

大型工业机器人运动学标定及精度补偿方法

李博文^{1,2}, 张晓辉¹, 何煦¹, 罗敬¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:将大型工业机器人引入航天制造领域,能够实现航天装备的高精度和可靠性。为了提高机器人绝对定位精度,更好地适应航天领域产品装配需求,基于改进的D-H(MD-H)模型,提出了大型工业机器人运动学标定及精度补偿方法。首先在误差建模中加入了坐标系转换误差和靶球安装误差,建立了更为完善的标定误差模型。然后通过激光跟踪仪对末端靶球进行测量来获得实际位姿数据,并采用改进的迭代最小二乘法辨识出误差参数。最后根据计算误差对机器人进行修正与补偿,完成运动学标定过程。为验证辨识方法的有效性,以KUKA KR1000 Titan大型工业机器人为研究对象进行仿真和实验。结果表明,经过标定补偿后的机器人末端平均定位误差由1.122mm降低到0.340mm,平均定位精度提升了约70%,补偿后机器人的绝对定位精度得到明显改善。

关键词:运动学标定; MD-H模型; 大型工业机器人; 绝对定位精度; 改进最小二乘法; 位置误差补偿

中图分类号: TH16; TP242.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-3997(2023)12-0275-06

DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.20230605.020

Kinematics Calibration of Large Industrial Robot and Precision Compensation Method

LI Bo-wen^{1,2}, ZHANG Xiao-hui¹, HE Xu¹, LUO Jing¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Jilin Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Introducing large industrial robots into aerospace manufacturing can achieve high precision and reliability of aerospace equipment. The kinematics calibration of large industrial robot and precision compensation method was suggested based on the modified D-H(MD-H) model to improve the absolute positioning accuracy, which can better adapt to the product assembly requirements of the aerospace field. There was a more complete error parameter identification model by adding the coordinate system transformation error and target ball installation error. Then the method using a laser tracker got the position of robot terminal by the target ball attached to the flange plate. The robot terminal error model was calculated by improved iterative least square method. Finally the compensation can be made to the robot terminal to complete the calibration. In order to further verify the validity of the identification algorithm, KUKA KR1000 Titan industrial robot was used for simulation and experiment. The results illustrate that the average error decreased from 1.122mm to 0.340mm and the average positioning accuracy has increased by about 70%. The absolute positioning accuracy rate significantly improved with the process of calibration compensation.

Key Words: Kinematics Calibration; MD-H Model; Large Industrial Robot; Absolute Positioning Accuracy; Improved L-S Method; Error Compensation

1 引言

随着综合国力的不断提升,我国航天事业取得巨大成就。研制出的大型精密光学仪器的型号不断增多,对航天产品的装配精度也提出了更严格的要求。这些仪器往往具有重量大、精度高、调整过程复杂等特点。目前,产品的装配任务主要依靠人工操作,装配周期、精度及可靠性与操作人员的经验有较大的关系^[1]。因此,将大型工业机器人引入航天制造领域,发展高精度的自动

化装配技术,实现智能化与数字化,是解决航天产品高精度装配困难问题的有效途径。

产品的可靠性主要由装配过程中各部件的定位精度来确定。其中重复定位精度与绝对定位精度又是机器人定位精度的两大构成。不同型号的机器人在重复定位精度上均可以达到较高水平,控制在0.1mm以内,而绝对定位精度一般都在1mm以上^[2],无法精确完成各项任务。为了提高机器人的性能及定位准确性,众多学者对不同型号的机器人进行了研究,提出了多种标定方法。

来稿日期: 2022-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(61875190); 国家自然科学基金项目(12003033)

作者简介: 李博文, (1996-), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 精密仪器与机器人标定;

张晓辉, (1967-), 女, 吉林长春人, 硕士研究生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 光学精密检测、像质评价技术

文献^[3]基于D-H模型建立了机器人的末端位置误差方程,并利用最小二乘法进行求解,有效实现了机器人的标定;文献^[4]在最小二乘法辨识出误差模型中真实关节角的基础上,利用圆周法对机器人进行二次误差补偿。以上基于模型的标定方法大多建立在D-H运动学基础上,且仅考虑了部分因素的影响,建立的误差模型并不完善。在使用最小二乘法求解参数时可能存在病态矩阵,导致部分参数无法辨识,当相邻关节平行时也可能产生奇异问题。同时他们的标定对象均为负载小于200kg的机器人,由于大型工业机器人具有重量较大,臂展较长等特点,运动学参数的微小偏差会引起末端定位产生较大误差^[5],这些方法难以对大尺寸高负载的工业机器人具备通用性。因此,有必要考虑更多影响定位精度的误差因素,建立更完善的误差模型并改进辨识算法,对航天领域的大型工业机器人进行标定。

