

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.02.001

基于运动学参数标定方法的机械臂 误差分析与仿真研究*

王宪伦, 安立雄, 张海洲
(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266000)

摘要:针对工作任务复杂或环境多变,且对机械臂精度要求较高的工业生产需求等问题,基于运动学参数标定方法进行了机械臂的误差分析与 Matlab 仿真。介绍了定位精度以及定位误差的来源,针对机械臂运动学标定的方法步骤,采用矩阵法对运动学参数标定误差模型进行了建模分析,推导出了运动学参数误差模型的通用形式,并添加一个微小的增量进行了误差补偿;采用 Matlab 对机械臂运动学参数误差模型进行了仿真分析,验证了所建立的误差模型的正确性。研究表明:基于运动学参数标定方法的机械臂误差分析能很好地提高机械臂的精度,使机械臂能够准确完成预期的位姿要求,对于进一步提高机械臂的精度有较好的指导作用。

关键词:机械运动学;参数误差;参数标定;Matlab 仿真

中图分类号:TH113.2;TP202+.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)02-0109-08

Error analysis and simulation of manipulator based on kinematics parameter calibration method

WANG Xian-lun, AN Li-xiong, ZHANG Hai-zhou
(College of mechanical and electrical Engineering, Qingdao University
of Science and Technology, Qingdao 266000, China)

Abstract: Aiming at the problem of the complexity of work tasks or the changing environment, and the industrial production requirements of higher precision requirements for manipulator, error analysis and Matlab simulation were carried out based on the calibration method of manipulator kinematics parameters. The content of the positioning accuracy and the source of the positioning error were introduced in general, applying the matrix method, the error model of kinematics parameter calibration were modeled and analyzed, the general form of kinematics parameter error model was derived, and a small increment was added to compensate the error. The error model was proved to be correct by Matlab simulation analysis of the manipulator kinematics parameter error model. The results indicate that the error analysis based on the kinematics parameter calibration method of the manipulator can improve the accuracy of the manipulator, enable the manipulator to complete the expected posture requirements accurately, and have a good guiding role for further improving the accuracy of the manipulator.

Key words: mechanical kinematics; parameter error; parameter calibration; Matlab simulation

收稿日期:2018-08-09

基金项目:山东省重点研发计划资助项目(2017GGX10133,2018GNC112007)

作者简介:王宪伦(1978-),男,山东济宁人,博士,副教授,主要从事机器人技术、智能控制方面的研究。E-mail:xlwang@126.com

0 引 言

机械臂的绝对定位精度是指机械臂实际达到的位姿与理论上的位姿的相差程度。在一些动作单一或对路径没有特殊要求的场合,机械臂只要能准确运动到示教过的点,就能满足生产的要求。但是,随着科技的进步与发展,机械臂的应用范围也越来越广泛,在较为复杂多变的工况下,通过人工示教的方式需要耗费大量的时间、人力,有些情况下,实现难度很大。因存在逆向求解问题,运动学参数的误差会影响到关节角度的求解,因此机械臂的绝对定位精度相对较低^[1],导致因机械臂无法完美到达指定位置而出现生产安全事故,甚至造成人员伤亡。为了使机械臂能够适应多变的、复杂的,且精度要求较高的工业生产需求,保障人身安全需要提高机械臂的绝对定位精度,可以通过机械臂运动学标定来完成该需求。

SUN Lei 等人^[2]应用激光发射仪和几何分析法实现了多机器人协作系统快速标定,避免了代数学标定算法的复杂矩阵计算;WANG Ke-sheng^[3]采用遗传算法对 ABB 机器人参数进行了修正,避免了传统机器人标定模型复杂逆雅克比矩阵的求解;SANTOLARIA 等^[4]分析了机械臂 D-H 参数随环境温度变化的曲线,并对连杆参数误差造成的位置误差进行了补偿;GAUTIER 等^[5]根据机械臂扭矩参数实现了机械臂运动学参数运动识别。

本文将通过运动学标定方法来得到机械臂较为准确的实际几何参数,通过一定的算法对参数进行误差补偿,进而提高机械臂的绝对定位精度,以满足精度需求,并进行仿真实验。

1 误差来源分析

在实际应用中,很多因素会影响到机械臂的绝对定位精度^[6],按照定位误差的来源来分类,包括外界环境的变化引起的外部误差和内部结构参数引起的内部误差。外界环境的变化包括工作环境中的温度、湿度的变化,电网的冲击,通讯信号的干扰,其他设备的振动,人为因素的干预等;内部由机械臂自身某些部分引起的误差,包括机械臂的运动学参数误差、连杆受力发生弹性变形、齿轮间隙、运动时的摩擦磨损以及润滑条件等。

按照机械臂定位误差的特性来分,可以分为确定性误差、随机误差和时变误差。

综合分析以上误差来源,外界环境的变化、受力变

形、摩擦磨损等对机械臂的绝对定位精度影响较小,机械臂的运动学参数误差影响较大,由其所导致的误差约占总误差的 80%^[7]。因此,本文在建立误差模型的时候主要考虑连杆的制造误差、机械臂的装配误差等运动学参数误差。

