

利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法*

任永杰 郝继贵 杨学友 叶声华

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072)

摘要: 提出一种简单的利用激光跟踪仪和线性方程最小二乘解对机器人进行标定的方法。通过将机器人运动学方程线性化, 建立机器人末端凸缘盘位置误差与连杆 D-H 参数误差的关系方程。利用激光跟踪仪确定机器人的基坐标系, 并通过圆周法求解每个关节电动机的直线方程, 进而可以求得机器人的连杆扭角。通过激光跟踪仪测量机器人目标点的坐标值, 并通过串口获得机器人 6 根轴的角度值建立标定方程。通过求解此方程, 获得机器人的实际 D-H 参数, 并将此参数应用于修正系统的运动学模型, 能够提高机器人的绝对精度。最后对解算过程中的误差和原因进行说明, 并对机器人的误差原因进行分析, 指出标定过程中需要注意和改进的几个问题。

关键词: 机器人 定位精度 标定 激光跟踪仪

中图分类号: TP24

0 前言

通常机器人的重复定位精度很高(可达 0.01 mm), 但绝对定位精度很差(仅几个毫米)。如果要使用机器人的离线编程方法或者是进行高精度测量, 机器人的位置精度将会是一个非常令人关心的问题。机器人末端执行器的位姿一般在其工作空间内描述, 但是这些位置通过驱动关节电动机获得, 整个过程在角度空间里进行。一些原因(例如: 机械加工的精度、装配误差、磨损、传动误差、负载变化和环境影响等)使得机器人控制器所使用的运动学模型与真实的运动学模型不一致, 从而导致用机器人内部运动学模型来驱动关节电动机获得末端执行器位置的方法, 得到的机器人的实际位置将会偏离预期的位置。有研究表明: 几乎 95% 的机器人位置误差都是由机器人内部运动学的不准确描述引起的^[1]。对机器人运动学模型的校准, 国内外已经提出了很多方法, 如在原有 D-H 运动学模型的基础上增加一个额外的 $R(y, p)$ 参数进行标定^[2]; 使用 S-模型对机器人进行建模, 每个连杆 6 个参数, 然后再把这些参数转化成 D-H 参数进行标定^[3]; 利用遗传算法确定能使退化矩阵条件数或 Fisher 信息矩阵的对数留数最小的轨迹, 通过规矩来评估机器人的参数^[4]; 通过一个可变 D-H 连杆参数模型, 校准误差在整个机器人的工作空间内都有所改善^[5]。还有机器人标定的一些其他方法, 如圆周点法、运用视觉自动标定方法和神经网络法等^[6]。标定是建模、测量、参数识别和误差集成过程,

前述方法有的模型过于复杂因而不好建立, 有的使用的算法过于复杂而不好求解。

本文提出一种简单方法, 利用跟踪仪和线性方程最小二乘解法相配合的方法对瑞士 ABB 公司的 6R 型 IRB2400 机器人进行误差估计, 通过试验比较可以将机器人的位置精度提高一倍以上, 同时还对标定过程中产生的误差和原因进行阐述。

1 机器人标定原理

IRB2400 机器人是一种开环运动结构, 通过角度测量装置可以确定每根轴的角度值。在每根轴上建立相应的齐次方程而构建机器人的运动模型, 就可以确定机器人的末端位置和姿态(相对于机器人的基座)。由于机器人的各个连杆参数和角度参数存在一定误差, 从而导致了机器人的末端位姿不准确。为了简单起见, 仅就位置误差进行标定。

确定机器人每根轴的齐次变换矩阵需要连杆长度 a 、连杆偏置 d 、连杆扭角 α 、轴的转角 θ 4 个参数。通过将这些齐次矩阵联乘, 就可以确定机器人末端的位姿 P

$$P = F(a, d, \alpha, \theta) \quad (1)$$

由于连杆转角通过轴的角度测量装置来获得, 其他 3 个参数由机器人生产和装配工艺确定, 必然存在误差, 而导致 a 、 d 、 α 、 θ 存在误差 Δa 、 Δd 、 $\Delta \alpha$ 、 $\Delta \theta$, 机器人末端实际位姿是

$$P' = F(a + \Delta a, d + \Delta d, \alpha + \Delta \alpha, \theta + \Delta \theta) \quad (2)$$

$$\Delta P = P - P' \quad (3)$$

当这些误差都比较小时, 可以简化成相应的线性方程

* 国家自然科学基金资助项目(50327501)。20060625 收到初稿, 20070412 收到修改稿

$$\Delta \mathbf{P} = \frac{\partial F}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial F}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial F}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial F}{\partial \theta} \Delta \theta \quad (4)$$