针对以上问题,提出了一种适用于大型工业机器人的运动学标定及精度补偿方法。综合考虑了运动学参数、坐标系变换、靶球安装等多项误差影响因素,基于改进的D-H(MD-H)建模方法建立了含34个几何误差参数的机器人标定模型。并将L-M算法与最小二乘法相结合,进行有限次迭代完成参数辨识并补偿。最后根据国标对位置准确度的评定标准开展实验,验证了算法的有效性和准确性。

2 机器人运动学标定

2.1 机器人标定流程

标定是能够提高机器人绝对定位精度的有效方式。基于运动学模型的标定方法,大致可以分为4个步骤^[6]:(1)建立合理描述机器人定位误差的标定模型;(2)设计测量方案,准确测定机械臂末端实际位姿;(3)选用合适的算法进行计算,得到误差模型中的各项几何参数;(4)根据计算参数进行修正与补偿,实现机器人绝对定位精度的提高。

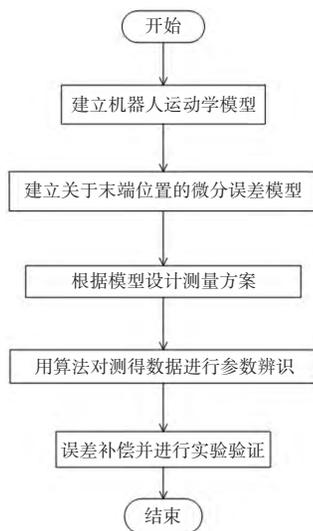


图1 机器人运动学标定流程

Fig.1 The Process of Robot Kinematics Calibration

2.2 机器人运动学分析

机器人标定的首要工作是建立合理的运动学模型。其中D-H建模法是最常用的建模方法之一,它的优点是将齐次变换矩阵

分解为与连杆相关的变换或与关节相关的变换,为具体的编程和数值求解带来便利。

确定D-H参数的经典方法是为每一个关节或连杆创建相应的参考坐标系,每一个坐标系都有严格的约束,必须先确定对应的z轴和x轴方向,再根据右手定则即可得到y轴方向。

D-H建模法定义了四个参数来描述相邻两个关节坐标系之间的转换关系,然而当两关节达到平行状态时,会产生一定缺陷:这些参数并不能表示关节坐标系下绕y轴旋转的角度。因此采用MD-H方法来建立机器人运动学误差模型,定义了一个新的参数β来表示y轴旋转角,可以有效解决相邻两关节平行时产生奇异现象的问题。于是,机器人相邻两关节的齐次坐标变换矩阵可定义为:

$$T_i^{i-1} = Rot(z, \theta_i) Trans(z, d_i) Trans(x, a_i) Rot(x, \alpha_i) Rot(y, \beta_i) = \begin{bmatrix} c\theta_i c\beta_i - s\theta_i s\alpha_i s\beta_i & -s\theta_i c\alpha_i & c\theta_i s\beta_i + s\theta_i s\alpha_i c\beta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i c\beta_i + c\theta_i s\alpha_i s\beta_i & c\theta_i c\alpha_i & s\theta_i c\beta_i - c\theta_i s\alpha_i c\beta_i & a_i s\theta_i \\ -c\alpha_i s\beta_i & s\alpha_i & c\alpha_i c\beta_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $d_i, \theta_i, a_i, \alpha_i, \beta_i$ —第*i*个关节的连杆偏置、关节转角、关节长度、连杆扭角以及y轴扭角。

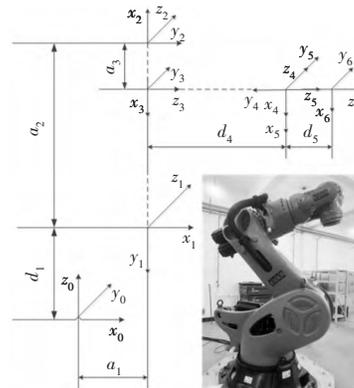


图2 机器人MD-H坐标系

Fig.2 Robot MD-H Coordinate System

标定选取的工业机器人型号为KUKA KR1000 Titan,最大负载超1000kg,最大臂展3m以上,是世界上最大的工业机器人之一,在汽车行业、建筑材料工业及智能制造领域得到广泛使用,其几何结构,如图3所示。

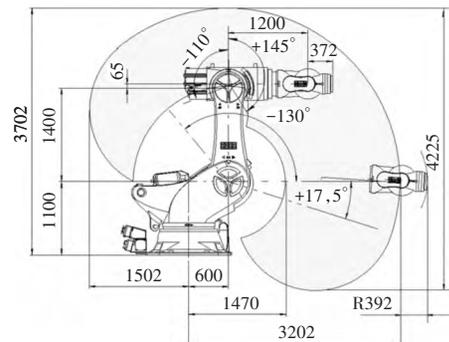


图3 机器人几何结构

Fig.3 Robot Geometrical Structure

结合机器人相关几何结构及坐标系建立规则,确定MD-H参数,如表1所示。

表1 机器人MD-H参数表
Tab.1 The Table of Robot MD-H Parameters

关节	$\theta_i/^\circ$	d_i/mm	a_i/mm	$\alpha_i/^\circ$	$\beta_i/^\circ$
1	0	1100	600	$-\pi/2$	-
2	-90	0	1400	0	0
3	0	0	65	$-\pi/2$	-
4	0	1200	0	$\pi/2$	-
5	0	0	0	$-\pi/2$	-
6	0	372	0	0	-

在MATLAB中进行仿真,结合 Robotics Toolbox 工具箱和 Link 函数得到运动学仿真模型,如图4所示。验证了MD-H参数的合理性。

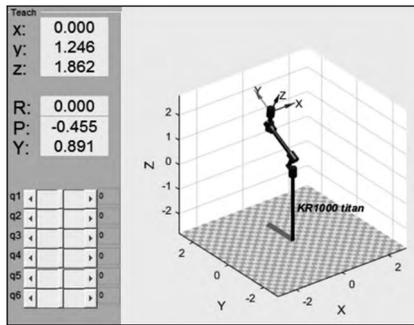


图4 KUKA 机器人仿真模型

Fig.4 KUKA Robot Simulation Model

3 机器人误差模型与参数辨识

3.1 机器人误差源分析

外部多种影响均可导致工业机器人的定位精度产生误差,其中运动学参数误差占最大比重。将MD-H模型中的运动学参数实际测定值与理论值相比较,得到的偏移量定义为运动学参数误差。

在具体测量时,由于机器人末端位姿难以直接测定,可以将激光跟踪仪自带的靶球通过磁性底座固定于转接板上,再将转接板连接在机器人末端法兰盘上。这相当于在末端新引入了新的平行连杆7,而且机器人末端与连杆7之间只存在平移关系^[7]。但是也不可避免地引入了新的靶球安装误差,记作 t_x, t_y, t_z 。连杆6和7之间的转换关系表示为 T_7^6 :

$$T_7^6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

为实现机器人末端定位误差的准确测定,首先应得到机器人基坐标系与测量坐标系之间的变换关系,将不同坐标下的数据进行统一。由于在拟合坐标系的过程中,不可避免地会引入测量误差和计算误差等,造成了最终转换结果存在微小的偏差,我们用 T_r 表示:

$$T_r = \begin{bmatrix} 1 & -\delta_x & \delta_y & d_x \\ \delta_x & 1 & -\delta_y & d_y \\ -\delta_y & \delta_y & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

六轴机械臂可建立6个连杆坐标系,每个坐标系有4个待辨识的D-H参数,由于只有二、三关节之间可能存在平行关系,所以引入旋转参数 β_i ,同时末端靶球在 x, y, z 方向上共存在3项安装

误差,记作 t_x, t_y, t_z ,从跟踪仪坐标系到机器人末端坐标系的变换矩阵引入了旋转误差 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 和平移误差 d_x, d_y, d_z 各3项,共计34项几何参数误差。

3.2 机器人微分运动学

针对KUKA大型工业机器人,引入末端法兰工作系到工具坐标系的齐次变换矩阵^[8],将六轴对应的关节坐标系产生的误差传递至机器人世界坐标系,得到机器人法兰末端在这两种坐标系下的变换关系为:

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据微分变换法,存在 ΔT_i 使得:

$$dT_i = T_i \times \Delta T_i \quad (5)$$

对运动学方程进行全微分,可得机器人末端法兰的位置误差近似为:

$$dT_i = \frac{\partial T_i}{\partial a_i} \Delta a_i + \frac{\partial T_i}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i + \frac{\partial T_i}{\partial d_i} \Delta d_i + \frac{\partial T_i}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial T_i}{\partial \beta_i} \Delta \beta_i \quad (6)$$