运动学参数误差主要由以下几个方面造成^[8]:

- (1) 零件的加工测量误差;
- (2) 装配过程中的间隙引起的误差;
- (3) 长期使用造成的零件磨损等引起的误差;
- (4) 更换零件后产生的误差等。

机械臂运动学参数误差示意图如图 1 所示。

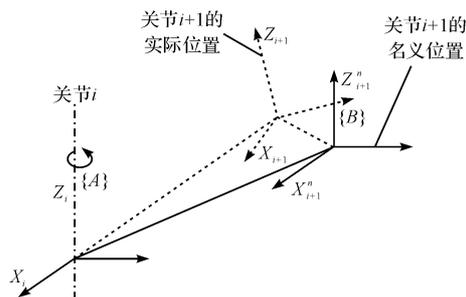


图 1 机械臂运动学参数误差示意图

2 机械臂运动学参数标定模型

2.1 机械臂结构组成

本文以自主研发的机械臂为研究主体,该机械臂主要由机械臂机械本体部分、电气控制系统等组成。该机械臂是一个含有 1 个移动关节和 5 个转动关节的六自由度机械臂系统。

机械臂模型如图 2 所示。

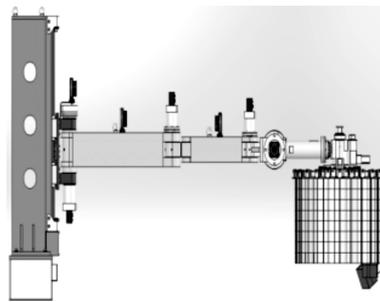


图 2 机械臂模型

本研究采用 D-H 方法对该机械臂进行正向运动学分析可以得到连杆坐标系 $\{i\}$ 相对于坐标系 $\{i-1\}$ 的变换:

$${}^{i-1}T = R_X(\alpha_{i-1})D_X(a_{i-1})R_Z(\theta_i)D_Z(d_i) \quad (1)$$

式中: $\Delta\alpha_{i-1}$ —由于加工过程中加工精度的限制,以及工人的操作水平所引起的连杆长度误差; Δd_i —由于

在装配过程中存在装配误差; $\Delta\alpha_{i-1}$ —由于相邻的两连杆轴线之间的平行度或垂直度而引起的偏差; $\Delta\theta_i$ —因为编码器的零位与名义模型下的零位全重合而产生的偏差。

由矩阵相乘计算出式(1),可得到该机械臂的 $i^{-1}T$ 的通用表达式为:

$${}_{i-1}T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $c\theta_i$ — $\cos\theta_i$ 的简写; $s\theta_i$ — $\sin\theta_i$ 的简写; $s\alpha_{i-1}$ — $\sin\alpha_{i-1}$ 的简写; $c\alpha_{i-1}$ — $\cos\alpha_{i-1}$ 的简写等等。

2.2 机械臂运动学参数标定技术

机械臂运动学标定的过程是通过某种方法辨识出机械臂运动学标定模型中的参数^[9],将辨识得到参数进行相应的修正,让修正后的参数值更加接近真实值,使得修正后的关节变量与机械臂末端执行器在空间坐标系下的函数关系更为精确。

机械臂运动学参数标定技术的大体思路是建立机械臂的运动学模型与误差模型,采用适当的方法、仪器设备得到末端执行器在不同位置下的误差值,采用如最小二乘法等算法辨识出运动学参数的误差值,最后将得到的误差值对应地补偿到各个名义参数中。

一般标定的具体步骤为^[10]:

- (1) 为机械臂建立一个合适的运动学模型和误差模型;
- (2) 通过一定的方法得到机械臂的实际位姿;
- (3) 通过识别参数对机械臂的运动学参数进行辨识;
- (4) 对原来的机械臂运动模型中的参数进行修正。

2.3 机械臂运动学参数标定模型的建立

在分析机械臂的定位误差中,把机械臂的连杆参数的微小变化量作为各个误差因子。根据实到点与相应点的指令位姿之间的差值,建立相应的定位误差模型并对其进行相应的研究。本文采用矩阵法来对运动学参数标定误差模型进行建模分析^[11]。

由式(1)可知:本文所建立的运动学模型末端变换矩阵是一个含有 α_{i-1} 、 a_{i-1} 、 d_i 和 θ_i 的矩阵。在实际应用中,它们都存在一定范围内的微小偏差。由于这些偏差都较小,通过微分运动学模型来近似替代误差方程,建立 D-H 模型的误差模型^[12-13]。

当给定机械臂的某一个位置,根据名义值下的 D-H 参数模型计算出机械臂末端在基座坐标系下的理论位置坐标 P ,由于误差的存在,其实际到达的位置为 P' , ΔP 为实际位置与理论位置坐标的误差值,即:

$$\begin{cases} \Delta P = P' - P \\ \Delta P = N_a\Delta a + N_\alpha\Delta\alpha + N_d\Delta d + N_\theta\Delta\theta \end{cases} \quad (3)$$

