

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.04.012

平面四索驱动并联机构的零点标定方法

郭晓玲, 汤奥斐, 张 奔

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对一种 2 自由度的平面四索驱动并联机构的零点标定问题, 提出了一种基于非线性最小二乘法的标定数据处理方法。首先, 由运动学逆解模型建立四索驱动并联机构的零点误差模型, 然后通过最小二乘法对标定数据进行处理, 并给出了具体应用实例。实验结果表明, 该方法收敛速度快, 在误差允许的范围内能够高精度地辨识出动平台的零点位置, 进而为系统的实际控制和软件回零奠定了基础。

关键词: 索驱动并联机构; 误差模型; 最小二乘法; 零点标定

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2019)04-0479-05

Zero-point calibration method of a planar four-cable-driven parallel mechanism

GUO Xiaoling, TANG Aofei, ZHANG Ben

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the zero-point calibration of a 2-DOF planar four-cable-driven parallel mechanism, a calibration data processing method based on nonlinear least-squares method is proposed. First, the zero error model of the four-cable-driven parallel mechanism is established by the inverse kinematics model, with the calibration data processed by the least-squares algorithm and a specific application example given. The experimental results show that using the method has a fast convergence speed and can accurately identify the zero-point position of the moving platform within the allowable error range, laying a foundation for the actual control of the system and the return-to-zero of the software.

Key words: cable-driven parallel mechanism; error model; least-squares method; zero-point calibration

索驱动并联机器人是由柔索代替刚性连杆的一种新型并联机构, 具有工作空间大、承载能力强、累计误差小、易拆卸、可重构等优点, 在加工制造、航空航天、医疗机械等领域得到广泛应用^[1]。

定位精度是索驱动并联机器人的重要性能指标之一, 对于实现末端执行器的精确操作具有重要意义。索驱动并联机器人定位误差主要分为两类: 一类是系统误差, 如加工误差、装配误差、传动误差等; 另一类是随机误差, 如数字误差、环境误差、负载误差等。

研究表明, 几乎 95% 的机器人位置误差都是由

于机器人内部运动学模型不准确引起的^[2], 从而有必要对机器人进行运动学标定。

鉴于末端执行器所有的操作任务是相对于坐标系零点位置的相对运动, 零点位置的准确程度直接决定机器人的定位精度。因此, 减小零点误差对提高机器人定位精度具有重要意义。

目前, 对于零点误差, 国内外的解决方法主要有机械调整法和零点标定法两种。其中, 零点标定技术方面的研究较少, 大多仍停留在理论研究和实验阶段^[3]。Ding 等^[4]应用几何误差迭代及非线性拟合方法, 对一种 2 自由度并联机器人的零点误差进

收稿日期: 2019-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105303); 陕西省科技统筹创新工程重点实验资助项目(2014SZS10-K03); 陕西省自然科学基金资助项目(2017JM5008); 中国博士后基金资助项目(20110491673)