结合式(5)和式(6)可计算:

$$\Delta T_i = T_i^{-1} dT_i = \begin{bmatrix} 0 & -\beta_i \delta \alpha_i - c \alpha_i c \beta_i \delta \theta_i & s \alpha_i \delta \theta_i + \delta \beta_i & c \beta_i \delta \alpha_i + a_i s \alpha_i \beta_i \delta \theta_i - c \alpha_i \beta_i \delta d_i \\ \beta_i \delta \alpha_i + c \alpha_i c \beta_i \delta \theta_i & 0 & -c \beta_i \delta \alpha_i + c \alpha_i s \beta_i \delta \theta_i & a_i c \alpha_i \delta \theta_i + s \alpha_i \delta d_i \\ -s \alpha_i \delta \theta_i - \delta \theta_i & c \beta_i \delta \alpha_i - c \alpha_i s \beta_i \delta \theta_i & 0 & \beta_i \delta \alpha_i - a_i s \alpha_i c \beta_i \delta \theta_i + c \alpha_i c \beta_i \delta d_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ΔT_i 为每个关节误差引起的微分变换矩阵,根据微分运动学原理可得:

$$\Delta T_i = \begin{bmatrix} 0 & -\delta z & \delta y & dx \\ \delta z & 0 & -\delta x & dy \\ -\delta y & \delta x & 0 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $[\delta x, \delta y, \delta z]$ —姿态误差和位置误差向量。

联立式(7)和式(8)可得到在关节坐标系下,每个关节臂的运动学参数误差,表示为:

$$e_i = \begin{bmatrix} dx_i \\ dy_i \\ dz_i \\ \delta x_i \\ \delta y_i \\ \delta z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_i s \alpha_i \beta_i & -c \alpha_i s \beta_i & c \beta_i & 0 & 0 \\ a_i c \alpha_i & s \alpha_i & 0 & 0 & 0 \\ -a_i s \alpha_i c \beta_i & c \alpha_i c \beta_i & \beta_i & 0 & 0 \\ -c \alpha_i \beta_i & 0 & 0 & c \beta_i & 0 \\ s \alpha_i & 0 & 0 & 0 & 1 \\ c \alpha_i c \beta_i & 0 & 0 & \beta_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta d_i \\ \Delta a_i \\ \Delta \alpha_i \\ \Delta \beta_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$= G_i \Delta q_i$$

式(9)描述了连杆参数误差到其连杆坐标系微分误差的线性模型,前三行元素表示位置矢量变化,后三行元素表示姿态矢量变化。

最后计算出连杆坐标系下产生的各项误差传递到末端法兰坐标系下的误差总和为:

$$e_n = \sum_{i=1}^n j_i e_i = \sum_{i=1}^n j_i G_i \Delta q_i = J \Delta q \quad (10)$$

n_j 的形式为:

$$n_j = \begin{bmatrix} n_{ix} & n_{iy} & n_{iz} & (p_i \times n_i)_x & (p_i \times n_i)_y & (p_i \times n_i)_z \\ o_{ix} & o_{iy} & o_{iz} & (p_i \times o_i)_x & (p_i \times o_i)_y & (p_i \times o_i)_z \\ a_{ix} & a_{iy} & a_{iz} & (p_i \times a_i)_x & (p_i \times a_i)_y & (p_i \times a_i)_z \\ 0 & 0 & 0 & n_{ix} & n_{iy} & n_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & o_{ix} & o_{iy} & o_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & a_{ix} & a_{iy} & a_{iz} \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.3 基于位置误差的标定模型

机器人位姿由位置和姿态组成,其中位置产生的偏差比姿态偏差更直接影响到定位精度。并且位置坐标信息易于测量获取,同时当机器人的位置精度提高时,其末端的姿态精度也会相应提高。因此,在之后的研究中都只对位置误差进行分析,暂不分析姿态误差。

将机器人末端的实际测定位置 P_R 与理论计算位置 P_n 之间的差值定义为末端位置误差,并记作:

$$\Delta P = P_R - P_n \quad (12)$$

机器人法兰末端到靶球之间的平移变换,在 x, y, z 方向上共产生3项平移误差 $\Delta t_x, \Delta t_y, \Delta t_z$,基坐标系到机器人坐标系的变换引入了旋转误差 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 和平移误差 d_x, d_y, d_z ,考虑到上述误差及运动学参数误差 $\Delta d_i, \Delta \theta_i, \Delta \alpha_i, \Delta \alpha_i, \Delta \beta_i$ 都足够小,因此可以采用矩阵微分法来建立和分析机器人末端的位置误差模型:

$$\begin{aligned} \Delta P = & \sum_{i=1}^6 \frac{\partial P}{\partial a_i} \Delta a_i + \sum_{i=1}^6 \frac{\partial P}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i + \sum_{i=1}^6 \frac{\partial P}{\partial d_i} \Delta d_i + \sum_{i=1}^6 \frac{\partial P}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i \\ & + \frac{\partial P}{\partial \beta_2} \Delta \beta_2 + \frac{\partial P}{\partial \delta_x} \Delta \delta_x + \frac{\partial P}{\partial \delta_y} \Delta \delta_y + \frac{\partial P}{\partial \delta_z} \Delta \delta_z + \frac{\partial P}{\partial d_x} \Delta d_x \quad (13) \\ & + \frac{\partial P}{\partial d_y} \Delta d_y + \frac{\partial P}{\partial d_z} \Delta d_z + \frac{\partial P}{\partial t_x} \Delta t_x + \frac{\partial P}{\partial t_y} \Delta t_y + \frac{\partial P}{\partial t_z} \Delta t_z \end{aligned}$$

写成矩阵形式为:

$$\Delta P = P_R - P_n = J_k \Delta q \quad (14)$$

式中: $\Delta P = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$; J_k —误差矩阵; Δq —待求解的误差参数矢量,包含34个几何参数。

3.4 参数辨识方法

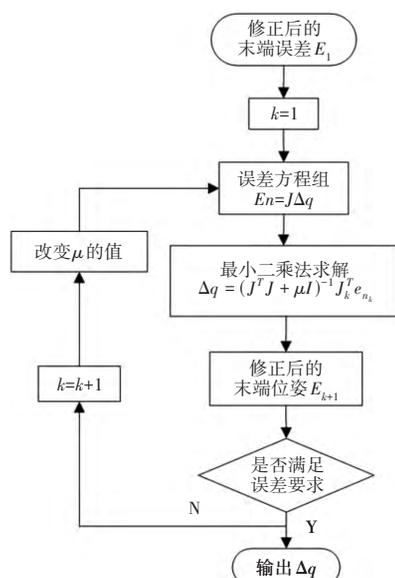


图5 最小二乘法迭代运算流程图

Fig.5 The Flow Diagram by Iterative Least Square Method

目前参数辨识的最常用方法是最小二乘法^[9],该方法目的是寻找使理论位置和实际位置之间误差达到最小化的最优解。通过计算将得到的最优解代入到原始数据中,对机器人的运动轨迹进行修正与补偿。因为所求的方程有34个未知数,所以至少需要选取12个位置坐标用于标定,并结合最小二乘法进行拟合求解:

$$\Delta q = (J^T J + \mu I)^{-1} J^T e_n \quad (15)$$

式中: e_n — n 组实际位置误差 ΔP 的集合,若雅可比矩阵中存在冗

余参数,则会导致误差模型中的部分数据难以准确辨识,误差补偿就可能产生偏差,因此引入L-M算法完善最小二乘法,改进后的求解公式可写成:

$$\Delta q = (J^T J + \mu I)^{-1} J^T e_n \quad (16)$$

式中: μ —权系数,初始值一般取0.001。

在实际计算过程中,最小二乘法常结合迭代运算来使用。因此,采用改进的最小二乘法辨识出几何参数误差,并补偿到运动学参数初始值中,通过不断调整权系数的值,进行有限次迭代,使末端位置误差不断靠近真实值,直到最终偏差满足精度要求^[10]。即为改进的迭代最小二乘法,可以使工业机器人的定位精度更为准确。

4 标定实验与数据分析

4.1 实验设备

标定过程中,以KUKA公司生产的KR1000 Titan大型机器人为研究对象,借助Leica公司的激光跟踪仪AT-960进行测量,搭建机器人参数辨识和标定试验平台。

表2 机器人和激光跟踪仪的主要参数

Tab.2 The Main Parameters of Robot and Laser Tracker

激光跟踪仪	Leica AT960
精度	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$
角度精度	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$
距离精度	$\pm 0.5 \mu\text{m}/\text{m}$
测量范围	水平方向 360° 垂直方向 $\pm 45^\circ$
工作温度	$(0 \sim 40)^\circ\text{C}$
工业机器人	KUKA KR1000Titan
自由度数量	6
工作空间体积	$79. \text{m}^3$
重复定位精度	$\pm 0.10 \text{mm}$
重量	4690kg
最大负载	1050kg
最大臂展	3702mm
最大工作半径	3202mm

4.2 数据采集与参数求解

实验开始前先确定数据采集次数为两次,每次各50个点。其中第一次用于机器人的参数误差辨识实验,另一次在参数辨识后采集,通过对标定前后KUKA大型工业机器人的定位精度进行分析对比,验证误差补偿效果的有效性。

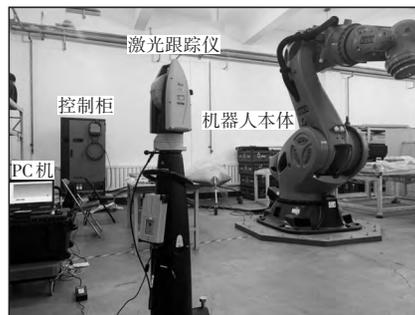


图6 实验现场图

Fig.6 The Experiment Site

首先在机器人末端安装靶球作为位姿检测点,如图6所示。基于激光跟踪仪在SA软件中建立机器人的基坐标系,然后在机

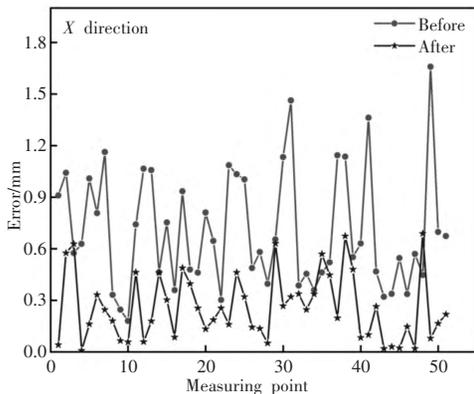
机器人的运动空间范围内随机选择50个点作为理论参考位姿,使用示教器移动机器人各关节分别运行到这些点,记录机器人末端靶球的位置信息和机器人在该位置时的关节角信息。对测得的50组数据用改进的最小二乘法进行参数辨识,计算出误差参数并补偿到控制器中,最后再次测得相同指令的50组数据,对补偿前后机器人的定位精度进行比较,验证参数补偿的效果及算法辨识的有效性。

应用前文所述的辨识算法,将激光跟踪仪测量的相关数据进行整理后代入建立的误差模型中,运用算法在MATLAB中对误差参数进行辨识,多次迭代后得到相关误差参数,如表3所示。

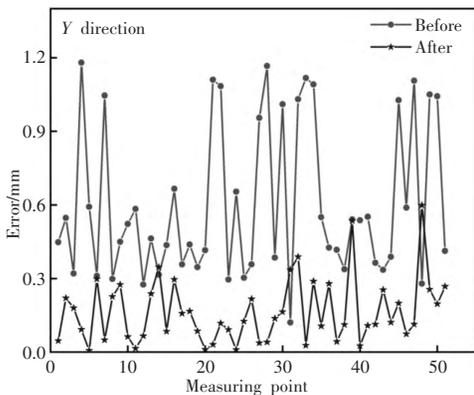
表3 辨识出的KUKA机器人误差参数
Tab.3 The Error Parameters of KUKA Robot Identified

关节	$\Delta\theta_i^\circ$	$\Delta d_i/\text{mm}$	$\Delta a_i/\text{mm}$	$\Delta\alpha_i^\circ$	$\Delta\beta_i^\circ$
1	0.0025	-0.0004	0.1171	0.0136	-
2	-0.0188	0.0001	-0.0083	0.0016	0.0042
3	-0.0135	0.0001	0.0131	-0.0114	-
4	0.5366	0.0733	-0.0102	0.7276	-
5	-0.1495	0.0012	-0.0088	0.9234	-
6	0.8183	-0.0321	-0.0286	0.0008	-
	坐标系转换误差			靶球安装误差	
δ_x°	-0.0286	d_x/mm	-0.0679	$\Delta t_x/\text{mm}$	-0.0208
δ_y°	0.0092	d_y/mm	-0.0170	$\Delta t_y/\text{mm}$	0.0178
δ_z°	-0.0321	d_z/mm	-0.0004	$\Delta t_z/\text{mm}$	0.0025

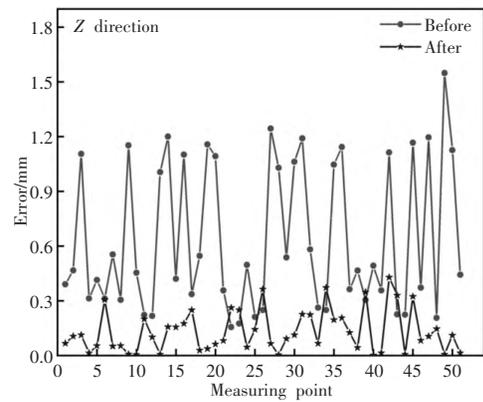
4.3 补偿结果分析



(a) 标定前后 X 方向的误差图



(b) 标定前后 Y 方向的误差图



(c) 标定前后 Z 方向的误差图

图7 标定前后 X、Y、Z 方向的误差图

Fig.7 Error Diagram in X、Y、Z Direction

为了验证标定方法是否使 KUKA 工业机器人的绝对定位精度得到提高,在辨识出相关参数误差后进行误差补偿后,再次控制机器人分别运动到相同的目标点,记录新的测量数据,对50个新的实测点进行数据处理,得到标定前后机器人的xyz三个坐标轴方向的位置误差,如图7所示。通过图7可以看出三个坐标轴方向的定位误差均有明显降低的趋势,将平均误差值和最大误差值作为反映定位精度的相关指标,对实验数据进一步分析,得到标定前后的定位误差,如表4所示。

表4 标定前后的误差对比

Tab.4 Error Comparison Before and After Calibration

误差类型	最大误差		平均误差	
	标定前	标定后	标定前	标定后
x/mm	1.658	0.689	0.703	0.262
y/mm	1.180	0.536	0.601	0.169
z/mm	1.549	0.429	0.635	0.136
$\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}/\text{mm}$	2.557	0.973	1.122	0.340

标定后,最大误差由2.557mm下降到0.973mm,下降了61.9%;平均误差由1.122mm下降到0.340mm,下降了69.7%。x轴方向上,最大误差下降了58.6%,平均误差下降了62.7%;y轴方向上,最大误差下降了54.6%,平均误差下降了71.9%;z轴方向上,最大误差下降了72.3%,平均误差下降了78.6%。因此可以看出标定后无论是最大误差还是平均误差都有了明显降低,经过参数误差补偿的模型能够更加准确描述机器人末端的位置。

4.4 精度验证实验

为进一步验证运动学标定及精度补偿方法的有效性,根据国标GB/T12642-2013定义的测量方法,开展进一步验证实验。位置准确度作为衡量机器人绝对定位精度指标之一,指的是机器人从相同方向接近目标指令位置和实到位置平均值之间的偏差^[11],计算方法如下:

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2};$$

$$AP_x = (\bar{x} - x_c); AP_y = (\bar{y} - y_c); AP_z = (\bar{z} - z_c);$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j; \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j; \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j \quad (17)$$

首先,选择一个空间测量平面,在平面上按照国标规定确定5个位姿测量点,控制机器人按P5→P4→P3→P2→P1的顺序循

环运动30次,采用激光跟踪仪依次测量每个实验点的实际位置,计算出标定前5个点对应的绝对定位精度,然后根据辨识出的参数误差进行误差补偿,再次控制机器人沿着相同轨迹继续进行30次往返运动,计算标定后的5个实验点的绝对定位精度^[11];得到这5个实验点标定前后xyz方向位置偏差及位置准确度,如图8所示。

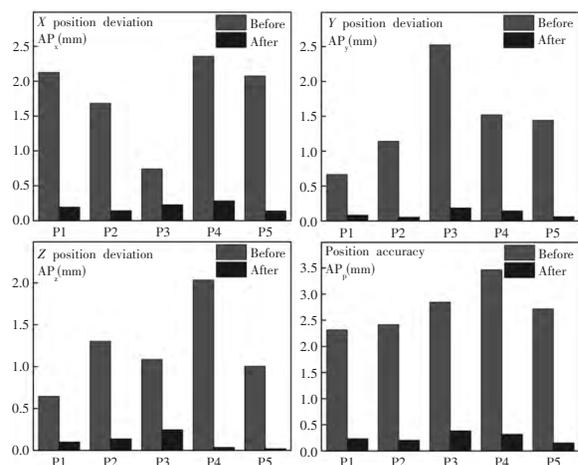


图8 标定前后位置准确度对比图

Fig.8 Position Accuracy Before and After Calibration

从图中不难看出,对机器人进行误差补偿后,这五点中最大的位置准确度由2.36mm优化至0.28mm;提高了88.1%,平均准确度由2.85mm优化至0.38mm,提高了86.7%。综上所述,基于MD-H模型的运动学标定及精度补偿方法适用于航天领域的大型工业机器人,机器人的各项定位精度指标均得到明显提高。

5 结论

以KUKA KR1000 Titan为研究对象,提出了适用于航天领域自动化装配的大型工业机器人标定与精度补偿方法。首先引入MD-H建模方法解决了传统模型的缺陷,综合考虑运动学参数、坐标系转换误差、靶球安装误差等多项误差因素对绝对定位精度的影响,建立了更为完善的误差模型;然后采用L-M算法与最小二乘相结合,计算出误差模型中的各项参数,对机器人进行修正与补偿。实验数据显示:该方法可降低定位误差最高达61.9%,平均定位误差也大幅减少了69.7%。最后根据国家标准选取5个空间点,测量标定前后的位置准确度,最大准确度提高了88.1%,平均准确度提高了86.7%,进一步证明了标定方法的可行性。最终结果表明:该方法不仅能准确计算出标定模型中的各项参数,精度补偿取得显著效果,同时具备一定通用性,对大型工业机器人的标定及精度补偿具有重要意义。

大型工业机器人标定是一项比较复杂的工作,影响其绝对定位精度的因素还有很多,精度的提升有待误差模型的进一步完善。同时在后续的研究中应关注姿态测量与补偿,使其更好地满足航天领域的产品装配精度要求。

参考文献

[1] 王战玺,李树军,赵璐. 移动机器人铣削制孔系统基准检测[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(3):281-287.
(Wang Zhan-xi, Li Shu-jun, Zhao Lu. Benchmark test of hole making

system for mobile robot milling[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 51(3): 281-287.)

- [2] Dong G H, Yin Y, Hu X B. Research on absolute positioning error of robot based on mapping theory[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014 (494-495): 1156-1160.
- [3] 任永杰, 郝继贵, 杨学友. 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(9): 195-200.
(Ren Yong-jie, Zhu Ji-gui, Yang Xue-you. Method of calibration of robot using laser tracker[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007(9): 195-200.)
- [4] 齐飞, 平雪良, 刘洁. 工业机器人参数辨识及误差补偿方法研究[J]. 机械传动, 2015, 39(9): 32-36.
(Qi Fei, Ping Xue-liang, Liu Jie. Research on parameter identification and error compensation of industrial robot [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39(9): 32-36.)
- [5] 罗天洪, 张剑, 陈才. 重载机械臂对未知载荷参数的补偿控制[J]. 机械设计与制造, 2016(5): 171-174.
(Luo Tian-hong, Zhang Jian, Chen Cai. Compensation control for unknown load parameters of heavy-duty manipulator [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(5): 171-174.)
- [6] Qiao Y, Chen Y, Chen B. A novel calibration method for multi-robots system utilizing calibration model without nominal kinematic parameters [J]. Precision Engineering, 2017(50): 211-221.
- [7] 史晓佳. 工业机器人在线误差测量与实时控制补偿技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
(Shi Xiao-jia. Research on online error measurement and real-time control compensation technology for industrial robot [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.)
- [8] 苏学满, 孙丽丽, 杨明. 基于MATLAB的六自由度机器人运动特性分析[J]. 机械设计与制造, 2013(1): 78-80.
(Su Xue-man, Sun Li-li, Yang Ming. Analysis of kinematic characteristics of 6-DOF robot based on MATLAB [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(1): 78-80.)
- [9] 唐尧, 张恩政, 陈本永. 基于运动学分析的工业机器人轨迹精度补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 175-183.
(Tang Yao, Zhang En-zheng, Chen Ben-yong. Compensation method for trajectory accuracy of industrial robot based on kinematics analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 175-183.)
- [10] 朱江新, 刘吉刚, 田硕. 两步误差补偿法提高工业机器人绝对定位精度[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(4): 547-553.
(Zhu Jiang-xin, Liu Ji-gang, Tian Shuo. Two-step error compensation method for improving the absolute positioning accuracy of industrial robot [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(4): 547-553.)
- [11] 龚星如, 沈建新, 田威. 工业机器人的绝对定位误差模型及其补偿算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(z1): 60-64.
(Gong Xing-ru, Shen Jian-xin, Tian Wei. Absolute positioning error model and compensation algorithm of industrial robot [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 44(z1): 60-64.)