式中: N_a —连杆长度 a 的误差所对应的系数矩阵; N_α —连杆转角 α 的误差所对应的系数矩阵; N_d —连杆偏距 d 的误差所对应的系数矩阵; N_θ —关节角 θ 的误差所对应的系数矩阵。

其中:

$$\Delta\alpha = [\Delta\alpha_1 \quad \Delta\alpha_2 \quad \cdots \quad \Delta\alpha_n]^T;$$

$$\Delta d = [\Delta d_1 \quad \Delta d_2 \quad \cdots \quad \Delta d_n]^T;$$

$$\Delta\theta = [\Delta\theta_1 \quad \Delta\theta_2 \quad \cdots \quad \Delta\theta_n]^T.$$

则式(3)即为机械臂运动学标定的 D-H 误差模型。

3 机械臂运动学参数误差分析

3.1 机械臂误差补偿方案

当辨识出机械臂的各个参数的误差值之后,需要对各个参数进行误差补偿,将 Δa 、 $\Delta\alpha$ 、 Δd 、 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\beta$ 分别与相应的名义参数值相加,作为新的参数值,并在程序中进行相应的修改。将给定的指令位姿按照新的参数值,进行相应的逆运动学求解,求解出关节转角 $\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \cdots \quad \theta_n]^T$,在程序中将 $\theta + \Delta\theta$ 的值作为最后的 θ 值输出,进而控制各个轴转动。

上文中建立的运动学模型末端变换矩阵是一个含有 α_{i-1} 、 a_{i-1} 、 d_i 和 θ_i 的矩阵,由于在实际应用中,它们都存在一定范围内的微小偏差。

这里假设关节 $\{i\}$ 的偏差为 $\Delta\alpha_{i-1}$ 、 Δa_{i-1} 、 Δd_i 和 $\Delta\theta_i$,则修正后参数为:

$$\begin{cases} \alpha'_{i-1} = \alpha_{i-1} + \Delta\alpha_{i-1} \\ a'_{i-1} = a_{i-1} + \Delta a_{i-1} \\ d'_i = d_i + \Delta d_i \\ \theta'_i = \theta_i + \Delta\theta_i \end{cases} \quad (4)$$

为了分析这些误差,对这几个参数的敏感性进行研究。由于在不同的位姿下,运动学参数误差对总位置误差的影响不同,所以假定机械臂当前所处的关节角度值为: $q = [0 \quad p_i/4 \quad p_i/6 \quad -p_i/3 \quad 2p_i/3 \quad p_i/6]$ 。假定其中一个参数存在误差,其余的参数不存在误差,按照一定的步长来改变每一个关节角值,记录得到的末端位姿。最后,计算无误差的末端位姿与相应的有误差的位姿的偏差,并绘制成相应的曲线。

3.2 关节角误差分析

关节角偏差是影响机械臂末端位置和姿态精确度的因素之一, 本文以 $q = [0 \quad p_i/4 \quad p_i/6 \quad -p_i/3 \quad 2p_i/3 \quad p_i/6]$ 为所要分析的位姿来对机械臂的末端位姿进行误差分析。

假设关节 $\{i\}$ 存在 $\Delta\theta_i = 0.001\text{rad}$ 的误差, 首先, 让关节 $\{1\}$ 在空间运动, 其余关节保持不变, 求得末端位置误差 $\Delta p = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$ 。之后, 让其他关节依次运动, 绘制关节 $\{i\}$ 运动时的误差分布曲线, 如图 3 所示。

