

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.10.003

联合实验和仿真的机器人参数标定*

王 栋¹, 曹 彤^{1*}, 宋 虎¹, 刘 达², 倪自强²

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083; 2. 北京航空航天大学 机器人研究所, 北京 100191)

摘要: 针对医疗机器人调试过程中必须通过可靠的方法获得准确关节参数的问题,将联合实验和仿真的机器人参数标定这一技术应用到机器人的调试过程中。开展了对医疗机器人结构和运动学模型的分析,建立了运动学模型和关节参数之间的关系,提出了联合实验和仿真以得到准确关节参数的方法;分别控制机器人的单一关节运动,并同时记录针尖点的位置坐标,利用最小二乘法对数据进行处理,得到了关节轴线的表达式和连接点的坐标,通过仿真得到了与实际样机高度吻合的运动学模型,并通过空间计算得到了准确的关节参数;最后以定位精度为评估指标,多次使用该方法对医疗机器人进行了实验验证。实验结果表明,机器人的最终精度均能锁定在1 mm以内,该方法具有可靠性与工程实用性。

关键词: 机器人; 参数标定; 精度; 仿真

中图分类号: TH772; TP242.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)10-1182-06

Robot parameters calibration combining experiment and simulation

WANG Dong¹, CAO Tong¹, SONG Hu¹, LIU Da², NI Zi-qiang²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Robotics Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the problem that the accurate joint parameters must be obtained by reliable method during medical robot debugging process, the technology of robot calibration combined experiment and simulation was applied in robot debugging. After the analysis of the structure and kinematics model of medical robot, the relationship between the kinematics model and the joint parameters was established, and the method that combined experiment and simulation to get the accurate joint parameters was presented. Each joint of the robot was respectively controlled, and the position of tip point was recorded, and the data was processed with the least square method, then the expression of joint axis and the coordinate of the connection point were obtained. So the kinematics model highly consistent with the actual prototype was gotten with simulation, and the accurate joint parameters were obtained with space calculation. The positioning precision was regarded as evaluation index, and the method was repeatedly used to medical robot for experiment. The experimental results indicate that the final precision of the robot is all locked within 1 millimeter. The method is reliable and engineering practical.

Key words: robot; parameter calibration; precision; simulation

0 引 言

随着科学技术的快速发展,机器人已经广泛应用于各个领域。该领域的发展也对其精度提出了更高的要求,尤其是应用于临床的医疗机器人更要注重精

度,这也是病人的生命财产安全对医疗机器人提出的必然要求,因此有必要通过标定手段提高其精度。

医疗机器人一般采用低速运动方式,其误差主要来源于零部件的制造和装配。为了减小误差,可以考虑提高机器人的制造、装配精度或者辨识出已成型机

收稿日期: 2013-05-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2009AA045301)

作者简介: 王 栋(1988-),男,江苏徐州人,主要从事医疗机器人技术方面的研究。E-mail: wangdong19880315@yahoo.cn

通信联系人: 曹 彤,女,副教授,硕士生导师。E-mail: caotong1601@163.com

机器人的关节参数,综合考虑后,选择便捷、实用的参数辨识的思路。近些年,国内外出现了轴线测量法^[1-4]、神经网络^[5-7]、遗传算法^[8]等现代标定技术,但这些方法或多或少存在一定的弊端,譬如精度提高不显著、学习效率低、易于陷入局部最优等。

相比于传统的机器人的参数辨识,出于省时、省事而且具有实效性的考虑,基于最小二乘法对数据的处理,本研究采用联合实验和仿真的方法得到与实际机器人结构相符的运动学模型,进而通过空间计算得到真实关节参数,并最终将机器人的精度锁定在1 mm以内,从而保证手术的安全性。

1 标定原理

机器人的定位误差来源于实际DH参数和理论数值存在偏差,归根到底是实际的DH模型跟理论模型存在偏差^[9],所以通常都采用一系列标定方法,旨在得到机器人的实际DH模型,故本研究借助光学摄像头,采取光学标定方法^[10],基于最小二乘法对数据的处理,最终得到机器人实际的DH运动学模型,并通过空间几何计算得到该机器人的实际DH参数。

考虑到可操作性和方便性,本研究选择轴线测量法^[11]进行标定,测量工具是精度为0.015 mm的双目摄像头,对脑外科机器人进行几何结构参数辨识的方案如下:

(1) 控制各关节运动到机械零位。

(2) 对于移动关节,在其他关节均处于机械零位并保持不变的情况下,控制该关节按一定的步长移动,每运动到一个位置时,用双目摄像头测量并记录下机器人针尖点的位置坐标,然后对测得数据进行空间直线的拟合,便可求得关节轴线。

(3) 对于转动关节,在其他关节均处于机械零位并保持不变的情况下,控制该关节按一定的步长转动,每运动到一个位置时,用双目摄像头测量并记录下机器人针尖点的位置坐标,然后对测得数据进行空间球面和平面的拟合,便可求得通过球心且垂直于平面的关节轴线和圆心坐标。

(4) 由一系列拟合得到的关节轴线和圆心坐标,便可建立机器人的实际DH模型,从而求得脑外科机器人的实际结构参数。

其中对于第1个平移关节,可以对测量的点进行空间直线的拟合,拟合得到的空间直线就可以认为是第1个关节轴线在针尖点处的平行线。其余各个转动关节测得的点,在理想情况下,同属于一个关节的点应该在同一个圆上,但是实际上,这些点更近似是在同一个球面上,所以笔者利用这些点来拟合得到一个球面和一个平面,通过拟合球面的球心且垂

直于拟合平面的法线即可认为是该转动关节的轴线,该轴线与拟合平面的交点即可认为是机器人杆件和轴线的连接点^[12]。

在对上述图形进行拟合时,本研究采用最小二乘法对测得的数据进行处理,并得到了图形的表达式。

具体方法如下:

对于空间直线的拟合:空间直线的方程可以化简成 $(x-x_0)/a=(y-y_0)/b=z/1$,要求的参数是 x_0, y_0, a, b 。

直线方程可以表示为:

$$\begin{cases} x=x_0+az \\ y=y_0+bz \end{cases} \quad (1)$$

用矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} a & x_0 \\ b & y_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2)$$

当有 n 个点时,第 i 个点的方程为:

$$\begin{bmatrix} a & x_0 \\ b & y_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

并联 n 个方程,得:

$$\begin{bmatrix} a & x_0 \\ b & y_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \cdots z_n \\ 1 \cdots 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \cdots x_n \\ y_1 \cdots y_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

最小二乘法拟合得:

$$\begin{bmatrix} a & x_0 \\ b & y_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \cdots z_n \\ 1 \cdots 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \cdots x_n \\ y_1 \cdots y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

化简为:

$$\begin{bmatrix} a & x_0 \\ b & y_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum z_i^2 & \sum z_i \\ \sum z_i & n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i z_i & \sum x_i \\ \sum y_i z_i & \sum y_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

设:

$$M = \begin{bmatrix} \sum z_i^2 & \sum z_i \\ \sum z_i & n \end{bmatrix}$$

其中, z_i 互不相等, M 非奇异,则方程有唯一解:

$$\begin{bmatrix} a & x_0 \\ b & y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i z_i & \sum x_i \\ \sum y_i z_i & \sum y_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum z_i^2 & \sum z_i \\ \sum z_i & n \end{bmatrix}^{-1} \quad (7)$$

对于空间平面的拟合,空间平面的方程通常可以用 $Ax+By+Cz+1=0$ 表示,当有 n 个点时,要拟合该平面,可以将表达式表示为以下矩阵的形式:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

两边左乘 $\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}^T$, 得:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

即:

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum x_i \\ -\sum y_i \\ -\sum z_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

设:

$$M = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}$$

当 M 非奇异时, 方程有唯一解:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum x_i \\ -\sum y_i \\ -\sum z_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

当 M 奇异时, $\text{rank}(M) < 3$, $M = N^T N$, 则 $\text{rank}(N) = 0, 1, 2$ 或者 3, 当 $\text{rank}(N) = 0$ 时, 矩阵 B 中所有的项都等于零, 这种情况不存在; 当 $\text{rank}(N) = 1, 2$ 或 3 时, 在矩阵 B 的标准形式中, 转化为零行的行向量与转化为非零行的行向量中的至少一个行向量线性相关, 这个问题可以通过在标定中改变步长解决。

对于空间球面的拟合, 空间球面的方程通常可以用 $(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 = R^2$ 表示, 展开得:

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2ax - 2by - 2cz + a^2 + b^2 + c^2 = R^2 \quad (12)$$

令:

$$\begin{cases} D = a^2 + b^2 + c^2 - R^2 \\ A = 2a \\ B = 2b \\ C = 2c \end{cases}$$

所以:

$$x^2 + y^2 + z^2 - Ax - By - Cz + D = 0 \quad (13)$$

即:

$$Ax + By + Cz - D = x^2 + y^2 + z^2 \quad (14)$$

当有 n 个点时, 可得:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

两边左乘 $\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & -1 \end{bmatrix}^T$, 得:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & -1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

即:

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i & -\sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i & -\sum y_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 & -\sum z_i \\ -\sum x_i & -\sum y_i & -\sum z_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \\ \sum y_i(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \\ \sum z_i(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \\ -\sum(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \end{bmatrix} \quad (17)$$

设:

$$M = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i & -\sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i & -\sum y_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 & -\sum z_i \\ -\sum x_i & -\sum y_i & -\sum z_i & n \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & -1 \end{bmatrix}.$$

当 M 非奇异时, 方程有唯一解:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i & -\sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i & -\sum y_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 & -\sum z_i \\ -\sum x_i & -\sum y_i & -\sum z_i & n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum x_i(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \\ \sum y_i(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \\ \sum z_i(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \\ -\sum(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \end{bmatrix} \quad (18)$$

当 M 奇异时, $\text{rank}(M) < 4$, $M = N^T N$, 则 $\text{rank}(N) = 1, 2, 3$ 或者 4; 当 $\text{rank}(N) = 1$ 时, 此情况不存在; 当 $\text{rank}(N) = 2, 3$ 或者 4 时, 在矩阵 N 的标准形式中, 转化为零行的行向量与转化为非零行的行向量中的至少一个行向量线性相关, 这个问题可以通过在标定中采用变步长来解决。

2 实际标定过程

脑外科机器人的 DH 运动学模型如图 1 所示。由图 1 可知, 脑外科机器人共有 5 个自由度, 其中, 第 1 关节为移动关节, 其余 4 个关节为转动关节, 其中第 1、2

关节轴名义上相互重合,2、3、4关节轴名义上互相平行,4、5关节轴名义上互相垂直。

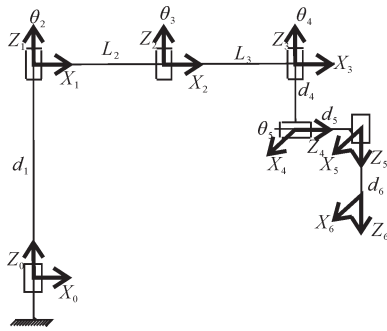


图1 脑外科机器人的DH模型

由DH模型知,脑外科机器人的理论DH参数如表1所示。

表1 脑外科机器人的理论DH参数

构件	a_i	l_i	d_i	θ_i
1	0	0	350	0
2	0	200	0	0
3	0	200	0	0
4	-90	0	-170	-90
5	-90	0	145	0
6	0	0	150	0

根据上述脑外科机器人DH参数标定原理,本研究设计了对机器人实际几何参数进行标定的详细步骤:

(1)机器人第1关节运动到负极限位置,其他关节恢复到机械零位并保持不动,第1关节从此位置以步长6.772 4 mm运动,中间停留52次,相机总共采样53组marker坐标,采集结束后,第1关节恢复到机械零位,用摄像头记录下该位置。

(2)分别转动第2、3、4、5关节,先将机器人运动到摄像头可以看到mark点的负方向的极限位置,然后以每步一度的速度间歇运动,运动到摄像头可以看到mark点的正方向的极限位置,摄像头采样mark点坐标,采点结束后,将各关节恢复到机械零位。

3 数据处理

各关节运动时摄像头测得的机器人针尖点的三维坐标如图2所示。

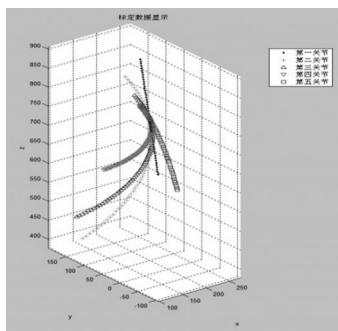


图2 标定数据显示

对第1关节的标定数据进行空间直线的拟合,拟合得到的空间直线方程为:

$$\frac{x + 998.510\ 0}{1.542\ 3} = \frac{y + 1\ 841.814\ 2}{2.442\ 4} = \frac{z}{1} \quad (19)$$

