

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.07.021

机器人零位参数辨识及标定应用研究*

陈 红¹, 孙学娟², 龚 勋²

(1. 天津滨海汽车工程职业学院 计算机系, 天津 300352;

2. 天津中德应用技术大学 机械工程学院, 天津 300350)

摘要:针对机器人定位误差问题,分析了机器人零位辨识法和几何法的算法原理,在已有零位标定方法的基础上提出了一种新的零位标定方法。基于双轴倾角传感器进行了倾角测量,通过仪器的两次安装和对机器人的简便操作后,完成了整个零位标定过程;给出了新标定方法所涉及的参考零位和2轴零位获取方法及3~6轴零位辨识方法两大关键问题的理论依据,对辨识过程进行了仿真,并对新的标定方法进行了实验验证。实验结果表明:所提出的零位标定方法可大幅降低机器人的定位误差,基于本方法进行零位标定具有设备部署方便、成本低和流程简便等优点,值得在工程应用上进行推广。

关键词:工业机器人;标定设备;零位标定;零位模型

中图分类号:TP242.6+2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)07-0766-05

Robot zero parameter identification and calibration application

CHEN Hong¹, SUN Xue-juan², GONG Xun²

(1. Computer Science Department, Tianjin Binhai Vocational Institute of Automotive Engineering,

Tianjin 300352, China; 2. School of Mechanical Engineering, Tianjin Sino-German

University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China)

Abstract: Aiming at the problem of robot positioning error, the algorithm principle of robot zero position identification method and geometric method was analyzed, and a new zero calibration method was researched systematically based on the existing zero-calibration methods. The inclination measurement was based on the bi-axial inclination sensor, and the entire zero calibration process was completed by two installations of the instrument and simple operation of the robot. A new calibration method for the reference zero and access method of the 2nd axis and zero identification method of the remaining axes was presented, the theoretical basis of the two key problems of identification process were simulated. The new calibration method was verified by the experiments. The experimental results indicate that the proposed zero calibration method can greatly reduce the positioning error of the robot, the cost of zero calibration based on this method is relatively low, and it is worthy of promotion in engineering applications.

Key words: industrial robot; calibration equipment; zero calibration; zero model

0 引 言

在未对机器人进行参数辨识前,机器人的零位误差在整机定位误差的比重高达97%,因此进行其他参数辨识工作前应首先进行零位参数辨识^[1]。当前的

机器人零位标定方法主要可分为两类,一类是通过算法辨识的方法,即首先建立零位误差的误差模型,再借助外界测量设备或几何约束关系对误差进行离线或在线辨识^[2];另一类零位标定方法是通过机器人处于零位值时的几何关系(水平或垂直)确定零位值,这类方

收稿日期:2019-01-23

基金项目:天津市自然科学基金资助项目(08281418446371)

作者简介:陈红(1982-),女,辽宁沈阳人,硕士,讲师,主要从事控制工程等方面的研究。E-mail:chenhongni234fix@126.com

法可以归结为几何法。以上两种方法中,前一种方法虽然精度较高,但鉴于操作过程繁复、测量设备昂贵等方面的原因一般用于科研活动中;后一种方法则因为原理简单、方法实用,已被机器人制造商广泛采用^[3]。虽然后一种方法操作简便,但需要事先对机器人的定位孔或定位面进行加工,并制造出相应的辅助工装夹具,且校准过程需要各轴逐次校准,每校准一次均需安装相应的夹具(一般6自由度的机器人需要安装6次,至少需要4次),校准时需要不断调整机器人关节,整个过程十分耗时且精度远不及前一种方法^[4]。

结合前述两种标定方法的优点,本文将回避传统算法辨识方法操作繁琐、测量设备昂贵等缺点(主要依靠激光跟踪仪设备,激光跟踪仪市场价一百万左右,不适合广泛推广)^[5],并避免因几何零位标定方法需要在本体上加工定位孔和定位面,从而带来的一系列加工问题。