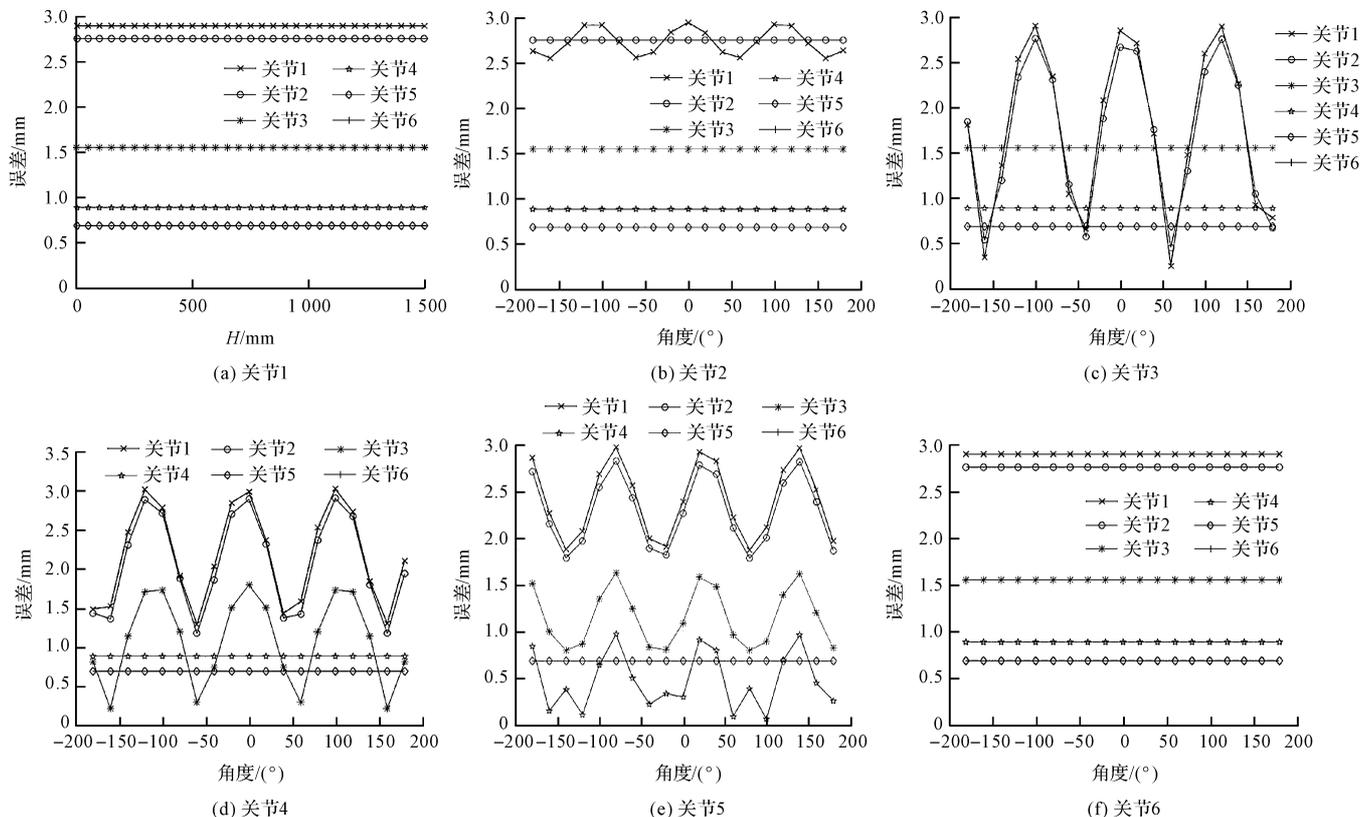


图 3 关节角误差分布曲线图

由图 3(a,f) 可以得出: 在机械臂模型下, 当关节角误差一定时, 移动关节 $\{1\}$ 的运动对误差的影响是不变的, 转动关节 $\{6\}$ 的运动同样不影响误差的数值, 误差并没有随着 $\{1\}$ 或 $\{6\}$ 的运动而发生改变。图 3 中除去首末关节, 运动关节 $\{i\}$ 之前关节的所有关节角误差所产生的误差是随着关节 $\{i\}$ 的运动而变化的, 而运动关节 $\{i\}$ 之后关节的关节角误差所产生的误差是不随关节 $\{i\}$ 的运动而变化。

经过各个连杆的传递后, 一个较小的关节角误差传递到末端后将产生一个相对较大的误差值, 并且传递的关节数越多, 产生的误差也相对越大。

3.3 连杆转角误差分析

同理, 假设关节 $\{i\}$ 存在 $\Delta\alpha_{i-1} = 0.001 \text{ rad}$ 的误差, 绘制关节 $\{i\}$ 运动时的误差分布曲线, 如图 4 所示。由图 4(f) 可知: 当连杆转角误差一定时, 总误差

的数值不随末端转动关节的运动而发生变化。在连杆转角 $\Delta\alpha_0$ 和 $\Delta\alpha_1$ 相等的情况下, 除关节 $\{1\}$ 以外, 其余每个关节单独运动时产生的误差是相同的。图 4 中除去末关节, 运动关节 $\{i\}$ 之前关节的所有连杆转角误差 $\Delta\alpha_{i-1}$ 所产生的误差是随着关节 $\{i\}$ 的运动而变化的, 而运动关节 $\{i\}$ 之后关节的所有连杆转角误差 $\Delta\alpha_{i-1}$ 所产生的误差是不随关节 $\{i\}$ 的运动而变化。

经过各个连杆的传递作用, 一个较小的连杆转角误差传到末端后将产生一个相对较大的误差值。不同位置的连杆转角误差, 在同一个关节运动产生的误差是不同的。

3.4 连杆长度误差分析

同理, 假设关节 $\{i\}$ 存在 $\Delta a_{i-1} = 0.001 \text{ m}$ 的误差, 绘制关节 $\{i\}$ 运动时的误差分布曲线如图 5 所示。