作者简介: 郭晓玲, 女, 硕士生, 研究方向为索驱动并联机构运动控制。E-mail: 1138140684@qq.com

通讯作者: 汤奥斐, 女, 副教授, 博士, 研究方向为机电系统建模、仿真与控制。E-mail: aofeitang@163.com

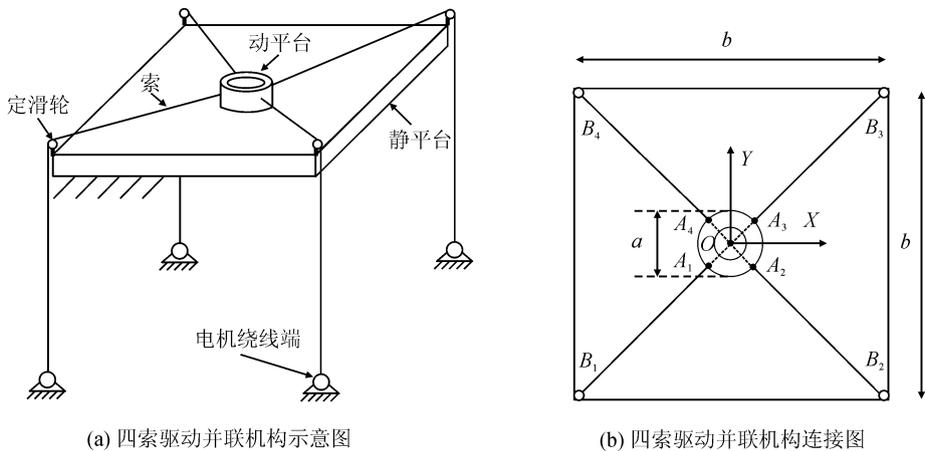
行了辨识;郭云鹏等^[5]运用空间矢量法建立了6自由度并联平台的零点误差模型,借助激光跟踪仪完成零点标定,提高了精度;隋春平等^[6]以Delta并联机器人为例,提出一种基于视觉测量的零点标定方法;梅江平等^[7]针对一种4自由度高速并联机器人Cross-IV的零点标定问题,提出了一种基于末端转角误差信息的快速零点标定方法。

本文针对平面四索驱动并联机构,提出一种简单快速的零点标定方法,首先根据运动学逆解建立零点误差模型并建立目标函数;然后通过直角尺、千分表、磁力表座等标准量具采集测量点的坐标;接着,利用非线性最小二乘法对实验数据进行处理,完成零点标定,并对实验结果进行分析。

1 误差模型

1.1 结构模型

四索驱动并联机构的结构示意图如图1(a)所示,该机器人系统由四个位于地面的电机同时驱动四个独立的卷索机构,每个卷索机构上的柔索通过架设在静平台四个顶点上的定滑轮牵引动平台运动。四索驱动并联机构的连接图如图1(b)所示,其中,全局坐标系为 $O-XY$,其原点位于矩形 $B_1B_2B_3B_4$ 的中点, OX 方向为水平方向, OY 方向为竖直方向;



(a) 四索驱动并联机构示意图

(b) 四索驱动并联机构连接图

图1 四索驱动并联机构结构简图

Fig. 1 Structure diagram for four-cable-driven parallel mechanism

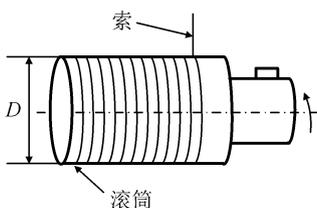


图2 滚筒结构简图

Fig. 2 Roller structure diagram

局部坐标系为 $O'-X'Y'$,其原点位于动平台的中心点,当动平台位于矩形 $B_1B_2B_3B_4$ 的中点时,局部坐标系与全局坐标系重合。

索与定滑轮的切点为 $B_i (i=1,2,\dots,4)$,索与动平台的连接点为 $A_i (i=1,2,\dots,4)$,已知模型参数 $a=50\text{ mm}$, $b=1\ 120\text{ mm}$ 。

由矢量封闭原理得,四索驱动并联机器人的索长 $L_i (i=1,2,\dots,4)$ 为:

$$L_i = | \mathbf{OB}_i - \mathbf{OA}_i | \quad (1)$$

式中:在全局坐标系 $O-XY$ 下, \mathbf{OB}_i 为柔索与静平台连接点的位置矢量; \mathbf{OA}_i 为柔索与动平台连接点的位置矢量。

此外,四根索的初始索长分别为 L_{01} 、 L_{02} 、 L_{03} 、 L_{04} 。卷索机构中的滚筒结构简图如图2所示。

已知电机旋转一圈对应的脉冲数 $M=8\ 192$,滚筒直径 $D=50\text{ mm}$,则一个脉冲对应的索长 $L_M = \pi D / 8\ 192 = 0.02\text{ mm}$ 。因此,四根索的索长变化量 ΔL_i 便可由脉冲变化 ΔM_i 求得:

$$\Delta L_i = L_M \times \Delta M_i (i=1,2,\dots,4) \quad (2)$$

则索长 L_i 为:

$$L_i = L_{0i} + \Delta L_i = L_{0i} + L_M \times \Delta M_i (i=1,2,\dots,4) \quad (3)$$