对于 6R 机器人 IRB2400, 式(4)中 ∂a 可以代表 ∂a_1 、 ∂a_2 、 ∂a_3 、 ∂a_4 、 ∂a_5 、 ∂a_6 , ∂d 、 $\partial \alpha$ 、 $\partial \theta$ 同此约定。由于在建立运动学方程的过程中带入未知角度来求解系数矩阵比较复杂, 为了简化问题, 将用测量所得的连杆扭角值来代替理论的连杆扭角值(方法见第 3.2、3.3 节), 同时认为通过机器人码盘读取的每根轴的转角值不存在误差, 也即认为式(4)中的后两项的微变化量 $\Delta \alpha$ 、 $\Delta \theta$ 为 0, 所以式(4)可以变换为

$$\Delta \mathbf{P} = \frac{\partial F}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial F}{\partial d} \Delta d \quad (5)$$

由于机器人 IRB2400 存在 6 个连杆长度参数和 6 个连杆偏置参数, 根据式(5)可以得到空间任一位姿 P_i 时的方程

$$\begin{cases} \Delta P_{ix} = \frac{\partial F_{ix}}{\partial a_1} \Delta a_1 + \dots + \frac{\partial F_{ix}}{\partial a_6} \Delta a_6 + \frac{\partial F_{ix}}{\partial d_1} \Delta d_1 + \dots + \frac{\partial F_{ix}}{\partial d_6} \Delta d_6 \\ \Delta P_{iy} = \frac{\partial F_{iy}}{\partial a_1} \Delta a_1 + \dots + \frac{\partial F_{iy}}{\partial a_6} \Delta a_6 + \frac{\partial F_{iy}}{\partial d_1} \Delta d_1 + \dots + \frac{\partial F_{iy}}{\partial d_6} \Delta d_6 \\ \Delta P_{iz} = \frac{\partial F_{iz}}{\partial a_1} \Delta a_1 + \dots + \frac{\partial F_{iz}}{\partial a_6} \Delta a_6 + \frac{\partial F_{iz}}{\partial d_1} \Delta d_1 + \dots + \frac{\partial F_{iz}}{\partial d_6} \Delta d_6 \end{cases} \quad (6)$$

式中 ΔP_{ix} 、 ΔP_{iy} 、 ΔP_{iz} —— P_i 在 x 、 y 、 z 三个方向上的偏差

若测量了空间中 n 个点的坐标, 将会得到式(7)(也即将式(6)转换为矩阵形式)

$$\mathbf{A} \Delta \mathbf{X} = \mathbf{b} \quad (7)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_{1x}}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial F_{1x}}{\partial a_6} & \frac{\partial F_{1x}}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial F_{1x}}{\partial d_6} \\ \frac{\partial F_{1y}}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial F_{1y}}{\partial a_6} & \frac{\partial F_{1y}}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial F_{1y}}{\partial d_6} \\ \frac{\partial F_{1z}}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial F_{1z}}{\partial a_6} & \frac{\partial F_{1z}}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial F_{1z}}{\partial d_6} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_{nz}}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial F_{nz}}{\partial a_6} & \frac{\partial F_{nz}}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial F_{nz}}{\partial d_6} \end{pmatrix}_{3n \times 12} \quad (8)$$

$$\mathbf{b} = (\Delta P_{1x} \ \Delta P_{1y} \ \Delta P_{1z} \ \Delta P_{2x} \ \Delta P_{2y} \ \Delta P_{2z} \ \dots \ \Delta P_{nx} \ \Delta P_{ny} \ \Delta P_{nz})^T \quad (9)$$

$$\Delta \mathbf{X} = (\Delta a_1 \ \dots \ \Delta a_6 \ \Delta d_1 \ \dots \ \Delta d_6)^T \quad (10)$$