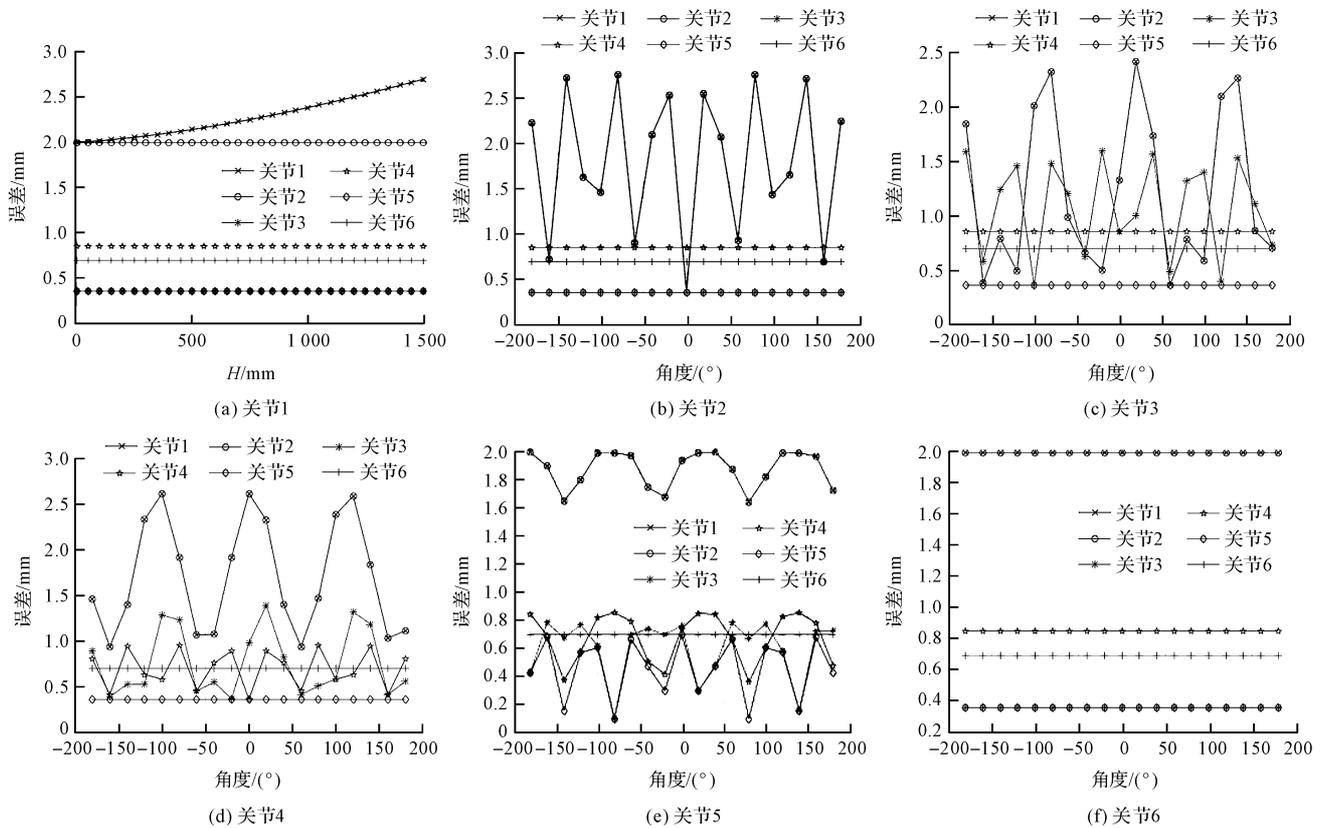


图4 连杆转角误差分布曲线图

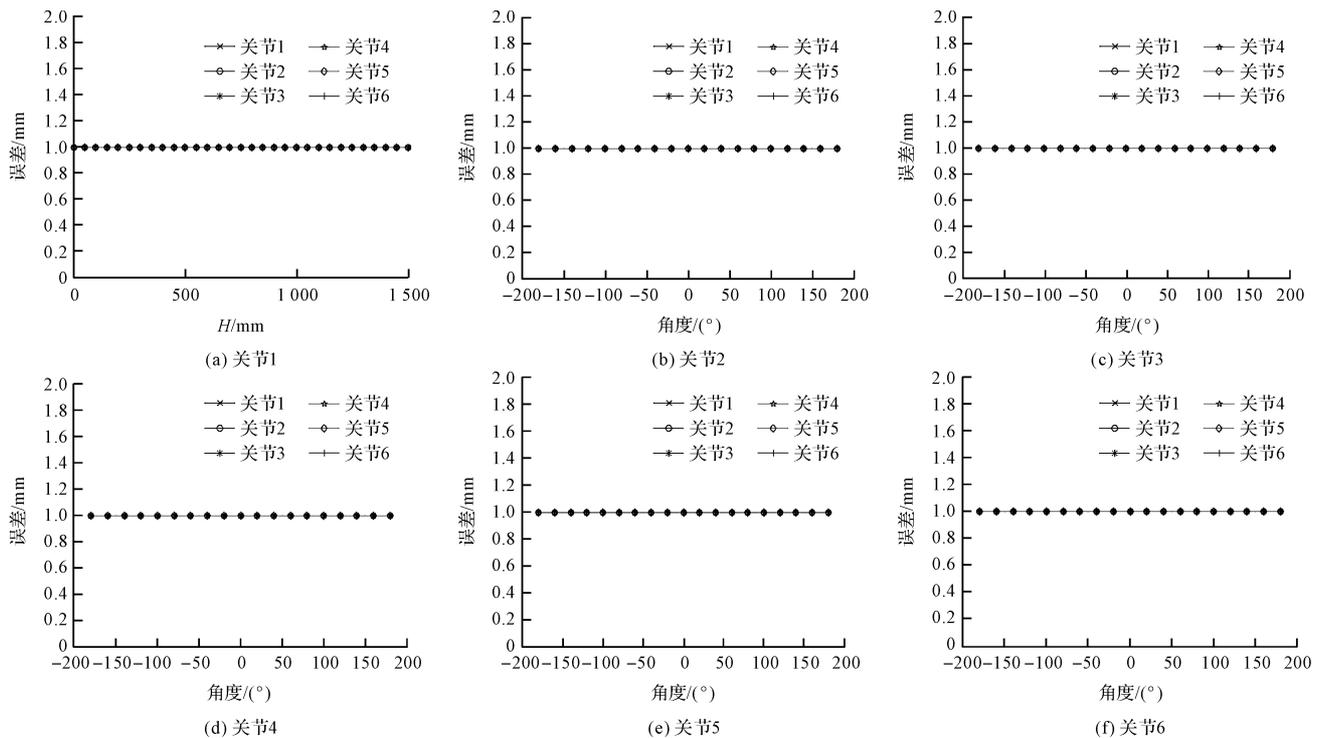


图5 连杆长度误差分布曲线图

由图5中的单幅曲线图可知:在连杆长度误差数值大小相等的情况下,连杆长度误差存在的位置对总误差的影响是相同的;同一个连杆长度误差产生的总误差与当前运动关节转角无关。综合分析各个曲线图可知,同一个连杆误差对总误差的影响与运动关节距

离基座坐标系的远近无关。