1.2 误差模型

四索驱动并联机构要实现精确控制,首要问题就是找到初始零点的准确位置。

设全局坐标系 $O-XY$ 的原点 $O(x_0, y_0)$ 为初始零点,为了找到它的准确位置,现对其进行标定。

首先,建立如图3(a)所示的测量坐标系 $O'-X'Y'$ 。

其次,如图3(b)所示,全局坐标系 $O-XY$ 下的

原点 O 在测量坐标系 $O'-X'Y'$ 下的位置为 (x_0, y_0) , 在局部坐标系下原点 O' 的位置为 (x'_0, y'_0) (字母带撇为局部坐标, 字母未带撇为全局坐标), 设测量点 P 的个数为 N , 将动平台分别移动至各个测量点 P 处, 并记录测量坐标系 $O'-X'Y'$ 下测量点 P 的局部坐标 $P'_j(x'_j, y'_j)$ ($j=1, 2, \dots, N$)。

最后, 通过坐标转换将测量点 P 的坐标从测量坐标系 $O'-X'Y'$ 转换到全局坐标系 $O-XY$ 下, 即 $x_j = x_0 + x'_j, y_j = y_0 + y'_j$, 则式(1)可以改写为:

$$L_{i,j} = | \mathbf{OB}_i - \mathbf{OA}_{i,j} | \quad (4)$$

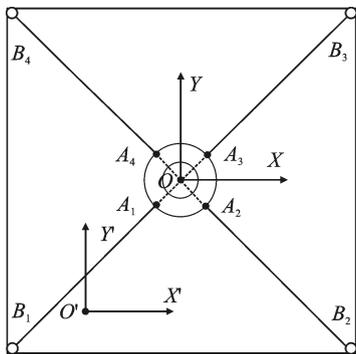
$(i = 1, 2, \dots, 4; j = 1, 2, \dots, N)$

式中, $\mathbf{OA}_{i,j}$ 为第 j 次测量时柔索与动平台连接点的第 i 根索位置矢量。

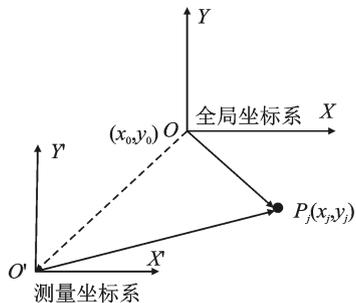
式(4)中方程组的个数为 $4N$, 其中包含 $2N+4$ 个未知量。若方程有解, 根据方程个数和解的关系有 $4N \geq 2N+4$, 即 $N \geq 2$, 因此测量点的个数至少为 2。式(3)相应改写为:

$$L_{i,j} = L_{0i} + \Delta L_{i,j} = L_{0i} + L_M \times \Delta M_{i,j} \quad (5)$$

$(i = 1, 2, \dots, 4; j = 1, 2, \dots, N)$



(a) 测量原理图



(b) 坐标变换图

图 3 零点标定示意图

Fig. 3 Diagram for zero-point calibration

由式(4)和式(5)可得, 目标函数索长误差 E :

$$E = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^4 (| \mathbf{OB}_i - \mathbf{OA}_{i,j} |^2 - L_{i,j}^2) \quad (6)$$

2 误差测量

测量时, 首要问题是确定测量坐标系的基准轴线, 才能保证测量数据的准确。本文利用标准直角尺的两条相互垂直的边来确定测量坐标的轴系, 如图 4 所示。

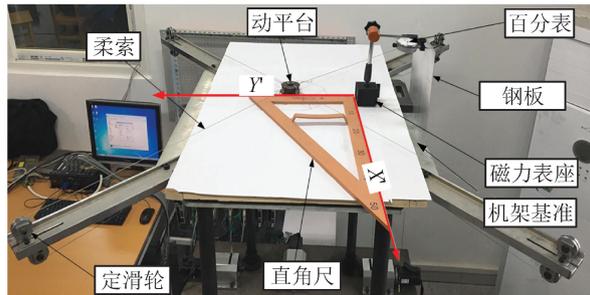


图 4 测量坐标系的选择

Fig. 4 Selection of measurement coordinate system

前期准备工作:

1) 因为静平台加工精度高, 故选择静平台上与全局坐标系 X 轴平行的边作为测量坐标系 X' 轴的基准, 在基准面处固定一块与 XOY 平面垂直且与 X 轴平行的钢板;

2) 标准量具磁力表座的底面平面度较高, 沿着直角尺一条直角边滑动, 磁力表座上的百分表与钢板接触。

具体操作为:

首先, 使直角尺与 X 轴平行的一条边与磁力表座紧密接触;

然后, 记录磁力表座沿着直角尺的直角边滑动过程中百分表的读数, 即间接获得直角尺与基准面的偏差, 由于本文的测量精度为 0.1 mm, 故在滑动过程中百分表显示的偏差在 0.1 mm 以内视为定位准确;

接着, 不断调整直角尺的位置, 磁力表座在 400 mm (最大实验值) 之内移动的过程中, 其百分表的读数偏差在 0.1 mm 以内, 即说明直角尺一条直角边所在位置为测量坐标系的 X' 轴, 且与参考基准面平行;

同时, 由于直角尺为标准量具, 直角尺的另一直角边确定为测量坐标系的 Y' 轴, 此时, 直角尺两条边便组成了测量坐标系 $O'-X'Y'$ [8]。

确定好测量坐标系的位置后, 选取测量点的位置。根据 1.2 节所述, 测量点的个数至少大于 2, 本文选取测量点的个数为 10 个, 即 $N=10$ 。先将动平台移动到零点并记录此时在测量坐标系下零点的位置 $P'_0(x'_0, y'_0)$ 。接着, 通过控制软件控制动平台使其分别移动至不同的测量点, 并记录测量点在测

量坐标系下的局部坐标位置 $P'_j(x'_j, y'_j)$ ($j=1, 2, \dots, N$)以及脉冲变化量 ΔM_i ($i=1, 2, \dots, 4$), 测得

的实验数据如表 1 所示, 其中索长变化量 $\Delta L_{i,j}$ ($i=1, 2, \dots, 4; j=1, 2, \dots, 10$) 由式(2)换算得到。

表 1 零点标定实验数据

Tab. 1 Experiment data from zero-point calibration

| 测量点数 j | 测量点 P_j 的局部坐标 / mm | | 索长变化量 / mm | | | |
|----------|----------------------|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | x'_j | y'_j | $\Delta L_{1,j}$ | $\Delta L_{2,j}$ | $\Delta L_{3,j}$ | $\Delta L_{4,j}$ |
| 1 | -46.9 | 11.0 | 7.133 0 | -7.056 3 | -7.056 3 | 7.133 0 |
| 2 | -36.8 | 11.1 | 14.266 0 | -14.035 9 | -14.035 9 | 14.266 0 |
| 3 | -26.7 | 11.1 | 21.475 7 | -27.765 0 | -27.765 0 | 21.475 7 |
| 4 | -16.6 | 11.2 | 28.762 1 | -27.765 0 | -27.765 0 | 28.762 1 |
| 5 | -6.8 | 11.3 | 36.125 2 | -34.514 5 | -34.514 5 | 36.125 2 |
| 6 | 3.2 | 11.5 | 43.565 0 | -41.187 3 | -41.187 3 | 43.565 0 |
| 7 | 14.5 | 11.9 | 51.004 8 | -47.783 5 | -47.783 5 | 51.004 8 |
| 8 | 25.5 | 12.0 | 58.521 3 | -54.302 9 | -54.302 9 | 58.521 3 |
| 9 | 36.0 | 12.0 | 66.114 5 | -60.745 6 | -60.745 6 | 66.114 5 |
| 10 | 46.4 | 12.2 | 73.707 7 | -67.111 6 | -67.111 6 | 73.707 7 |

3 参数识别与误差补偿

测量点的坐标采集后, 运用最小二乘法进行数值计算, 求出满足式(6)目标函数的最优解。求解过程中, 先求解出目标函数的雅克比矩阵, 再使用迭代法求出零点位置。

现将静平台和动平台坐标代入式(6)中求出第 i 根索索长误差, 则式(6)变为:

$$E_i(x, y) = (b_{ix} - a_{ix} - x)^2 + (b_{iy} - a_{iy} - y)^2 \quad (i = 1, 2, \dots, 4) \quad (7)$$

式中: b_{ix}, b_{iy} 为第 i 根索与静平台连接点的坐标; a_{ix}, a_{iy} 为第 i 根索与动平台连接点的坐标; x, y 为动平台 P 的坐标位置。

对式(7)求其雅克比矩阵:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_i}{\partial x} \\ \frac{\partial E_i}{\partial y} \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} x + b_{ix} - a_{ix} \\ y + b_{iy} - a_{iy} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, 4) \quad (8)$$

由于最小二乘法一般对初值的选取要求较高, 这里选择零点附近的值作为初值, 即动平台零点在测量坐标系下的初值 P_0 坐标为: $x_0 = -85.0$ mm, $y_0 = 38.0$ mm; 初始索长(即标定零点位置对应的索长)为: $L_{01} = L_{02} = L_{03} = L_{04} = 756.60$ mm。

接着, 将第 j 次测量的坐标值代入运动学逆解模块, 将坐标位置转化为索长求出期望索长 L_{Ej} ; 然后, 再利用编码器记录下的索长变化量, 由式(5)计算出实际索长 L_{Rj} ; 最后, 计算所有测量点期望索长 L_{Ej} 和实际索长 L_{Rj} 的误差平均值 \bar{E} :

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |L_{Ej}^2 - L_{Rj}^2| \quad (9)$$

给定迭代收敛精度 $\epsilon = 10^{-3}$ mm, 若存在:

$$|\bar{E}| < \epsilon \quad (10)$$

则满足收敛条件, 否则继续迭代, 迭代增量为:

$$\Delta P = -J^+ F \quad (11)$$

$$P_{k+1} = P_k + \Delta P \quad (12)$$

式中: F 为外力螺旋; P_k 为第 k 次迭代的坐标, k 的取值由式(10)的迭代结果确定; $J^+ = (J^T J)^{-1} J^T$ 。

标定算法的计算过程如图 5 所示, 其为第 i 根索最小二乘法标定流程图。

通过上述方法, 经 4 次(索编号 i 分别取 1, 2, 3, 4) 计算后, 标定后的零点坐标为: $x_0 = -82.94$ mm, $y_0 = 38.89$ mm。

根据上述标定方法求得索长的平均位置误差 \bar{E} , 如图 6 所示, 随着迭代次数不断增加, \bar{E} 逐渐减小并趋于收敛, 并小于给定的收敛精度 ϵ ; \bar{E} 逐渐减小说明越来越接近期望索长。