本文将提出一种基于双轴倾角传感器的零位标定新方法,通过进行两次仪器安装及人工操作来实现整个机器人的零位标定(轴孔标定)。

1 零位标定的对象、目的及方法概述

1.1 标定平台概述

以机器人及双轴倾角传感器安装示意如图1所示。

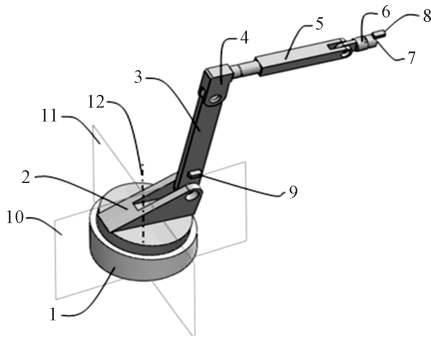


图1 机器人及双轴倾角传感器安装示意图

1—底座;2—1轴;3—2轴;4—3轴;5—4轴;6—5轴;7—6轴;8—倾角传感器;9—倾角传感器;10—参考面a;11—参考面b;12—与重力线平行的虚线

从图1中可以看出:机器人本体通过底座安装在工作台上,底座以上依次串联着机器人的1~6轴,各轴通过旋转关节联接。机器人安装后,由于无法保证工作台处于绝对水平的位置,可以认为机器人底座总是处于倾斜状态安装的。为定量表示机器人底座的倾斜程度,假设虚线与重力线方向平行,参考面(a)通过虚线且与1轴和2轴之间的旋转关节轴线平行,参考面(b)通过虚线且与参考面(a)垂直。分别以参考面

(a)和参考面(b)为投影面,即可确定到机器人底座与水平面两个方向存在的夹角。

1.2 零位标定方法

所谓机器人零位值,是由机器人处于运动学建模初始状态时的各关节角度值组成的^[6]。机器人是以运动学正反解运算为基础进行姿态定位的。若零位值存在偏差,机器人的绝对精度必然降低^[7]。因此,必须通过标定的方法尽量减小零位偏差。由于机器人运动学建模时约定将初始位姿建立在各轴处于相对垂直或水平的位置,这就为使用倾角传感器进行零位标定提供了可能。

使用倾角传感器进行零位标定首先必须保证传感器的正确安装^[8-9]。

机器人及倾角传感器的坐标系建立示意如图2所示。

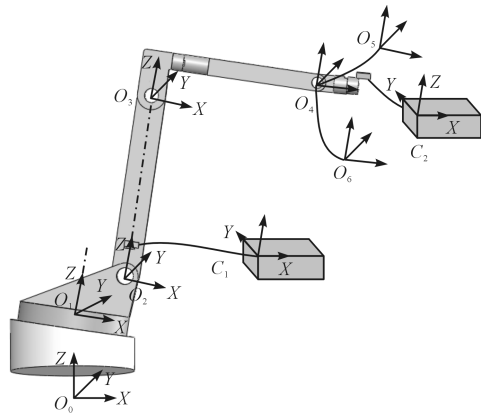


图2 机器人及倾角传感器的坐标系建立示意图

C_i —传感器坐标; O_i —机器人工作台坐标系

图2给出了新方法中倾角传感器坐标系 C_1 和 C_2 与机器人工作台坐标系 O_0 以及机器人各轴坐标系 $O_1 \sim O_6$ 的相对关系。其中 O_0 坐标系的Z轴与虚线(12)平行,X轴则垂直于参考面,Y轴遵循右手定则确定;坐标系 $O_1 \sim O_6$ 则是运动学建模时产生的坐标系(可参考DH法建立);坐标系 C_1 与 O_2 平行,坐标系 C_2 与 O_6 平行。

传统的基于双轴倾角传感器的机器人零位标定方法首先将1轴调整至零位,然后将倾角传感器安装在1轴(或底座上),使传感器坐标系与底座坐标系保持平行,从而由传感器读数得到当前1轴坐标系 O_1 与工作台坐标系 O_0 之间的X轴和Y轴偏角,并以此设为参考零点(Zero Reference),即倾角传感器设零。再将倾角传感器依次安装在2、4、6轴,调整其他各轴的零位,需进行4次安装操作,若是单轴倾角传感器则需要进行6次安装操作。