3.5 连杆偏距误差分析

同理,绘制关节 $\{i\}$ 运动时的误差分布曲线如图6所示。

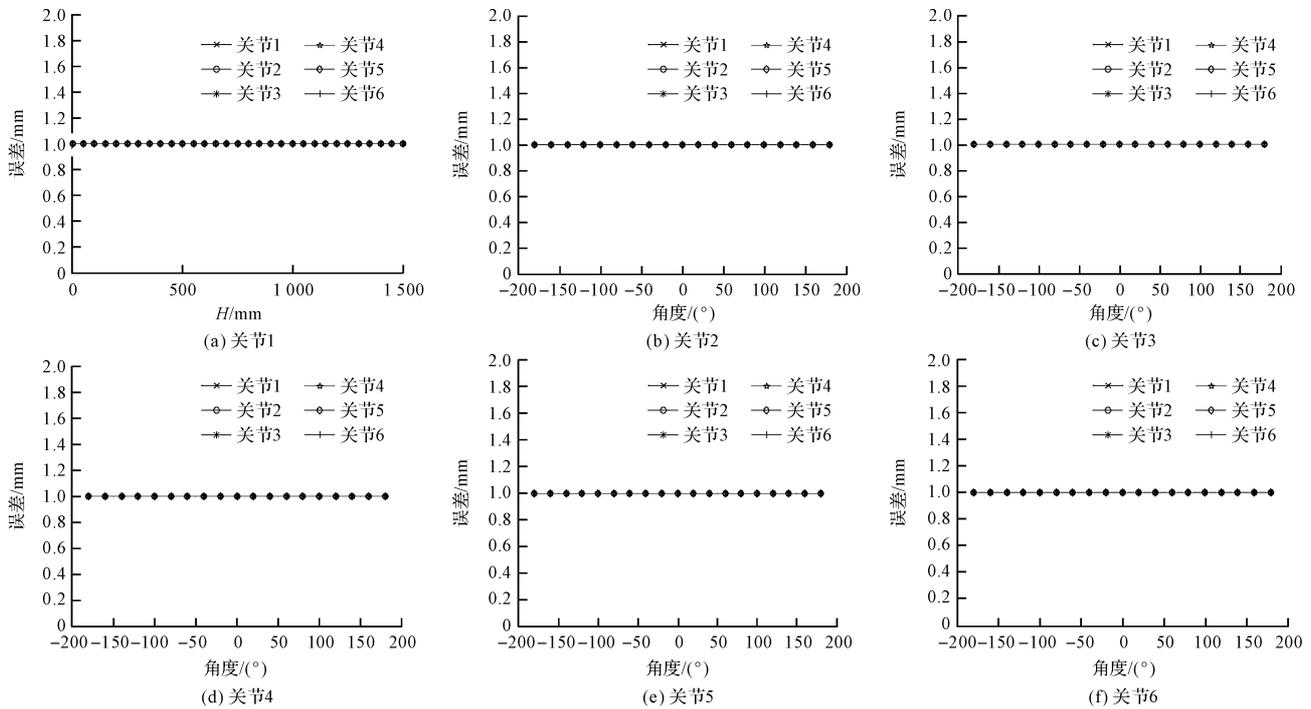


图 6 连杆偏距误差分布曲线图

由图 6 中的单幅曲线图可知:在连杆偏距误差数值大小相等的情况下,连杆偏距误差存在的位置对总误差的影响是相同的;同一个连杆偏距误差产生的总误差与当前运动关节转角无关。综合分析各个曲线图可知,同一个连杆偏距误差对总误差的影响与运动关节距离基座坐标系的远近无关。

