

基于关节力传感器的并联六自由度机构标定方法*

皮阳军¹ 王宣银² 胡玉梅¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 杭州 310027)

【摘要】 提出了一种基于关节力传感器的并联六自由度机构结构参数标定方法。从力学角度出发,通过测量并联六自由度机构各关节驱动力,利用并联六自由度机构自身的运动学和动力学模型构造相应的辨识模型,实现其结构参数的标定。通过标定仿真验证了该方法的实用性和有效性。

关键词: 并联六自由度机构 关节力传感器 标定 结构参数

中图分类号: TP242; TH161+.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)10-0215-04

Calibration of 6-DOF Parallel Mechanism Using Joint Force Sensors

Pi Yangjun¹ Wang Xuanyin² Hu Yumei¹

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

2. The State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract

A calibration method of 6-DOF parallel mechanism based on joint force sensors was presented to improve the accuracy of parallel mechanism. In this method, both dynamics and kinematics of parallel mechanism were used to construct identification model. Only the data of force sensors installed on the end of joint actuators was required. Simulation results revealed the convenience and effectiveness of the proposed calibration method.

Key words 6-DOF parallel mechanism, Joint force sensor, Calibration, Structural parameters

引言

精度是评价并联六自由度机构的重要指标,然而由于生产过程以及装配过程中会产生加工误差和装配误差,使得并联六自由度机构的实际结构参数与理想结构参数之间存在偏差,这会造成并联六自由度机构运动学、动力学模型不准确,从而影响系统的精度^[3]。因此,为了提高并联六自由度机构的精度,必须进行结构参数标定。

目前针对并联六自由度机构的标定研究,可分为两类。一类是外标定法,利用外部测量系统,通过直接或者间接测量运动平台的多个全部位姿信息进行结构参数标定^[4~8]。这种方法比较直接,标定精度依赖于外部传感器精度。间接测量主要是通过设计长度的测量,来确定平台位姿^[9]。外标定法的缺

点在于需要购买昂贵的设备,并且利用这些设备进行标定之前,设备本身的精度也需要标定,因而耗时长且对操作要求高,从而导致标定效率较低^[10]。另一种方法为自标定法,该方法无需检测运动平台的位姿信息,通常根据机器人内部冗余传感器的输出或者利用由机械装置产生的运动约束来构造相应辨识模型,获得并联机构的结构参数^[11]。该方法的缺点在于对已经制造安装完成的并联机构,内部传感器的安装较为麻烦,而施加内部约束需要并联机构的主动关节能够以被动模式工作^[12~13]。近年来,也有学者提出施加外部约束的方法对并联机构进行标定,即将并联机构某些自由度通过机械装置锁定,使得机构的传感器数目多于机构自由度数,从而获得冗余传感器信息^[14~15]。自标定法具有测量简单、代价小、易于实现在线补偿等优点。

收稿日期: 2011-10-24 修回日期: 2011-12-15

* 国家自然科学基金资助项目(50375139,51105389)和中央高校基本科研业务费资助项目(CDJRC11280003)

作者简介: 皮阳军,讲师,博士,主要从事并联机构建模、标定以及控制研究,E-mail: cqqp@cqu.edu.cn

目前并联六自由度机构传统标定方法均从运动学角度进行标定,这对于提高并联六自由度机构的运动学精度十分有效。然而,在某些应用场合,并联六自由度机构被用作力加载器,需要提高力的控制精度,因此本文从并联六自由度机构的动力学模型出发,通过构造力约束来进行并联六自由度机构结构参数的标定。

1 并联六自由度机构动力学分析

分别在如图 1 所示的并联六自由度机构基平台和动平台上建立基坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ (又称惯性坐标系)和动坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$,其设计结构参数 θ 分别为:上平台铰链在动坐标系中的位置坐标 p ;下平台铰链在静坐标系中的位置坐标 b ;各关节杆的初始长度 q 。在求解并联六自由度机构运动学、动力学模型时,都需要其结构参数信息。因此,并联六自由度机构的结构参数的准确性对其运动学、动力学模型的精度有着重要影响。