与传统标定方法相比,本文提出的新零位标定方法首先将双轴倾角传感器按图 1 所示安装在 2 轴上,并保持 C_1 坐标系与 O_2 坐标系的平行关系,通过控制 1、2 轴运动同时获得机器人底座的一个倾斜角(即参考零位)和 2 轴的零位角;然后将双轴倾角传感器安装在 6 轴上,保持 C_2 坐标系与 O_6 坐标系的平行关系,通过辨识的方法获得 3~6 轴的零位。因此,该方法需要解决两个关键问题,一是参考零位及 2 轴零位的获取问题,二是 3~6 轴零位的辨识问题。

2 零位参数辨识

2.1 参考零位及 2 轴零位的获取

参考零位角实质是机器人基坐标系 O_1 与工作台坐标系 O_0 之间的分别沿 X 轴和沿 Y 轴的夹角,设沿 X 轴夹角为 α ,沿 Y 轴夹角为 β 。

机器人参考零位获取简视图如图 3 所示。

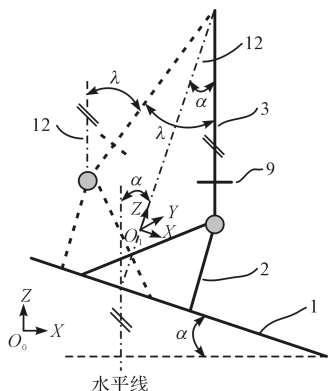


图 3 机器人参考零位获取简视图

1—底座;2—1 轴;3—2 轴;9—倾角传感器;12—与重力线平行的虚线

从图 3 可以看出:参考零位为 1 轴处于零位时,机器人按正视图 9 进行投影。在此方向,将大臂调整到竖直状态(此时倾角传感器 9 的 X 向读数应为 0° , Y 向读数与 β 相等)。此时若锁定 2~6 轴,并将机器人 1 轴旋转 180° ,处于新位置的大臂(虚线部分)与重力方向(或原大臂方向)的夹角为 λ (根据倾角传感器的 X 向读数确定),由转动前后的几何关系可得:

$$\lambda = 2\alpha \quad (\lambda \text{ 和 } \alpha \text{ 方向相同}) \quad (1)$$

由此可知,当 1 轴处于零位,2 轴处于 $-\lambda/2$ 时,机器人的 2 轴处于零位值,也是双轴倾角传感器的参考零位。

2.2 3~6 轴零位的辨识

获得倾角传感器的参考零位后,将其按放置在 6 轴上,并保持坐标系 C_2 与 O_6 平行。坐标系 O_6 与 O_3 的

转动关系可由 3×3 的旋转矩阵 R_6^3 表示, R_6^3 则可通过 3~6 轴的旋转变换得到:

$$R_6^3 = Rot_x(\theta_3)Rot_y(\theta_4)Rot_x(\theta_5)Rot_y(\theta_6) \quad (2)$$

另一方面,描述倾角传感器相对于机器人基座的坐标变换关系也可直接通过 RPY 角的旋转变换来实现,即先绕 O_3 坐标系的 X 轴旋转 γ 角,再绕 O_3 坐标系的 Y 轴旋转 β 角,再沿 O_3 坐标系的 Z 轴旋转 α 角,如下式所示:

$$R_{C2}^3 = Rot_Z(\alpha)Rot_Y(\beta)Rot_X(\gamma) \quad (3)$$

其中, γ 和 β 显然对应倾角传感器绕 X 轴方向的读数以及绕 Y 轴方向的读数,由倾角传感器与机器人的坐标关系知:

$$R_6^3 = R_{C2}^3 \quad (4)$$

假设 $\beta \neq \pm 90^\circ$,则由下式可求得 RPY 角的正切关系式:

$$\begin{cases} \beta = \text{atan2}(-r_{31}, r_{11} \cos \alpha + r_{21} \sin \alpha) \\ \gamma = \text{atan2}(r_{13} \sin \alpha - r_{23} \cos \alpha, r_{22} \cos \alpha + r_{12} \sin \alpha) \end{cases} \quad (5)$$

式中: r_{mn} —矩阵 R_6^3 的第 m 行 n 列元素。

当 $\beta = \pm 90^\circ$ 时,式(5)的解出现退化现象,仅能解出 α 和 γ 的和或差,由于倾角传感器量程的限制(倾角传感器量程小于 90°), β 在倾角传感器量程范围之内,保证了式(5)存在唯一解。

已知机器人 3~6 轴关节值后,根据式(5)可计算出机器人倾角传感器 C_2 与 O_3 的 X 轴夹角 γ_i 以及 Y 轴夹角 β_i 。由于机器人零位误差的存在,倾角传感器 X 轴方向读数 γ_r 和 Y 轴方向读数 β_r 分别与 γ_i 和 β_i 存在误差 $\Delta\gamma$ 和 $\Delta\beta$,忽略其他误差,可表示为下式:

$$\begin{cases} \Delta\gamma = \gamma_i - \gamma_r = \frac{\partial\gamma}{\partial\theta} \Delta\theta \\ \Delta\beta = \beta_i - \beta_r = \frac{\partial\beta}{\partial\theta} \Delta\theta \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{其中, } \frac{\partial\gamma}{\partial\theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\gamma}{\partial\theta_3} & \frac{\partial\gamma}{\partial\theta_4} & \frac{\partial\gamma}{\partial\theta_5} & \frac{\partial\gamma}{\partial\theta_6} \end{bmatrix}, \frac{\partial\beta}{\partial\theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\beta}{\partial\theta_3} & \frac{\partial\beta}{\partial\theta_4} & \frac{\partial\beta}{\partial\theta_5} & \frac{\partial\beta}{\partial\theta_6} \end{bmatrix}, \Delta\theta = [\Delta\theta_3 \quad \Delta\theta_4 \quad \Delta\theta_5 \quad \Delta\theta_6]^T.$$

为准确获得 $\Delta\theta$,需要进行 N 次测量($N \gg 4$,在第 i 次($i = 1, \dots, N$) 测量中,令 $J_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial\beta}{\partial\theta} & \frac{\partial\gamma}{\partial\theta} \end{bmatrix}^T, \Delta\rho_i = [\Delta\beta_i \quad \Delta\gamma_i]^T$,可推知:

$$\Delta\rho_i = J_i \Delta\theta \quad (7)$$

进行 N 次测量后,令 $J = [J_1 \quad L \quad J_N]^T, \Delta\rho = [\Delta\rho_1 \dots \Delta\rho_N]^T$ 。

利用最小二乘法,可求得 2~6 轴零位误差:

$$\Delta\theta = (J^T J)^{(-1)} J \Delta\rho \quad (8)$$

3 零位标定仿真及实验

3.1 轴销实验

对了和本文的算法进行比较验证,笔者首先对机器人用轴销对机器人进行标定,采集其码盘值和理论值的角度,机器人的参考零位标准值如表(1,2)所示。

表1 轴销标定码盘值

1轴	2轴	3轴	4轴	5轴	6轴
2 870	2 689	3 007	3 828	2 248	3 865

表2 标定理论角度

1轴/ (°)	2轴/ (°)	3轴/ (°)	4轴/ (°)	5轴/ (°)	6轴/ (°)
0.319	4.149	-73.287	0	12.564	0.319

理论计算值与轴销标定对比如表3所示。

表3 理论计算值与轴销标定值对比

关节轴	理论计算值/(°)	轴销标定值/(°)
1轴	0.319	0.341
2轴	-4.149	-3.670
3轴	-73.287	-73.249
4轴	0	0.216
5轴	12.564	-12.439
6轴	0.319	-2.575

从表3可以看出:机械计算角度数值和机器人实际角度值差距很大。由于其机器人加工技术和装配技术,导致机器人实际的零位值与理论值不能一致。

3.2 零位辨识测试流程

为验证本文提出算法的可行性,假设双轴倾角传感器的测量范围为 $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$,随机选取机器人倾角传感器量程范围内的30个位姿,由于倾角传感器的测量误差为 0.001° ,考虑到其他误差的干扰,仿真中加入 $\pm 0.002^{\circ}$ 的随机误差,辨识误差在 $\pm 0.01^{\circ}$ 范围内。

机器人3~6轴辨识仿真结果如表4所示。

表4 机器人3~6轴辨识仿真结果

辨识参数	预设误差 /(°)	辨识误差 /(°)	辨识误差 - 预设误差/(°)
$\Delta\theta_3$	0.050	0.053 4	0.003 4
$\Delta\theta_4$	0.060	0.058 3	-0.001 7
$\Delta\theta_5$	-0.040	-0.043 5	-0.003 5
$\Delta\theta_6$	0.070	0.071 8	-0.001 8

标定前,靠人工对机器人进行零位校准,并对机器人进行绝对定位精度测试,测试中随机选择分布在机器人整个工作空间的200个点,使用激光跟踪仪测量机器人在标定前后的三维位置定位精度。在实验中遵循测试流程,即:

(1)调整机器人1轴至初始位置,并在机器人2

轴上安装双轴倾角传感器,安装时使倾角传感器的X轴及Y轴分别与机器人2轴建模坐标系的X轴和Y轴平行;

(2)调整机器人的2轴使其坐标系的X轴至水平状态,即使双轴倾角传感器的X轴显示为0,并记录Y轴的读数 β ;

(3)锁定机器人2~6轴,将机器人1轴从初始位置转动 180° ,记录双轴倾角传感器X轴的读数 λ ;

(4)将机器人1轴返回至初始位置,2轴移动至 $\alpha = \lambda/2$ 角位置,将此位置设为双轴倾角传感器的参考零位;

(5)将双轴倾角传感器安装在机器人6轴法兰上,安装时保证倾角传感器的X轴及Y轴与机器人6轴建模坐标系的X轴和Y轴之间的平行关系;通过参数辨识的方法获得3~6轴的零位误差;

(6)利用步骤1~5获得的机器人零位偏差 $\Delta\theta_1 \sim \Delta\theta_6$ 对机器人进行零位补偿,完成标定。

零位标定实验流程如下:操作机器人1轴转动至零位;安装倾角传感器至2轴,操作2轴使传感器X向为零;操作机器人1轴进行180度旋转,获取2轴零位夹角 α ;机器人1、2轴调至零位,将传感器当读数设为参考零位;倾角传感器安装在6轴,通过参数辨识方法得到3~6轴零位角。

3.3 零位辨识实验

在机器人处于空载状态下进行三维精度测试,测试时,随机选择分布在机器人工作空间的200组测量位姿,在零位标定前后分别测量其末端位置精度。

以零位标定前后X方向误差变化如图(4~6)所示。

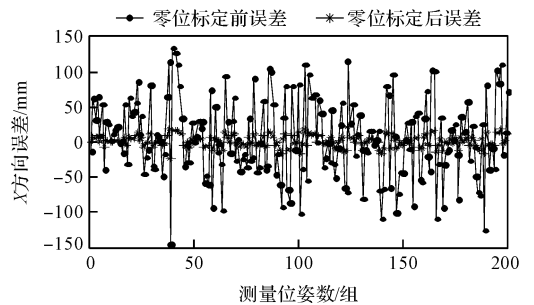


图4 零位标定前后X方向误差变化

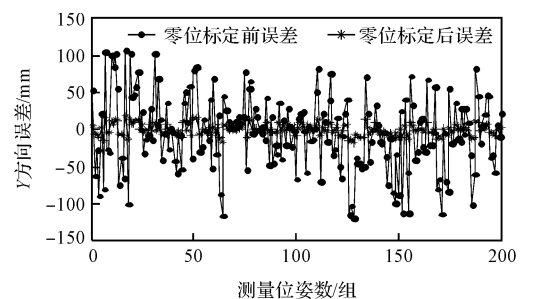


图5 零位标定前后Y方向误差变化

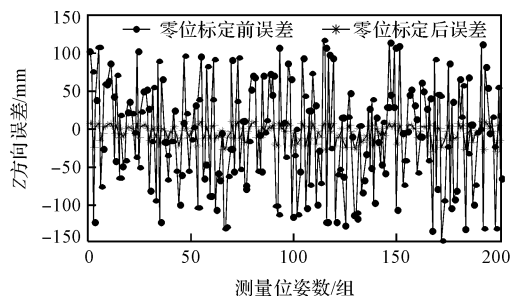


图 6 零位标定前后 Z 方向误差变化

图(4~6)分别给出了零位标定前后机器人测量点在 X、Y、Z 这 3 个方向的位置误差变化。可见,机器人经过零位标定后的定位误差大幅降低。另外,与传统的零位标定方法相比,由于节省了零位标定工具的安装及校准时间,整个标定所需时间缩短至原来的一半左右。从实验结论可以看出,本文提出的零位参数辨识标定方法精度远高于几何零位标定方法,同时还避免了使用传统算法辨识方法主要依靠昂贵的激光跟踪仪设备。实验证明了该算法可以应用到实际工程中去,并且可以节约标定成本。

4 结束语

本文针对机器人零位参数模型,提出一种快速零位标定算法,同时阐述了计算零位的方法和原理。虽然一种方法操作简便,但需要事先对机器人的定位孔或定位面进行加工,并制造出相应的辅助工装夹具,且校准过程需要各轴逐次校准,每校准一次均需安装相应的夹具(一般 6 自由度的机器人需要安装 6 次,至少需要 4 次),校准时需要不断调整机器人关节,整个过程十分耗时且精度远不及前一种方法。

本文结合前述两种标定方法的优点,提出了一种基于双轴倾角传感器的零位标定新方法,该方法仅需进行两次仪器安装及人工操作即可实现整个机器人的零位标定,节省了辅助夹具以及机器人安装面(或安装孔)的制造费用,并可提高机器人的零位对准精度,节省了零位标定的操作时间。

参考文献 (References):

- [1] CHENG L, WANG H. Finite element modal analysis of the FPD glass substrates handling robot[C]. 2012 International Conference on Mechatronics and Automation, Chengdu: IEEE, 2012.
- [2] ZUANG H, ROTH Z S, HAMANO F. A complete and parametrically continuous kinematic model for robot manipulators[J]. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, 1992, 8(4): 451-463.
- [3] TOMASZ W, KONRAD B. Automated generation of component system for the calibration of the service robot kinematic parameters[C]. 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Miedzyzdroje: IEEE, 2015.
- [4] 叶声华, 王一, 任永杰, 等. 基于激光跟踪仪的机器人运动学参数标定方法[J]. 天津大学学报, 2007, 40(2): 202-205.
- [5] TANG G R, MOORING B W. Plane-motion approach to manipulator calibration[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 1992, 7(1): 21-28.
- [6] DENAVIT J, HARTENBERG R. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices[J]. **Trans. of the ASME. Journal of Applied Mechanics**, 1955(22): 215-221.
- [7] EVERETT L J, SURYOHADIPROJO A H. A study of kinematic models for forward calibration of manipulators. [C]. 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Philadelphia: IEEE, 1988.
- [8] PRENNINGER J P, FILZ K M, VINCZE M, et al. Real-time contactless measurement of robot pose in six degrees of freedom[J]. **Measurement**, 1995, 14(3): 255-264.
- [9] PHIL Joo Cho, D I K, HYU Gyu Kima. Real-time static deflection compensation of an LCD glass-handling robot[J]. **Mechatronics**, 2007, 17(4-5): 191-198.

[编辑:程浩]

本文引用格式:

陈红, 孙雪娟, 龚勋. 机器人零位参数辨识及标定应用研究[J]. 机电工程, 2019, 36(7): 766-770.

CHEN Hong, SUN Xue-juan, GONG Xun. Research on robot zero parameter identification and calibration application[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2019, 36(7): 766-770.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>