4 机械臂误差模型仿真验证

为验证机械臂的 D-H 误差模型的正确性和可行性,笔者对该误差模型进行 Matlab 仿真。

程序设计流程图如图 7 所示。

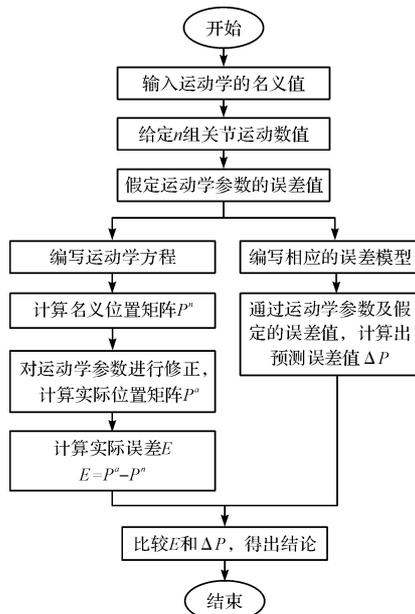


图 7 程序设计流程图

(1) 预先假定待标定机械臂的运动学参数的误差值,如表 1 所示。

表 1 机械臂的各运动学参数误差

连杆	$\Delta\alpha_{i-1}$ /rad	Δa_{i-1} /mm	Δd_i /mm	$\Delta\theta_i$ /rad
1	0.002 0	0.31	-0.4	0.001 2
2	-0.001 4	-0.39	0.3	-0.001 7
3	0.002 3	0.23	0.12	0.001 0
4	0.001 7	-0.17	-0.5	0.001 2
5	0.001 0	0.12	0.7	0.001 4
6	-0.001 5	0.24	0.14	-0.001 0

(2) 在机械臂工作范围内,本研究选取 15 组关节运动数值(包括移动关节的移动距离与关节转角的转角值),尽量保证选取的关节角度包含机械臂末端执行器在机械臂工况下经常需要到达的点,根据机械臂的名义连杆参数通过正向运动学计算出机械臂末端所到达的理论位置 P^n ;

(3) 本研究将假定的误差值与机械臂的相应名义连杆参数相加作为实际的连杆参数,通过正向运动学求解出各组关节运动值下机械臂末端执行器所到达的实际位置 P^a ;

(4) 每组的机械臂末端执行器的实际误差 E 则是通过实际位置与理论位置做差得到,即 $E = P^a - P^n$;

(5) 通过机械臂标定的误差模型,代入相应的数据,求解出各组的机械臂末端执行器的预测误差 ΔP ;

(6) 将各组的实际误差 E 与预测误差 ΔP 相比较,误差模型的仿真结果如表 2 所示。

表 2 D-H 误差模型的仿真结果

组数	关节 1/mm	关节角 2-6/(°)	理论位置 P^0 /mm	实际位置 P^e /mm	实际误差 E /mm	预测误差 ΔP /mm
1	100	(0,0,0,90,0)	327 7	3 277.239 3	0.239 3	0.240 0
			0	-0.181 1	-0.181 1	-0.176 6
			100	100.713 7	0.713 7	0.707 8
2	200	(10,10,10,80,10)	3 065.429 0	3 065.637 6	0.208 7	0.207 7
			997.973 6	998.406 2	0.432 6	0.439 8
			82.440 2	85.110 7	2.670 5	2.662 7
3	300	(20,20,10,70,20)	2 620.063 4	2619.902 7	-0.160 8	-0.163 0
			1 704.849 7	1 705.739 4	0.889 7	0.897 1
			68.452 4	72.126 8	3.674 4	3.665 5
4	400	(30,30,-10,70,-20)	2 289.562 3	2 289.251 1	-0.311 2	-0.313 6
			2 097.572 0	2 098.041 4	0.469 4	0.474 7
			168.452 4	171.808 0	3.355 7	3.348 5
5	500	(30,40,-15,75,-20)	2 091.885 8	324.779 5	-0.275 3	-0.278 0
			2 228.343 9	2 228.223 3	-0.120 7	-0.114 9
			324.779 5	328.600 5	3.821 0	3.815 7
6	600	(40,-30,-10,80,30)	2 972.143 2	2 972.632 9	0.489 7	0.491 1
			929.365 0	929.015 6	-0.349 4	-0.350 3
			482.440 2	480.925 2	-1.5150	-1.520 3
7	700	(50,-30,-40,70,30)	2 696.782 3	2 697.097 4	0.3151	0.318 6
			913.722 2	913.437 8	-0.284 4	-0.288 8
			468.452 7	465.533 1	-2.919 3	-2.923 8
8	100	(-10,20,10,80,10)	3 176.962 2	3 177.195 9	0.233 7	0.234 5
			276.857 8	277.396 4	0.538 6	0.546 9
			-17.559 8	-14.621 7	2.938 1	2.930 1
9	200	(-20,-20,30,60,20)	2 887.717 8	2 889.287 3	1.569 5	1.571 4
			-1 147.528 7	-1 146.535 3	0.993 4	0.996 8
			-138.500 0	-138.319 6	0.180 4	0.169 1
10	300	(-30,-30,40,60,30)	2 517.6824	2 519.518 9	1.836 5	1.8392
			-1 687.7951	-1687.432 4	0.362 7	0.3655
			-38.5000	-38.762 7	-0.262 7	-0.2730
11	400	(-30,-30,60,50,40)	2 502.842 6	2 505.099 8	2.257 2	2.260 1
			-1 388.083 1	-1 387.314 6	0.768 5	0.772 2
			-35.167 2	-34.573 6	0.593 6	0.580 9
12	500	(-40,-50,-60,40,50)	491.240 1	492.107 7	0.8676	0.862 0
			-2 043.928 7	-2 044.486	-0.557 2	-0.563 6
			-18.612 1	-23.900 0	-5.287 9	-5.288 4
13	600	(-50,60,-20,30,60)	2 486.471 9	2487.882 2	1.410 3	1.411 3
			-870.371 4	-869.547 8	0.823 6	0.825 4
			13.700 8	15.557 1	1.856 3	1.846 8
14	700	(-60,40,-10,20,70)	2 106.793 8	2 108.958 4	2.164 6	2.164 0
			-1 611.242 6	-1 611.095 6	0.147 0	0.147 2
			63.828 1	64.456 8	0.628 7	0.619 1
15	800	(60,-40,0,10,60)	2 038.101 2	2 037.979 7	-0.121 5	-0.119 9
			1 489.862 5	1 491.123 6	1.261 1	1.255 4
			133.285 2	131.826 8	-1.458 6	-1.465 6