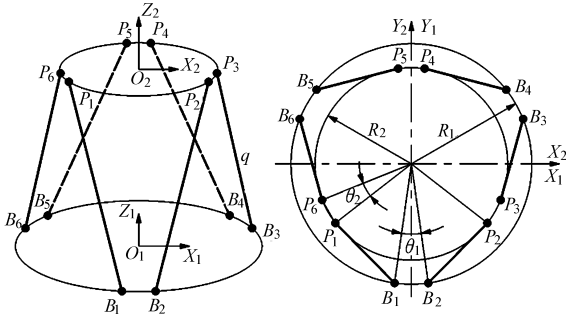


图 1 并联六自由度机构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 6-DOF parallel manipulator

并联六自由度机构动力学方程可以表示为如下的二阶微分方程

$$F = M \ddot{X}_p + V \dot{X}_p + G \tag{1}$$

式中 M ——上平台的广义质量矩阵
 V ——上平台非线性科氏向心项系数矩阵
 G ——上平台重力项
 X_p ——上平台广义位姿
 F ——上平台所受广义力

由文献[2]可知,关节输出力与上平台所受广义力间具有一定的转换关系,即

$$F = J_f f \tag{2}$$

式中 f ——关节输出力 J_f ——力雅可比矩阵

由式(1)与式(2)可得

$$M \ddot{X}_p + V \dot{X}_p + G = J_f f \tag{3}$$

其中力雅可比矩阵 J_f 、上平台广义质量矩阵 M 和上平台非线性科氏向心项系数矩阵 V 均与并联六自由度机构的位姿有关。上平台重力项 G 与上平台

质量相关。

2 标定方法

并联六自由度机构的动力学方程参数较多,直接将其应用于标定十分困难。然而,当并联六自由度机构被约束在静止状态时,其广义速度 $\dot{X}_p$ 和广义加速度 $\ddot{X}_p$ 均为零,式(3)简化为静力学方程,可表示为

$$G = J_f f \tag{4}$$

为了表达方便,将力雅可比矩阵表示为关于结构参数与机构位姿的函数

$$J_f = \Pi(\theta, X_p) \tag{5}$$

将式(5)代入式(4)可得

$$G = \Pi(\theta, X_p) f \tag{6}$$

显然,对于确定的并联六自由度机构, G 为常数,而函数 Π 仅与机构的结构参数和位姿有关。因此,如果能获得机构处于不同位姿时各关节的驱动力,即可构造出标定模型,完成机构的结构参数标定。对于并联六自由度机构,在其关节驱动器末端可以较为方便地安装关节力传感器,如图 2 所示。在本文的标定方法中,关节输出力 f 通过关节力传感器获得。

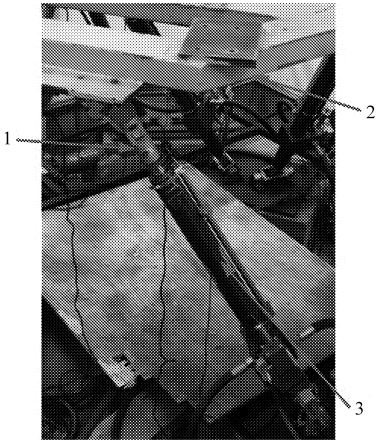


图 2 并联六自由度机构支链关节力传感器安装示意图

Fig. 2 Experimental setup of 6-DOF parallel manipulator

1. 关节力传感器 2. 动平台 3. 液压缸

当并联六自由度机构静止时,对于 K 组标定数据,仅当并联六自由度机构所标定的结构参数 θ 等于实际参数 θ_r 时,满足

$$\|F^r - F^n\| = 0 \quad (r \neq n, r, n = 1, 2, \dots, K) \tag{7}$$

为了标定并联六自由度机构的结构参数,定义标定向量

$$h = \begin{bmatrix} F^1 - F^2 \\ F^2 - F^3 \\ \vdots \\ F^K - F^1 \end{bmatrix} \in R^{6K} \tag{8}$$

最优化目标函数为

$$\chi = \boldsymbol{h}^T \boldsymbol{h} \tag{9}$$

因此,标定目标就变成找到一组结构参数,使得目标函数 χ 最小。这是一个典型的非线性优化问题,可采用数值迭代方法求解。数值迭代算法的初值选取,直接影响到算法的收敛速度和优化结果,在本文中,选取并联六自由度机构结构参数的设计值作为算法的初值。

3 仿真

需标定的并联六自由度机构结构参数有 42 个,每一组标定数据中含 6 个方程,所以至少需要 7 组数据进行标定,即标定样本数 $K \geq 7$ 。
 K 组标定数据可通过如下步骤获得:

(1) 将并联六自由度机构运动到指定位置,保持并联六自由度机构静止,获取该位置的关节力 $\boldsymbol{f}_1$,驱动杆长度 $\boldsymbol{q}_1$ 。

(2) 将并联六自由度机构运动到另外指定位置,保持并联六自由度机构静止,获取该位置的关节力 $\boldsymbol{f}_k$,驱动杆长 $\boldsymbol{q}_k$ 。

(3) 重复步骤(2),当 $k = K$ 时,结束。

为了验证本文提出标定方法的有效性,使用最小二乘法在 Matlab 环境下进行了数值仿真。仿真中,设定并联六自由度机构的实际结构参数如表 1 所示,其设计结构参数如表 2 所示。利用第 2 节提出的标定方法进行标定,最后得到的标定后结构参数如表 3 所示。

表 1 并联六自由度机构实际结构参数

Tab.1 Actual structural parameters of 6-DOF parallel manipulator

m

编号	基平台铰链参数			动平台铰链参数			驱动杆 初始长度
	b_{ix}	b_{iy}	b_{iz}	p_{ix}	p_{iy}	p_{iz}	
1	-0.135 0	-0.992 45	0.000 3	-0.634 24	-0.491 72	-0.199 8	1.416 0
2	0.143 0	-0.987 65	-0.003 5	0.634 54	-0.492 62	-0.189 6	1.440 0
3	0.923 5	0.370 33	-0.001 3	0.737 36	-0.299 55	-0.197 8	1.441 0
4	0.793 5	0.623 82	0.002 3	0.107 40	0.796 12	-0.196 8	1.420 0
5	-0.795 5	0.617 82	-0.001 7	-0.108 50	0.793 12	-0.191 6	1.432 7
6	-0.920 5	0.371 33	-0.002 6	-0.743 76	-0.296 75	-0.195 6	1.424 0

表 2 并联六自由度机构设计结构参数

Tab.2 Design structural parameters of 6-DOF parallel manipulator

m

编号	基平台铰链参数			动平台铰链参数			驱动杆 初始长度
	b_{ix}	b_{iy}	b_{iz}	p_{ix}	p_{iy}	p_{iz}	
1	-0.140 0	-0.990 15	0	-0.631 24	-0.489 02	-0.192 5	1.431
2	0.140 0	-0.990 15	0	0.631 24	-0.489 02	-0.192 5	1.431
3	0.927 5	0.373 83	0	0.741 66	-0.301 05	-0.192 5	1.431
4	0.787 5	0.616 32	0	0.110 00	0.792 82	-0.192 5	1.431
5	-0.787 5	0.616 32	0	-0.110 00	0.792 82	-0.192 5	1.431
6	-0.927 5	0.373 83	0	-0.741 66	-0.301 05	-0.192 5	1.431

表 3 标定后并联六自由度机构结构参数

Tab.3 Identified structural parameters of 6-DOF parallel manipulator

m

编号	基平台铰链参数			动平台铰链参数			驱动杆 初始长度
	b_{ix}	b_{iy}	b_{iz}	p_{ix}	p_{iy}	p_{iz}	
1	-0.137 820	-0.990 77	2.54×10^{-6}	-0.633 34	-0.488 560	-0.195 01	1.429 993
2	0.139 373	-0.986 78	-0.002 010	0.632 665	-0.495 230	-0.189 73	1.430 053
3	0.925 613	0.372 910	0.002 488	0.740 689	-0.295 270	-0.194 27	1.433 830
4	0.790 995	0.617 895	-0.000 860	0.106 267	0.792 928	-0.194 62	1.428 931
5	-0.792 210	0.618 097	0.001 599	-0.105 00	0.789 182	-0.194 79	1.430 691
6	-0.929 290	0.374 46	0.001 805	-0.740 280	-0.299 780	-0.194 11	1.432 068