只要保证 n 取得足够大, 就可以利用最小二乘法求得 $\Delta \mathbf{X}$ 的最佳值

$$\Delta \mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (11)$$

在式(11)中, \mathbf{A} 是关于 6 根轴角度的函数, 是常见的雅可比矩阵的一种变形形式, \mathbf{b} 是偏差矩阵。

将所求的连杆参数误差 $\Delta \mathbf{X}$ 加到机器人给出的连杆参数上, 就可以得到新的一组连杆参数, 根据这些新的连杆参数重新求解误差, 反复进行迭代, 直到 ΔP_x 、 ΔP_y 、 ΔP_z 足够小为止。为此, 只要能够实际测量出机器人控制点在机器人基坐标系下的偏差值 $\Delta \mathbf{P}$, 也即 \mathbf{b} , 就可以通过式(11)来求解机器人的连杆参数, 从而达到标定的目的。

2 机器人标定方法

2.1 通过激光跟踪仪测量方法确定机器人基坐标系

试验所用测量设备为美国 FARO 公司的 Xi 系列激光跟踪仪, 它通过内置的激光干涉器、红外线激光发射器、光靶反射球测量长度, 光栅编码器测量水平和仰视角度来实现三维空间物体的测量。3D 单点精度在 2 m 范围内为 0.033 mm, 10 m 范围内不超过 0.05 mm, 可以满足测量精度的要求。为测量大小不同的工件, 跟踪仪配套有不同直径的精密反射靶球, 且定位误差和反射靶球的大小和位置没有关系。测量时将跟踪仪尽量放置在机器人的附近, 以提高测量精度。

试验采用 ABB 公司的 IRB2400 机器人, 它的基本结构简图如图 1 所示, 是一个 6 根轴都是回转轴的机器人。根据 ABB 公司的技术文档, 机器人的基坐标系位于机器人的安装基座的中心上, 垂直向上为 z 轴, 正前方为 x 轴。为此用以下的方法来确定机器人的基坐标系。

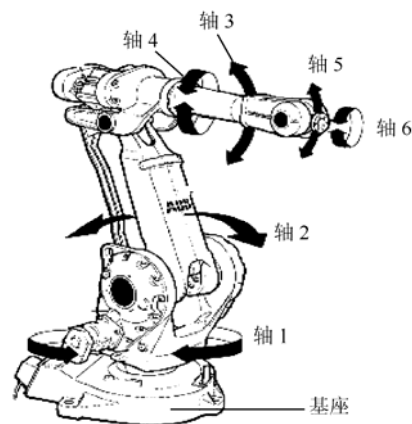


图 1 IRB2400 结构简图

(1) 旋转轴 1, 其他轴的角度保持不变, 每隔一定角度运用激光跟踪仪测量机器人末端凸缘盘上固

定点的坐标值，根据这些坐标点拟合出一个圆 1。

(2) 旋转轴 2，其他轴的角度保持不变，每隔一定角度运用激光跟踪仪测量机器人手臂上一固定点的坐标值，根据这些坐标点拟合出一个平面 2。

(3) 测量基座所在的平面 B。

(4) 根据圆 1 的法线和平面 B 的交点作为原点，平面 2 和平面 B 的交线作为 x 轴，圆 1 的法线作为 z 轴，建立机器人的基坐标系。

建立机器人的基坐标系后，通过跟踪仪的测量软件将测量坐标系转移到机器人的基座上，以后所测量的值都是在机器人基坐标系下的值。

2.2 旋转关节轴线方程

本文利用圆周法计算出机器人关节旋转轴线的方程，它是连杆参数也即连杆坐标系的标定依据。圆周法如图 2 所示：保持各关节电动机不动，由跟踪仪测出机器人末端凸缘盘上特征 P 点的空间位置 P₀，接着，对固定在机器人底座上的关节电动机 1 分别施加正向力矩和反向力矩，使连杆 1 负向转角 δ₁、正向转角 δ₂。转角大小只与测量精度有关，而不会影响后面的轴线方程的计算结果。为提高测量精度，转角应尽量在关节变量范围内取大一些。旋转后 P 点相应的空间位置坐标分别记为 P₁、P₂。

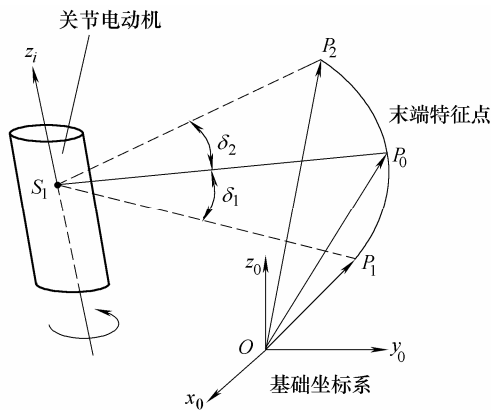


图 2 圆周法示意图

电动机旋转方向 z₁ 垂直于 P₀、P₁、P₂ 三点所决定的空间圆平面

$$z_1 = c[(P_1 - P_0) \times (P_2 - P_0)] \quad (12)$$

式中 P_i —— P_i 点的方向矢量

c —— 比例系数

该圆的圆心 S₁ 必然落在关节电动机 1 的旋转轴线上，这样由 z₁、S₁ 可以确定电动机 1 旋转轴线的法式直线方程，记为 L₁(z₁, S₁)。

交点 S₁(x, y, z) 的坐标方程是

$$\begin{cases} \frac{x-x_1}{l_1} = \frac{y-y_1}{m_1} = \frac{z-z_1}{n_1} \\ \frac{x-x_2}{l_2} = \frac{y-y_2}{m_2} = \frac{z-z_2}{n_2} \end{cases} \quad (13)$$

式中 v₁ = [l₁, m₁, n₁] = c[(P₁ - P₀) × z₁]

v₂ = [l₂, m₂, n₂] = c[(P₂ - P₀) × z₁]

c —— 比例系数

a₁ = (x₁, y₁, z₁) = (P₁ + P₀)/2

a₂ = (x₂, y₂, z₂) = (P₂ + P₀)/2

对其他关节重复进行上述步骤，可以得到机械臂转动关节的旋转轴线方程 L_i(z_i, S_i)，其中 i 为机械臂的关节记号。

2.3 计算关节参数

已知关节电动机的轴线方程 L_i、L_j，根据空间两条直线的位置关系方程可求得它们之间的夹角 θ。假设 L_i 的方向矢量为 v_i = (l_i, m_i, n_i)，L_j 的方向矢量为 v_j = (l_j, m_j, n_j)，可以按照式(14)计算两直线的夹角

$$\cos \theta = \frac{|l_i l_j + m_i m_j + n_i n_j|}{\sqrt{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2} \sqrt{l_j^2 + m_j^2 + n_j^2}} \quad (14)$$

通过式(14)就可以确定机器人运动学模型中的连杆参数，如连杆扭角。

2.4 IRB2400 机器人运动学方程

建立 IRB2400 机器人 D-H 模型的连杆坐标系，如图 3 所示，连杆理论参数见表 1。

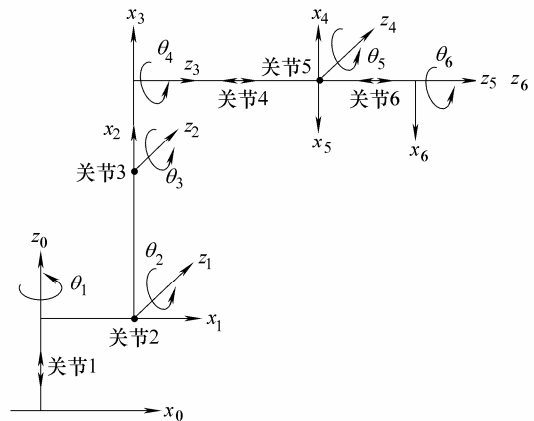


图 3 IRB2400 机器人 D-H 模型连杆坐标系

相应的坐标系转换矩阵为 T_i (i=1~6)

$$T_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

末端凸缘盘中心点相对于机器人基坐标系的转换矩阵为

$$F = \prod_{i=1}^6 T_i \quad (16)$$

表 1 IRB2400 机器连杆理论参数

序号	转角 $\theta/(^\circ)$	偏置值 d/mm	连杆长度 a/mm	连杆扭角 $\alpha/(^\circ)$
1	-180~180	615	100	-90
2	-100~110	0	705	0
3	-60~65	0	135	90
4	-200~200	755	0	90
5	-120~120	0	0	90
6	-400~400	85	0	0

2.5 标定步骤

根据前文所述的标定方法，可以总结机器人标定的流程如图 4 所示。

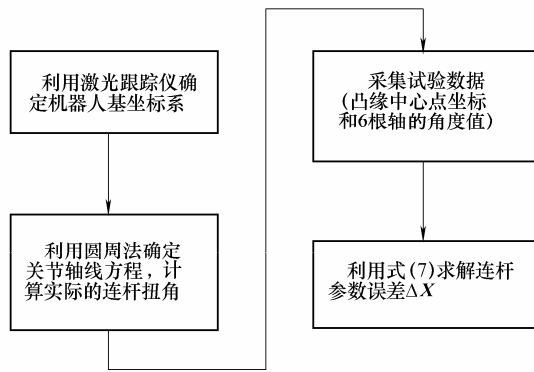


图 4 机器人标定流程图

3 机器人标定数据与分析

3.1 标定结果

试验所用主要设备如图 5 所示，在标定试验过程中，测量了空间的 20 个点，目标点为末端凸缘盘的中心点，并通过串口通信取得机器人 6 根轴的角度值，如表 2 所示。用其中的后 15 个点建立矩阵方程，另外的前 5 个点来验证结果。

将 6 根轴的角度值带入式(16)即可求得末端凸缘盘中心点在机器人基坐标系下的理论位置，将其与表 2 中的用跟踪仪测量的坐标值相减，即可求得机器人的位置偏差 ΔP (相当于式(7)中的 b)。将角度值带入式(8)可以求得系数矩阵 A ，从而根据式(11)求得机器人连杆参数修正值。



图 5 试验设备现场

表 2 跟踪仪测量值和机器人角度值

序号	跟踪仪测点的坐标值			6 根轴的角度值					
	x/mm	y/mm	z/mm	$\theta_1/(^\circ)$	$\theta_2/(^\circ)$	$\theta_3/(^\circ)$	$\theta_4/(^\circ)$	$\theta_5/(^\circ)$	$\theta_6/(^\circ)$
1	1 138.409 4	8.090 8	1 159.956 8	0.730 769	19.512 4	23.555 3	-16.876 6	-69.700 9	14.423 8
2	1 016.056 4	143.315 8	1 058.724 8	8.711 71	13.384 5	33.355 8	8.228 26	-79.123 2	34.747 3
3	883.502 1	356.422 7	1 108.631 0	23.595 3	5.754 4	29.983 5	19.397 2	-71.673 7	34.733 5
4	376.377 3	891.356 7	1 101.671 8	70.336 4	7.713 55	29.551 1	41.616 3	-75.541 6	24.540 1
5	230.464 2	1 073.055 2	1 101.816 7	81.150 1	18.622 1	27.150 2	48.546 8	-80.610 7	15.929 6
6	148.961 9	819.770 7	1 101.352 3	84.139 9	-1.949 18	30.025 7	49.918 5	-84.48	16.399
7	-19.588 7	819.771 4	1 101.290 3	96.285 3	-1.900 12	30.025 8	56.156 1	-92.888 4	10.076
8	-15.076 7	956.228 5	1 065.472 3	95.463 7	7.639 52	29.559 5	72.351 4	-70.322 9	10.016 9
9	-137.674 5	1 077.927 6	1 109.239 8	101.469	17.43 09	24.123 7	77.201 2	-74.090 7	3.027 29
10	-198.181 9	953.005 6	1 212.803 3	106.559	7.298 03	18.260 4	80.725 3	-77.635 5	-3.837
11	-228.605 2	1 036.960 9	1 147.003 0	106.848	15.357 5	21.778 0	80.099 6	-78.490 8	-0.325 892
12	-361.027 3	1 110.426 3	1 097.119 4	112.108	25.332 6	22.340 3	82.101 8	-83.395 6	-0.530 363
13	-480.432 3	900.493 1	1 219.955 9	122.596	10.510 5	16.581 6	85.853 1	-71.930 1	-7.276 84
14	-611.823 8	915.215 9	1 220.007 3	128.062	17.714 6	14.960 8	87.865 4	-77.137	-9.247 89
15	785.374 7	91.455 2	1 050.262 6	6.243 18	-5.4261 4	35.036 1	-3.998 32	-77.13	-31.593 5
16	806.234 7	-129.795 3	1 088.138 3	-10.795 5	-4.2736 9	32.051 7	-16.844 4	-76.780 7	-16.714 2
17	946.029 3	-354.064 9	1 005.455 7	-22.491 2	14.372 4	37.220 5	-24.664 6	-85.022 7	-9.451 36
18	943.663 7	-505.316 9	993.053 0	-30.602 2	19.056 4	36.274 1	-33.217 2	-81.819 2	-5.111 51
19	841.559 6	-738.279 6	987.086 5	-44.68	24.341 1	34.291 5	-52.622 4	-91.257	4.520 3
20	463.885 6	-601.709 4	986.439 9	-57.753 7	-1.839 69	39.506 3	-60.322 8	-102.829	5.981 63