分析表(1,2)中的数据,可以得出如下结论:

- (1)机械臂在每组关节运动值不同的情况下,相同的运动学参数误差产生的总的位置误差却不相同;
- (2)虽然给机械臂的运动学参数假定了一个较小

的误差值,但其带来的总误差较大;

- (3)在某些位置下, $\Delta\beta$ 对机械臂总的位置误差产生较大的影响;
- (4)通过 E 和 ΔP 相对比可知:由建立的机械臂运

动力学参数误差模型得到的结果与相应的实际误差相当接近,进一步证明了建立的机械臂运动学参数误差模型的准确。

5 结束语

本文采用矩阵法对运动学参数标定误差模型进行了建模分析,推导出运动学参数误差模型的通用形式,并添加一个微小的增量进行误差补偿;对机械臂运动学参数误差模型进行了 Matlab 仿真分析,通过仿真实验来说明所建立的误差模型是正确的,这对于提高机械臂的绝对定位精度具有参考价值。

由于本文试验用机械臂加工制作时精度较低,在下一步研究中将通过提高其加工精度,来减少其误差对绝对定位精度的影响;另外,由于该机械臂过大,使用过程中会因为自身重力而发生微量变形,下一步研究中将就减小机械臂整体尺寸的问题进行探讨。

参考文献 (References):

- [1] 李定坤,叶声华,任永杰,等. 机器人定位精度标定技术的研究[J]. 计量学报,2007,28(3):224-227.
- [2] SUN L, SUN W W, LIU J T, et al. A human-assisted based visual servo approach for tele-assembly[C]. Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian;IEEE, 2006.
- [3] WANG K S. Application of genetic algorithms to robot kinematics calibration[J]. *International Journal of Systems Science*, 2009,40(2):147-153.
- [4] JORGE S,JOSE-ANTONIO Y, ROBERTO J, et al. Calibration-based thermal error model for articulated arm coordinate measuring machines [J]. *Precision Engineering*, 2009,33(4):476-485.
- [5] GAUTIER M,JANOT A, VANDANJON P O. DIDIM: a new method for the dynamic identification of robots from only torque data [C]. Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, Pasadena;IEEE, 2008.
- [6] DANIEL G M, JOAQUIN B, EDUARDO C, et al. Influence of human factor in the AACMM performance: a new evaluation methodology [J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2014,15(7):1283-1291.
- [7] 王东署. 工业机器人标定技术研究[D]. 沈阳:东北大学信息科学与工程学院,2006.
- [8] 杨小磊. SR165 型工业机器人可靠性分析与运动学标定[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2015.
- [9] 刘志,赵正大,谢颖,等. 考虑结构变形的机器人运动学标定及补偿[J]. *机器人*,2015,37(3):376-384.
- [10] 王一. 测量机器人模型误差及标定方法的研究[D]. 天津:天津大学精密仪器与光电子工程学院,2006.
- [11] 阎华,刘桂雄,郑时雄. 机器人位姿误差建模方法综述[J]. *机床与液压*,2000(1):3-5,2
- [12] 王可,宋天皎,孙兴伟,等. 基于最小区域的平面内直线度误差评定方法可视的设计[J]. *机械*,2016(3):6-8,19.
- [13] 薛志奇. 基于线误差的机器人自身参数标定研究[D]. 天津:天津工业大学机械工程学院,2017.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

王宪伦,安立雄,张海洲. 基于运动学参数标定方法的机械臂误差分析与仿真研究[J]. *机电工程*,2019,36(2):109-116.

WANG Xian-lun, AN Li-xiong, ZHANG Hai-zhou. Error analysis and simulation of manipulator based on kinematics parameter calibration method[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(2):109-116.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn