

基于 6SPS 并联机构标定新方法*

New Calibration Methodology for 6SPS Parallel Mechanism

北京航空航天大学 周万勇 陈五一
 中航工业北京航空制造工程研究所 刘华东 李光丽
 中国航空遥感服务公司 贾云侠

[摘要] 系统研究 6SPS 并联机构标定的方法。研究中应用激光跟踪仪测量、基于并联机构正解和定位误差旋量的计算,正交试验进行试验设计,应用非线性最小二乘参数辨识。仿真验证辨识的几何误差可以等于假定值,试验验证位姿精度提高了 10 倍。

关键词: 并联机构 标定 误差旋量 测量噪声

[ABSTRACT] One calibration methodology for 6SPS parallel mechanism is systematically studied. The forward kinematics, positioning error screw are derived. According to the nonlinear least squares identification theory, the experiments are designed base on orthogonal test approach, and the laser tracker is utilized in the measurement. The simulations illustrate the feasibility of this method that the identified geometry error parameters coincide to their assumed values. Finally, the experiments are proceeded to demonstrate that this identification approach can increase the pose accuracy 10 times.

Keywords: Parallel mechanism Calibration Error screw Measuring noise

并联机构的标定技术是提高定位精度的重要手段。应用标定技术的前提条件是:并联机构的运动重复定位精度较好而定位精度不理想,即对于六轴并联机构,在设计和制造阶段要求并联机构的运动随机误差较小,如铰链间隙、杆件变形等应尽量得到控制;而并联机构的结构参数误差,如球铰链点的位置和连杆长度不必在设计制造阶段刻意要求精度,从而就大大降低了制造成本。并联机构结构参数误差,在应用前通过标定技术得到,将其代入控制系统中,达到消除系统误差的目的。

近 20 年以来,有许多研究者对 6SPS 并联机构的标定技术进行了研究^[1-3]。但由于并联机构工作空间小,使得标定出准确的结构参数误差成为难题。魏世民等^[4]对六轴并联机构运动精度进行了标定研究,标定的效果虽然提高了定位精度,但在标定算法仿真计算中,并没

有完全算回当初的假定值。此后,彭斌彬等^[5]研究并联机器人的标定建模,使用了非线性最小二乘法进行多次迭代,标定的效果又有了显著提高,但依然是近似解,得不到假定值。

本文研究受李新友等^[6]启发,结合陈义明等^[7]计算刚体位姿误差旋量的方法和非线性最小二乘法 3 项技术应用于并联机构标定,在标定算法仿真中,完全算回当初的假定值,试验验证定位精度提高了 10 倍。标定的过程一般包括系统建模、测量、参数辨识等步骤。

1 建模

六轴并联机构如图 1 所示,6 个三维参数动平台球铰链 A_i ,6 个三维参数定平台铰链 B_i ,6 个支链驱动长度 l_i ,总共 42 项几何参数 X_j 。动平台的位姿 g_j 用齐次坐标矩阵表示, j 表示指令号, $j=1,2,\dots,m$ 表示 m 组指令。

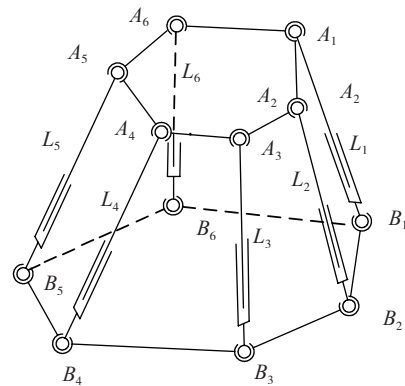


图1 6SPS并联机构

Fig.1 6SPS parallel mechanism

正交模型的输入为 $X_j=[l_j, A_x, A_y, A_z, B_x, B_y, B_z]$,输出为动平台的位姿^[8]:

$$g_j = F(X_j) \quad (j=1,2,\dots,m), \quad (1)$$

其中:

$$l_j = l_{j0} + \delta l,$$

$$A_x = A_{x0} + \delta A_x, A_y = A_{y0} + \delta A_y, A_z = A_{z0} + \delta A_z,$$

$$B_x = B_{x0} + \delta B_x, B_y = B_{y0} + \delta B_y, B_z = B_{z0} + \delta B_z.$$

$A_{x0}, A_{y0}, A_{z0}, B_{x0}, B_{y0}, B_{z0}$ 为名义结构参数, l_{j0} 为名

* 航空基金(20111625008)资助。

义驱动参数,这7个参数都是六维的。

42误差参数为 $\Delta X=[\delta l, \delta A_x, \delta A_y, \delta A_z, \delta B_x, \delta B_y, \delta B_z]$, 动平台的六维位姿误差旋量 $\Delta Y_j=[\delta \theta_j, \delta p_j]$, 其中, $\delta \theta_j$ 表示动平台姿态误差, δp_j 表示动平台位置误差。

$J(X)$ 是 6×42 雅可比矩阵^[9], 有:

$$\Delta Y_j = J(X_j) \Delta X \quad (2)$$

2 测量

本文中标定技术的试验是基于北京航空航天大学开发的6SPS并联机床,使用激光跟踪仪测量动平台上测量点的坐标(图2)。

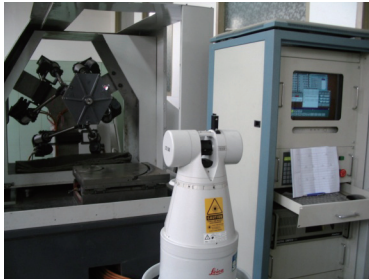


图2 并联机构和激光跟踪仪
 Fig.2 Parallel mechanism and laser tracer

根据同一组 n 个测量点,分别在动平台坐标系 Q_i 和静平台坐标系 P_i 的两组不同测量值,用矩阵奇异值分解 SVD 方法计算动平台位姿^[10]。

$$P_i = RQ_i + t \quad (i=1,2,\dots,n), \quad (3)$$

式中, R 为动平台坐标系在静平台坐标系上的姿态, t 为动平台坐标系在静平台坐标系上的位置。由 Q_i 、 P_i 两组点,可计算出动平台在静平台坐标系的位置 t 和姿态 R 。

3 参数辨识

3.1 定位误差螺旋

使用前文介绍的 SVD 方法可得到动平台实际位姿 $g_{aj} = F(l_{j0} + \delta l, A_0 + \delta A, B_0 + \delta B)$ 。这个位姿与动平台名义位姿 $g_{mj} = F(l_{j0}, A_0, B_0)$ 不一致的原因可以认为是由于结构参数误差造成的,小节介绍名义位姿与实际位姿的误差旋量计算。

基于李群和李代数的关系,动平台位姿误差旋量为^[7]:

$$\Delta Y_j = [\delta \theta_j, \delta p_j]^T = \log(g_{aj} g_{mj}^{-1}) = \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} (g_{aj} g_{mj}^{-1} - I_4)^k / k, \quad (4)$$

式中, ΔY_j 是六维误差旋量, k 是级数展开项系数编号。

3.2 非线性最小二乘估计

做了 m 组位姿的试验,由 m 个式(2)写成一个矩阵与向量乘积的形式: $\Delta Y = J \Delta X$,
 式中:

$J=[J_1, J_2, \dots, J_m]^T$ 为 $6m \times 42$ 维的雅可比矩阵, $\Delta Y=[\Delta Y_1, \Delta Y_2, \dots, \Delta Y_m]$ 为 $6m \times 1$ 维的定位误差。线性最小二乘估计为:

$$\Delta X = [(J^T J)^{-1} J^T] \Delta Y.$$

但计算精度较差。并联机构是非线性,本文使用迭代最小二乘估计,即是非线性最小二乘估计:

$$\Delta X_{k+1} = \Delta X_k + [(J(k)^T J(k))^{-1} J(k)^T] \Delta Y(k),$$

式中, k 是迭代次数。每次迭代,将新计算的结构误差代入并联机构的正解,并计算误差雅克比 $J(k)$ 和定位误差 $\Delta Y(k)$,确定迭代终止条件 $\|\Delta Y(k)\| < \varepsilon$,得到最佳的结构误差参数估计 ΔX_{k+1} 。

3.3 试验设计

并联机构的动平台在工作空间中作 8 水平 6 因素的正交试验(见表 1 和表 2),各因素行程尽量要大些,共产生 64 个位姿。用这些位姿去驱动并联机构使用激光跟踪仪测量每个位姿,并记录这 64 个位姿。这些位姿数据用齐次坐标矩阵表达,精度要求至少精确到 10^{-5} m 同时记录每个位姿对应的驱动参数,交给参数辨识程序处理。

表1 8水平6因素

水平	X/m	Y/m	Z/m	A/(°)	B/(°)	C/(°)
1	-0.08	-0.08	0.25	5	3	3
2	-0.06	-0.05	0.26	3	2	2
3	-0.04	-0.02	0.28	1	1	1
4	-0.02	0	0.3	0	0	0
5	0	0.02	0.31	-1	-0.5	-0.5
6	0.02	0.04	0.32	-2	-1	-1
7	0.04	0.06	0.34	-4	-2	-2
8	0.08	0.08	0.35	-5	-3	-3

表2 L64 (8⁶) 正交试验表

试验	X	Y	Z	A	B	C
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	3	4	5	6
3	1	3	5	7	6	8
4	1	4	7	6	2	3
5	1	5	6	2	8	4
6	1	6	8	3	4	7
7	1	7	2	8	3	5
8	1	8	4	5	7	2
9	2	1	4	3	6	5
10	2	2	2	2	2	2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
64	8	8	8	8	8	8

表3 假定机构误差和参数辨识结果对比

($10^{-5}m$)

	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6
假定机构误差	$(123,101,10)^T$	$(142,111,141)^T$	$(102,110,107)^T$	$(118,170,121)^T$	$(108,136,137)^T$	$(119,131,161)^T$
辨识出的误差	$(123,101,10)^T$	$(142,111,141)^T$	$(102,110,107)^T$	$(118,170,121)^T$	$(108,136,137)^T$	$(119,131,161)^T$
	ΔA_1	ΔA_2	ΔA_3	ΔA_4	ΔA_5	ΔA_6
假定机构误差	$(111,113,131)^T$	$(124,121,11)^T$	$(162,114,112)^T$	$(180,117,141)^T$	$(85,116,157)^T$	$(216,125,311)^T$
辨识出的误差	$(111,113,131)^T$	$(124,121,11)^T$	$(162,114,112)^T$	$(180,117,141)^T$	$(85,116,157)^T$	$(216,125,311)^T$
	ΔI_1	ΔI_2	ΔI_3	ΔI_4	ΔI_5	ΔI_6
假定机构误差	139	112	133	123	151	121
辨识出的误差	139	112	133	123	151	121

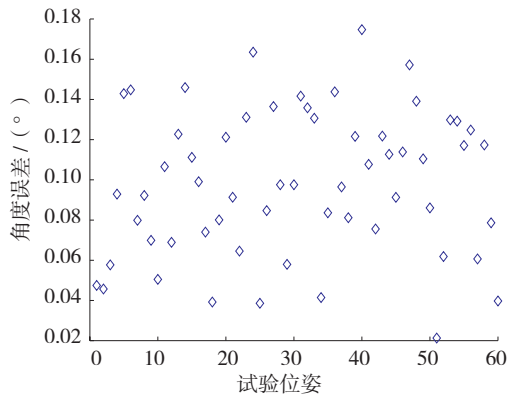


图3 标定前姿态角度误差

Fig.3 Orientation error before calibration

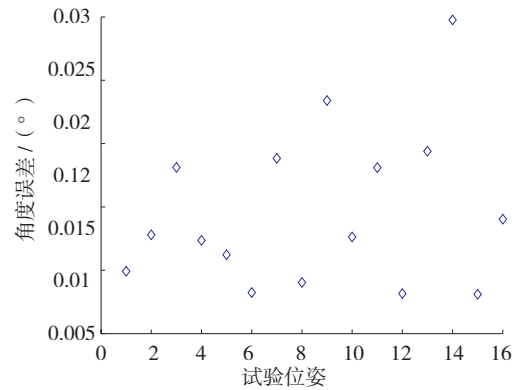


图5 标定后姿态角度误差

Fig.5 Orientation error after calibration

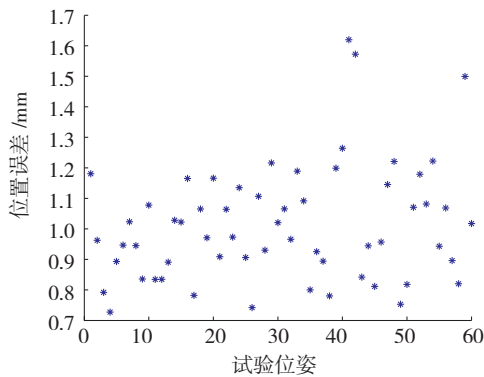


图4 标定前位置误差

Fig.4 Position error before calibration

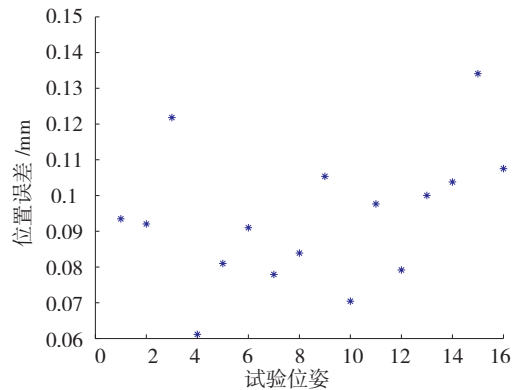


图6 标定后位置误差

Fig.6 Position error after calibration

4 仿真验证

为了验证方法,使用文献[4]中的数据。假定机构存在的几何误差如表3所示,测量系统的精度为 $10^{-5}m$ 和辨识参数。

文献[4]认为计算出的几何误差同42个假定值的差值看,并联机构的几何误差的计算值同假定值还有一定差距,即没有完全算回到当初的假定值。

本文得到一项突破是在几何假定误差和测量系统的精度为的情况下,几何误差的计算值等于假定值,这说明本文使用的标定方法精度高。

5 试验验证

位姿误差旋量 $\Delta Y=[\delta \theta, \delta p]^T$ 是六维向量,由于姿态误差向量 $\delta \theta=[\delta \theta_x, \delta \theta_y, \delta \theta_z]$ 分量的量纲是度,位置误差向量 $\delta p=[\delta P_x, \delta P_y, \delta P_z]$ 分量的量纲是米,量纲不一致。因此将 $\|\delta \theta\|$ 称为姿态误差, $\|\delta p\|$ 称为位置误差。标定前的姿态误差和位置误差由图3和图4表示,其中,横坐标是指令,纵坐标是相应的误差。

并联机构运动学参数辨识后,将控制器内名义参数替代为实际参数,达到辨识补偿的目的。比较标定前后

(下转第152页)