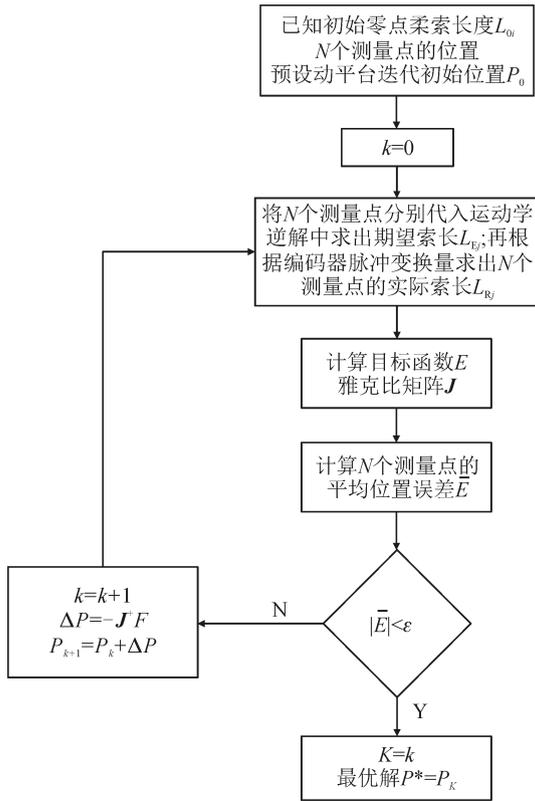


图 5 最小二乘法标定

Fig. 5 Least-squares calibration method

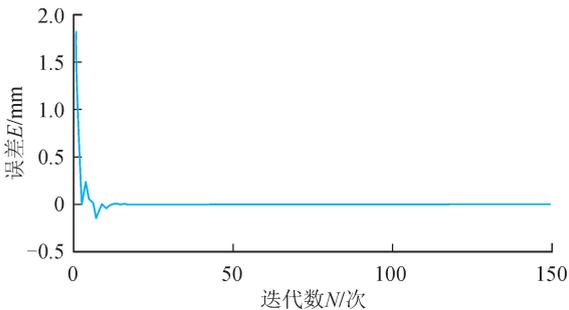


图 6 迭代计算误差

Fig. 6 Iterative calculation error

4 结 语

在此标定实验中,计算出来的标定结果证明了本文所述的零点标定方法是有效的,若能采取更精确的测量工具,则能进一步提高收敛精度。当迭代次数 $N=3$ 时,已经达到局部收敛。 $N=9$ 时 \bar{E} 为 0,第一次达到全局收敛。故此,使用这种标定方法将能达到更高的精度。

参考文献:

[1] 武云飞,汤奥斐,郭晓玲,等. 四索驱动并联机构的模态实验[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(1): 99-103.

- WU Yunfei, TANG Aofei, GUO Xiaoling, et al. Model testing of four-wire driven parallel mechanism [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(1): 99-103.
- [2] 任永杰,郑继贵,杨学友,等. 利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 195-200.
- REN Yongjie, ZHU Jigui, YANG Xueyou, et al. Method of robot calibration based on laser tracker[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 195-200.
- [3] 薛娜. 基于伸缩测量尺的 Diamond 机器人零点标定方法研究[D]. 天津:天津大学, 2015.
- XUE Na. Measure ruler based home position calibration of a diamond robot[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [4] DING Q Y, SUN L N, JI J H, et al. Calibration of a 2-DOF planar parallel robot: home position identification and experimental verification [C]// Mechatronics and Automation, IEEE International Conference, 2005.
- [5] 郭云鹏,陈柏,吴洪涛. 一种六自由度海浪模拟并联平台的零点标定与性能评估[J]. 机电工程, 2015, 32(2): 169-174.
- GUO Yunpeng, CHEN Bai, WU Hongtao. Zero calibration and performance assessment of a 6-DOF parallel platform used for wave simulation [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(2): 169-174.
- [6] 隋春平,赵明扬. 3 自由度并联柔索驱动变刚度操作臂的刚度控制[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 205-210.
- SUI Chunping, ZHAO Mingyang. Statics and stiffness study on a 3-DOF parallel wire driven flexible manipulator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(6): 205-210.
- [7] 梅江平,贺媛,臧家炜. 基于末端转角误差的并联机器人零点标定方法[J]. 机器人, 2018, 40(5): 685-692, 703.
- MEI Jiangping, HE Yuan, ZANG Jiawei. Home position calibration of parallel robot based on the rotary angle errors of end-effector[J]. Robot, 2018, 40(5): 685-692, 703.
- [8] 武云飞. 四索驱动并联机构控制系统设计与轨迹跟踪实验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- WU Yunfei. Control system design and trajectory tracking experimental study of four wire driven parallel mechanism[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.

(责任编辑 周 蓓)