用 Matlab 进行解算，解算结果为

$$\Delta X = [a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6] = [99.395, 706.064, 133.634, 0.187, -0.312, 0.062, 615.507, -0.099, -0.099, 756.071, -0.096, 84.233]$$

对于前 5 个点，修正前后的末端凸缘盘中心点在机器人基坐标系下的坐标值如表 3 所示。将表 2、3 中的跟踪仪测点的前 5 组数据对比，可得到修正前后的误差，如表 4、5 所示。

表 3 修正前后中心点在机器人基坐标系下坐标数据

修正前的值			修正后的值		
x/mm	y/mm	z/mm	x/mm	y/mm	z/mm
1 139.230	8.603 63	1 159.68	1 138.798 5	8.216 6	1 159.346 5
1 016.920	143.737	1 058.65	1 016.040 1	143.417 1	1 058.270 1
884.395	357.039	1 108.65	883.535 8	356.566 7	1 108.334 1
376.804	892.033	1 101.75	376.464 9	891.312 3	1 101.457 0
230.739	1 073.450	1 101.77	230.538 7	1 073.062 2	1 101.378 8

表 4 修正前跟踪仪器点误差

D_x/mm	D_y/mm	D_z/mm	D/mm
0.821 6	0.512 8	-0.276 8	1.007 3
0.863 7	0.421 2	-0.074 8	0.963 8
0.892 9	0.616 3	0.315 9	1.130 0
0.426 7	0.676 3	0.078 2	0.803 5
0.274 8	0.394 8	-0.046 7	0.483 3

表 5 修正后跟踪仪器点误差

D_x/mm	D_y/mm	D_z/mm	D/mm
0.390 0	0.125 8	-0.610 3	0.735 1
-0.016 3	0.101 3	-0.454 6	0.466 0
0.033 7	0.144 0	-0.296 9	0.331 7
0.087 6	-0.044 4	-0.214 8	0.236 2
0.074 5	0.007 0	-0.437 9	0.444 2

可以看出标定后，机器人的定位精度得到了明显的改善，标定前定位精度 D 的平均误差 $\bar{D} = 0.877 58$ 、标准方差 $S^2 = 0.249 5$ ；修正后，定位精度 D 的平均误差 $\bar{D} = 0.442 6$ ，标准方差 $S^2 = 0.187 8$ ，精度提高了一倍。而且通过表 2~5 中数据可以看出 x 、 y 、 z 的单方向的跳动值(最大最小值的差)由原来的 0.618 1、0.281 5、0.592 7 减小为 0.406 3、0.188 4、0.395 5。由于在采集数据的过程中，激光跟踪仪需要从反射靶球接受返回的激光，机器人在 z 方向的运动范围受到限制，因而训练数据的 z 方向范围空间太小，训练数据的样本空间遍历性不够，导致修正后表 5 中 D_z 列数据有所增加。

3.2 算法分析

在实际的运算过程中，系数矩阵 A 为一个 45×12 阶的矩阵，它的秩为 11，用式(11)求解是先将方程转化为正则方程后再求解。因为 $A^T A$ 不满秩，所以无法用 $\text{inv}(A^T A)$ 求逆的方法解矩阵方程，否则

将会得不到数值解。

本文使用的是广义逆的求解方法，建立在奇异分解基础上，得到的是最小范数最小二乘解，解的 2-范数残差为 0.246 7。观察矩阵 A ，它的第 8、9 列线性相关，所以它的条件数很大，经计算为 $1.782 897 \times 10^{16}$ 。如果将其中的一列去掉，条件数则减小为 50.259 9。很大的条件数对于解矩阵方程是不利的，其主要原因是在建立矩阵方程 T_i 时，序号 2、3 的参数间有一定的关系，应该在解方程的过程中注意这一点。

3.3 误差分析

由于须要使用特殊的测量设备(激光跟踪仪)来获得试验数据，并且须要较长的操作时间，所以比较适合适于在实验室环境下进行标定，而不适合进行现场标定。同时，在标定过程中忽略了每根轴角度值误差的影响，因而存在一定的局限性，须要进一步完善。经过进一步的分析和研究，可以得出机器人定位精度还受以下两个方面的影响，IRB2400 机器人关节传动过程中四杆机构对角度的影响；机器人连杆的自重和机器人载重以及运动速度的影响。

(1) 在机器人运动过程中第二根轴转动的角度会通过四杆机构传递给第三根轴，理论上这一个四杆机构是一个平行四边形，因此第二根轴转动的角度会通过这个机构传递给第三轴，即第三根轴转动的角度为 $\theta_3 - \theta_2$ (θ_2 和 θ_3 为机器人的二轴和三轴的码盘读数)。而由于这个四杆机构并不能完全保证是平行四边形，因此第二根轴通过四杆机构传递给对第三根轴的角度并不是 $-\theta_2$ 。

(2) 机器人各个连杆自重的影响。由于机器人的连杆比较重，当机器人运动到不同的角度，电动机受到的力矩不同，因此引起的角度偏差也不相同。

4 结论

机器人的标定过程是一个非常复杂的过程，由于本文只是从机器人运动学模型方面来修正机器人定位误差，精度虽然提高了一倍，但此定位精度仍然无法满足实际的要求。从以上分析可以看出，机器人定位精度标定技术的研究必须进一步完成如下工作。

(1) 建立合理的四杆机构传递模型。进一步分析四杆传递机构的模型，建立二、三轴的齐次变换关系式，并通过微分变换或者其他的形式确定四杆传递机构与机器人定位精度的影响关系式，找出合理的标定方法。

(2) 使机器人运动更广的范围来提高参数识别

的准确性。可以考虑将重力因素 g 作为机器人连杆参量的参数带入方程中, 一起求解。

(3) 通过多组数据和改进测量方法来提高参数识别的准确性。

参 考 文 献

- [1] JUDD R P, KNASINSKI A B. A technique to calibrate industrial robots with experimental verification[J]. IEEE Trans. on Robotics & Automation, 1991, 6(1): 20-30.
- [2] VEITSCHEGGER W K, WU C H. Robot accuracy analysis based on kinematics[J]. IEEE J. Robotics Automat., 1986, RA-2(3): 171-179.
- [3] STONE H W, SANDERSON A C, NEUMAN C P. Arm signature identification[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 7-10, 1986, San Francisco, USA. New York: IEEE, 1986: 41-48.
- [4] CALAFIORE G, INDRI M, BONA B. Robot dynamic calibration: optimal excitation trajectories and experimental parameter estimation [J]. Journal of Robotic System, 2001, 18(2): 55-68.
- [5] KUU Y Y, CHEN J J, WANG C C. An automated robot calibration system based on a variable D-H parameter model[C]//Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control, December 11-13, 1996, Kobe, Japan. New York: IEEE, 1996: 881-886.
- [6] NEWMAN W S, CRAIG E B, ROBERT J H. Calibration of a motoman P8 robot based on laser tracking[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 24-28, 2000, San Francisco, USA. New York: IEEE, 2000: 3 597-3 602.

METHOD OF ROBOT CALIBRATION BASED ON LASER TRACKER

REN Yongjie ZHU Jigui YANG Xueyou
YE Shenghua

(State Key Laboratory of Precision Measuring
Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: A simple method of robot calibration based on laser tracker and least square solution of linear equation is presented. Using the method of linearizing equation, the relational equation between robot end flange position error and link D-H parameter error is established. The robot base coordinate system is established by laser tracer, and each linear equation of joint motor is obtained via the method of circle, then joint twist is solved. At the same time, the robot coordinate values are measured by laser tracker, and six axes angles are obtained through serial port. The real D-H parameters are obtained by solving calibration equation. Then these parameters are used in the kinematics model of corrected system, and to improve the robot's absolute accuracy. In the end, the error and reason of the solution are explained clearly. The reason of robot error is analyzed, and some problems needing attention and improving in the process of calibration are put forward.

Key words: Robot Location accuracy
Calibration Laser tracker

作者简介: 任永杰, 男, 1975 年出生, 博士研究生。主要研究方向为检测与控制、机器人运动控制及机器人测量。

E-mail: ryj_tj@126.com