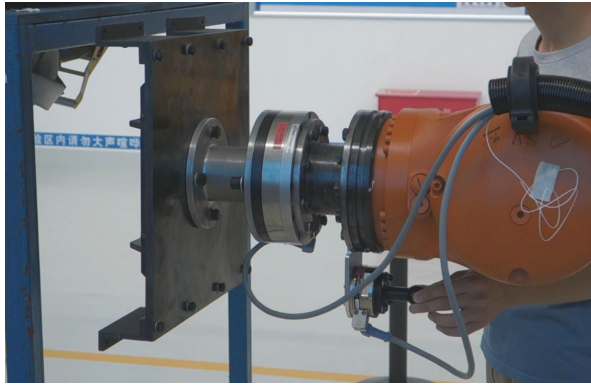


图13 小六维力传感器柔性力控

Fig.13 Flexible force control by small 6-axis force/torque sensor

(3N)较大数值,这样减小了惯性力对操作柔顺性的影响。

通过试验进行控制参数优化后,实现了全部4种控制模式的柔性力控,系统柔性操作体验良好,研究初步实现了设计的机械臂柔性力控功能。

4 结论

本文针对航天器装配的特点,研究一种机械臂的柔性力控方法,在机械臂末端安装六维力传感器感知作用其上的力与力矩信息,通过重力补偿消除负载重力的影响,得到外部作用的力/力矩信息作为输入控制机械臂运动,实现负载的柔性随动。根据航天器装配应用特点,采用大、小六维力传感器结合的方式进行柔性随动控制和碰撞检测,设计实现了“连续移动”、“连续转动”、“点动移动”、“点动转动”4种柔性随动控制模式。试验实现了设计的柔性随动与碰撞检测功能,对于重量为300N的负载,重力补偿误差达到3N以内,大六维力传感器动作外力阈值达到10N,外力矩阈值达到5Nm,小六维力传感器动作外力阈值达到1.5N,外力矩阈值达到0.5N·m。研究根据航天器装配的特点,初步实现了机械臂柔性力控功能,达到了良好的柔顺控制效果。

参考文献

- [1] 董晓星. 空间机械臂力柔顺控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [2] Vukobratovic M, Tuneski A. Contact control concepts in manipulation robotics-an overview. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1994, 41(2): 12-24.
- [3] Lee S. Shear control of elastomer shear pads for variable remote center compliance. Advanced Robotics, 2009, 23(1): 227-237.
- [4] 黄剑斌, 李志. 基于阻抗控制的空间机械臂接触控制与轨迹规划技术. 航天器工程, 2013, 22(4): 43-48.
- [5] Farooq M, Wang D B. Hybrid force/position control scheme

for flexible joint robot with friction between and the end-effector and the environment. International Journal of Engineering Science, 2008, 46: 1266-1278.

[6] Seraji H, Colbaugh R. Force tracking in impedance control. The International Journal of Robotics Research, 1997, 16(1): 97-117.

[7] Luo Y, Wang X D, Wang M X. A force/stiffness compensation method for precision multi-peg-hole assembly. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(1): 951-956.

[8] Bischoff R, Kurth J, Schreiber G, et al. The KUKA-DLR lightweight robot arm - a new reference platform for robotics research and manufacturing//Proceeding of the 41st International Symposium on Robotics. Munich: VDE, 2010: 1-8.

(责编 亿霖 深蓝)

(上接第146页)

的位置误差和姿态误差(图3~6),标定的效果明显,精度提高了10倍。

6 结论

(1)在仿真验证中辨识出的几何误差等于假定值,验证了本文提出算法的正确性。(2)试验验证位姿精度提高了约10倍,验证了本文提出算法的有效性。

参考文献

- [1] Masory O, Wang J, Zhuang H Q. On the accuracy of a Stewart platform (Part 2): Kinematic calibration and compensation// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York:IEEE, 1993:725-731.
- [2] 黄田, 汪劲松, David J W, 等. 并联构型装备几何参数可辨识性研究. 机械工程学报, 2002, 38(5): 1-6.
- [3] 裴葆青, 罗学科, 陈五一, 等. 6UPS并联机构静态误差的矢量法标定. 中国机械工程, 2006, 17(8): 854-857.
- [4] 魏世民, 周晓光, 廖启征. 六轴并联机床运动精度的标定研究. 中国机械工程, 2003, 14(23): 8-12.
- [5] 彭斌彬, 高峰. 并联机器人的标定建模. 机械工程学报, 2005, 41(8): 132-135.
- [6] 李新友, 陈五一, 韩先国. 基于正交设计的3-RPS并联机构精度分析与综合. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(8): 979-984.
- [7] Chen I M, Yang G L. Kinematic calibration of modular reconfigurable robots using product-of-exponentials formula. Journal of Robotic Systems, 1997, 14(11): 807-821.
- [8] 韩先国, 陈五一, 陈鼎昌. 基于路径跟踪原理求解6SPS并联机构位置正解. 北京航空航天大学学报, 2002(3): 370-372.
- [9] Hong L, Cong M, Hong C. Error analysis of parallel manipulators based on differential operators// Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun:IEEE, 2009.
- [10] Arun K S, Huang T S, Blostein S D. Least-squares fitting of two 3-D point sets. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(5): 698-700.

(责编 深蓝)