为了检验标定效果,设定一组仿真目标曲线为

$$\begin{cases} x=0.04\cos\left(\frac{\pi}{8}(t-5)\right) \\ y=0.05\cos\left(\frac{\pi}{8}(t-5)\right) \\ z=1.7 \\ \psi_x=11\cos\left(\frac{\pi}{8}(t-5)\right) \\ \psi_y=8\cos\left(\frac{\pi}{8}(t-5)\right) \\ \psi_z=5\cos\left(\frac{\pi}{8}(t-5)\right) \end{cases} \quad (10)$$

式中,平动单位为米(m),转动单位为角度(°)。

图3和图4给出了标定前与标定后各驱动杆的

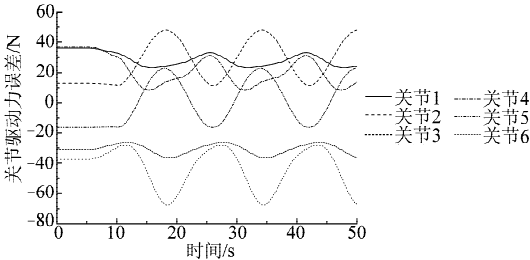


图3 标定前关节驱动力误差

Fig.3 Joint force error without calibration

关节驱动力误差。可以看出,标定后并联六自由度机构的关节驱动力误差明显减小。仿真结果证明了本文提出的基于关节力传感器的并联六自由度机构结构参数标定方法的有效性。

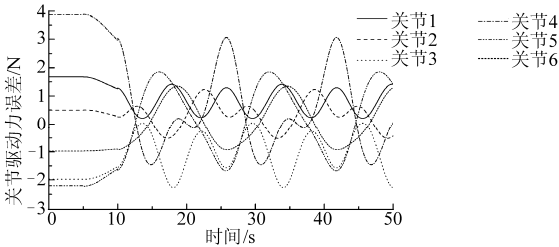


图4 标定后关节驱动力误差

Fig.4 Joint force error with calibration

4 结束语

从力学角度提出了一种基于关节力传感器的并联六自由度机构结构参数标定方法。在并联六自由度机构关节支链末端安装力传感器,通过并联六自由度机构动力学模型,利用并联六自由度机构关节力与广义力的映射关系进行标定。仿真结果表明,利用该方法进行并联六自由度机构结构参数标定,可以显著提高并联六自由度机构的精度。

参 考 文 献

1 Dasgupta Bhaskar, Mruthyunjaya T S. The Stewart platform manipulator: a review[J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(1): 15~40.

2 黄真,孔令富,方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京:机械工业出版社,1997.

3 彭斌彬,高峰. 并联机器人的标定建模[J]. 机械工程学报,2005,41(8):132~135.

4 Daney D. Kinematic calibration of the gough platform[J]. Robotica, 2003, 21(6): 677~690.

5 张曙,Heisel U. 并联运动机床[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

6 Zhuang H, Masory O, Yan J. Kinematic calibration of a Stewart platform using pose measurements obtained by a single theodolite[C]//IEEE/RSJ Intelligent Robots and Systems, 1995: 329~334.

7 Besnard S, Khalil W. Calibration of parallel robots using two inclinometers[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999: 1 758~1 763.

8 Huang T, Chetwynd D G, Whitehouse D J, et al. A general and novel approach for parameter identification of 6-DOF parallel kinematic machines[J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 40(2): 219~239.

9 Yukio T, Gang S, Hiroaki F. DBB-based kinematic calibration method for in-parallel actuated mechanisms using a Fourier series[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2004, 126(5):856~865.

10 高建设. 新型五自由度并联机床驱动输入选择与运动学标定研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2006.

11 Everett L J. Forward calibration of closed-loop jointed manipulators[J]. The International Journal of Robotics Research, 1989, 8(4): 85~91.

12 Bennett D J, Hollerbach J M. Autonomous calibration of single-loop closed kinematic chains formed by manipulators with passive endpoint constraints[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(5): 597~606.

13 Wampler C W, Hollerbach J M, Arai T. An implicit loop method for kinematic calibration and its application to closed-chain mechanisms[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995, 11(5): 710~724.

14 Ryu J, Rauf A. A new method for fully autonomous calibration of parallel manipulators using a constraint link[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2001: 141~146.

15 Abtahi M, Pendar H, Alasty A, et al. Calibration of parallel kinematic machine tools using mobility constraint on the tool center point[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(5): 531~539.