 下,A、B 2滑块的坐标为 $A(0, d_1), B(0, d_2)$ 。 h_1, h_2 分别表示2个滑块的位置误差值,并且考虑到连杆之间需要相互平行,令除 ab 杆以外的其余杆长均为 l ,则

$$l_0 = \sqrt{(h_1 - h_2)^2 + (d_2 - d_1)^2}; \quad (3)$$

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{h_1 - h_2}{l_0}\right). \quad (4)$$

由余弦定理可得:

$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{l_0}{2 \times l \times l_0}\right); \quad (5)$$

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{l_0^2 - 2 \times l^2}{2 \times l^2}\right). \quad (6)$$

由式(3)~式(6)可得:

$$\theta = \theta_1 - \theta_0; \quad (7)$$

$$\theta_4 = \pi - \theta_3. \quad (8)$$

继续利用余弦定理、正弦定理可得:

$$l_{bh} = \sqrt{(2 \times l^2 - 2 \times l^2 \times \cos \theta_4)}; \quad (9)$$

$$\theta_9 = \arccos \left(\frac{l_{bh}^2 - 2 \times l^2}{2 \times l^2} \right). \quad (10)$$

同理,可求得 $\theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8$, 从而得:

$$\theta_{10} = \pi - (\theta_0 + \theta_2 + \theta_5 + \theta_7); \quad (11)$$

$$\theta_{11} = \pi - \theta_9 - \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{10} \right). \quad (12)$$

令 c 点在定坐标系 xoy 下的坐标值为 (x_c, y_c) , 则

$$\begin{cases} x_c = l \times \sin \theta_{10} + h_2 \\ y_c = l \times \cos \theta_{10} + d_2. \end{cases} \quad (13)$$

所以

$$h_{ek} = 2 \times l \times \sin \theta_{11}. \quad (14)$$

联立式(7)~(14), 可得到该二自由度并联机构带实际几何参数的位置正解方程组为

$$\begin{cases} x = 3 \times l \times \sin \theta + h_1 \\ y = y_c - h_{ek}. \end{cases} \quad (15)$$

2.3 工作空间分析

该二自由度机构的工作空间受到杆长以及滑块不产生干涉的影响, 通过对杆长条件加以限制, 利用 MATLAB 软件可以得到其工作空间如图 3 所示。

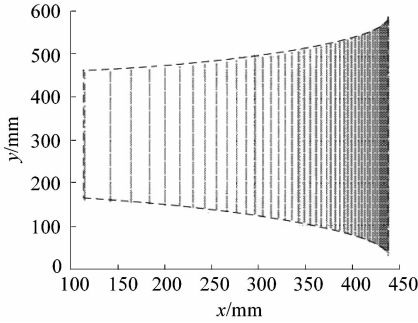


图 3 二自由度并联机构工作空间

Figure 3 Workspace of 2-DOF parallel mechanism

3 基于无参数化的运动学标定方法

3.1 无参数标定法

相对于其他运动学标定算法来说, 无参数标定法是一种位形空间补偿的方法, 该方法不用辨识出机构的误差参数, 可以直接将末端误差转换成输入端的误差补偿, 从而完成对末端执行器误差的修正, 并且工作空间中每一个位形的测量、计算和补偿都相互独立, 因此是一个实时误差补偿的方法。

3.2 位形空间补偿

图 1 是二自由度并联机构零点参考位置。现给定机构一个末端位姿, 则动平台位置坐标为 (X, Y) , 姿态角度为 U, V 。为了达到期望位姿, 通过运动学反解, 可以计算出理论上机构的各驱动输入为 d_1, d_2 。再将这

个驱动值输入实际机构输入端, 由于机构零件及装配误差的存在, 其末端动平台的实际位姿与期望位姿之间会存在一定的误差, 通过外部测量设备可以测出动平台实际位置坐标为 (X', Y') , 姿态角度为 U', V' 。通过运动学反解, 可以计算出相对应各分支的驱动输入为 d'_1, d'_2 , 进而可以确定实际位姿与期望位姿之间驱动输入的差值为 $\Delta d = d'_i - d_i (i = 1, 2)$ 。最后将 Δd_i 补偿到理论输入 d_i 中, 即可得到补偿后的动平台位姿。

3.3 二自由度并联机构无参数标定

对于二自由度并联机构来说, 其在工作空间中第 k 个非奇异位形为 $p_k = (x_k, y_k)$, 对应的驱动输入为 $d_k = (d_{1k}, d_{2k})$, 则可以得到:

$$p_k = f(q_k); \quad (16)$$

$$q_k = f^{-1}(p_k). \quad (17)$$

式中, $f(q_k)$ 为二自由度并联机构运动学正解; $f^{-1}(p_k)$ 为二自由度并联机构运动学反解。

通过外部测量设备可以测出第 k 个位形下的实际动平台位置为 $p'_k = (x'_k, y'_k)$, 则通过式(17)可以算出对应驱动输入为

$$q'_k = f^{-1}(p'_k). \quad (18)$$

式中, $q'_k = (d'_{1k}, d'_{2k})$ 。

实际位形对应的驱动输入与理论输入的差值为

$$\Delta d_{1k} = d'_{1k} - d_{1k}; \quad (19)$$

$$\Delta d_{2k} = d'_{2k} - d_{2k}. \quad (20)$$

将驱动输入差值补偿到理论输入中可得:

$$d''_{1k} = d_{1k} - \Delta d_{1k}; \quad (21)$$

$$d''_{2k} = d_{2k} - \Delta d_{2k}. \quad (22)$$

将补偿后的驱动输入值带入实际机构中, 即可得到补偿后的机构动平台位置。

3.4 计算机仿真

为了验证无参数标定方法的正确性, 现以二自由度并联机构工作空间的末端位置作为模拟二自由度并联机构动平台测量数据, 进行计算机仿真。具体仿真流程如图 4 所示。

在二自由度并联机构工作空间中, 规划多组末端位置参考点, 并按照上述无参数的标定方法进行仿真标定, 标定前后的位置误差结果如图 5 和图 6 所示。可以看出利用无参数标定的方法, 二自由度并联机构在 x, y 方向上的位置误差显著减小, 精度明显提高。

进而, 运用论述的方法分别对工作空间内沿 x 方向的运动轨迹和沿 y 方向的运动轨迹进行误差修正, 最后的结果如表 1 所示, 由表中数据可见仿真标定后

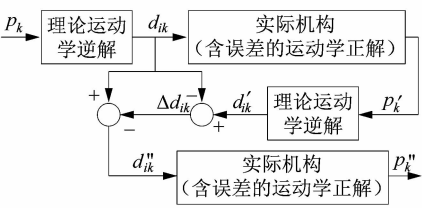


图4 无参数标定法仿真流程
Figure 4 Simulation process of no parameter calibration method

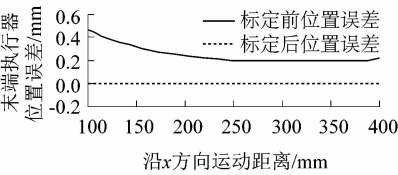


图5 末端动平台沿x轴方向运动标定前后位置差
Figure 5 Position error along x directions of end-effector before and after calibration

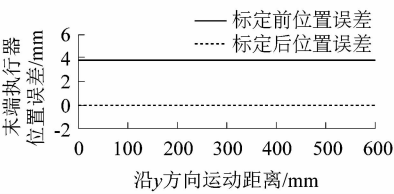


图6 末端动平台沿y轴方向运动标定前后位置误差
Figure 6 Position error along y directions of end-effector before and after calibration

位置误差平均值由 0.1 mm 降低到 0.000 1 mm。仿真结果表明该方法具有较好的效果,证明了该标定方法的有效性。

表1 末端执行器位置误差/ μm

Table 1 Position error of end-effector

标定项目	标定前			标定后		
	最大误差	最小误差	平均误差	最大误差	最小误差	平均误差
x 方向	472.0	192.3	255.4	0.360 68	0.123 62	0.172 00
y 方向	3 778.4	3 778.4	3 778.4	11.300 00	11.300 00	11.300 00

4 结语

本文对可用于工业生产线上产品的快速抓取和放置工作的一种新型二自由度并联机构,运用了一种无参数化标定的方法对其进行了运动学标定。在标定过程中进行了运动学基础分析,包括运动学理想位置的

反解分析和实际位置的正解分析,以及工作空间大小分析。通过计算机仿真验证了其有效性,位置误差平均值由 0.1 mm 降低到 0.000 1 mm,进而说明了该方法具有一定的可靠性。

文献中无参数化标定的方法可针对一些结构简单、易于控制的少自由度并联机构进行运动学标定。标定方法简单易行,计算量小,标定后精度高。但是,对于几何误差参数较多,结构较为复杂的机构,这种方法则需要进一步优化设计。因此,在提高并联机构精度的课题探索中,还需要进一步的研究。

参考文献:

[1] CRAIG J J. 机器人学导论[M]. 负超,译. 北京:机械工业出版社,2003.

[2] LEE K M, SHAH D K. Kinematic analysis of a three-degrees-of-freedom in-parallel actuated manipulators [J]. IEEE Journal of Robotic and Automation,1988,4(3):354-360.

[3] 贺新升,王彬,黄芳胜,等. 基于新型并联机构的太阳自动跟踪装置[J]. 机电工程,2012,29(1):62-65.

[4] JOSHI S, TSAI L W. A comparison study of two 3-DOF parallel manipulators: one with three and the other with four supporting legs [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation,2003,19(2):200-209.

[5] 王东署,迟健男. 机器人运动学标定综述[J]. 计算机应用研究,2007,24(9):8-11.

[6] ZHUANG H Q, YAN J H, MASORY O, et al. Calibration of stewart platforms and other parallel manipulators by minimizing inverse kinematic residuals [J]. Journal of Robotic Systems,1998,15(7):395-405.

[7] HUANG T, TANG G B, LI S W, et al. Kinematic calibration of a class of parallel kinematic machines(PKM) with fewer than six degrees of freedom [J]. Technological Sciences,2003,46(5):515-526.

[8] CHANG P, LI T, GUAN L, et al. Minimal linear combinations of the error parameters for kinematic calibration of parallel kinematic machines [C]//Proceedings-5th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. Chemnitz, Germany:Chemnitz University Press,2006:565-583.

[9] GOTTLIEB J. Non-parametric calibration of a stewart platform [C]//Proceedings of 2014 Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators. Tianjin:Tianjin University Press,2014.

[10] GOTTLIEB J. Method and apparatus for calibration of a kinematic and a corresponding computer program and a corresponding computer-readable storage medium; German, DE102011079764 [P]. 2012-11-15.

[11] 吴伟峰. 一种具有大横向位移的二自由度并联机构:中国,201210415062. X [P]. 2012-10-25.

[12] 刘凤臣,姚赞峰,刘黎明,等. 高速搬运机器人产业应用及发展[J]. 轻工机械,2012,30(2):108-112.