其图形如图3所示。

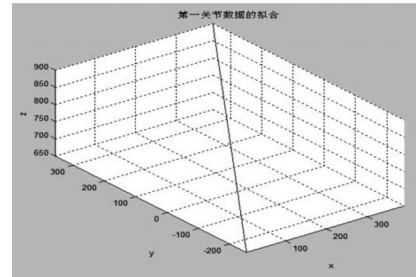


图3 第一关节数据的拟合

对第2关节的标定数据进行空间球面和空间平面的拟合,其表达式为:

$$\begin{cases} (x + 421.285)^2 + (y - 88.404)^2 + (z - 579.400)^2 = 1\ 966\ 693 \\ -0.001\ 359x - 0.002\ 164y - 0.000\ 896\ 6z + 1 = 0 \end{cases}$$

对第3关节的标定数据进行空间球面和空间平面的拟合,其表达式为:

$$\begin{cases} (x + 130.128)^2 + (y - 176.987)^2 + (z - 674.532)^2 = 1\ 637\ 988 \\ -0.001\ 363x - 0.002\ 144y - 0.000\ 896\ 6z + 1 = 0 \end{cases}$$

对第4关节的标定数据进行空间球面和空间平面的拟合,其表达式为:

$$\begin{cases} (x - 42.179)^2 + (y - 82.481)^2 + (z - 711.323)^2 = 1\ 569\ 348 \\ -0.001\ 364x - 0.002\ 164y - 0.000\ 8952z + 1 = 0 \end{cases}$$

对第5关节的标定数据进行空间球面和空间平面的拟合,其表达式为:

$$\begin{cases} (x - 50.801)^2 + (y + 39.545)^2 + (z - 701.938)^2 = 1\ 517\ 081 \\ -0.002\ 149x - 0.001\ 717y - 0.000\ 860\ 1z + 1 = 0 \end{cases}$$

拟合得到的以上4个关节的空间球面和空间平面图形如图4所示。

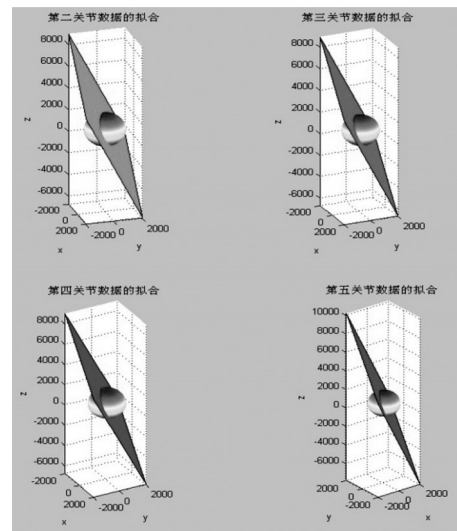


图4 4个转动关节的数据拟合

第 1 关节轴线平行于拟合得到的空间直线,方便起见,近似认作该直线,即为:

$$\frac{x+998.510\ 0}{1.542\ 3} = \frac{y+1\ 841.814\ 2}{2.442\ 4} = \frac{z}{1} \quad (20)$$

在机器人的所有关节都处于机械零位时,点 O_1 (183.225 8, 29.617 1, 766.227 6) 为近似第 1 关节轴线上的零点位置。

第 2、3、4、5 转动关节轴线近似为通过该关节拟合得到的球面的球心且垂直于拟合得到的平面的直线,通过求解可得直线方程分别为:

$$\begin{cases} \frac{x+421.285\ 4}{1.358\ 8} = \frac{y-88.404\ 4}{2.163\ 6} = \frac{z-579.399\ 7}{0.896\ 6} \\ \frac{x+130.128\ 3}{1.363\ 4} = \frac{y-176.987\ 2}{2.143\ 6} = \frac{z-674.532\ 1}{0.896\ 3} \\ \frac{x-42.178\ 9}{1.364\ 2} = \frac{y-82.480\ 7}{2.164\ 1} = \frac{z-711.322\ 9}{0.895\ 2} \\ \frac{x-50.800\ 7}{-2.148\ 7} = \frac{y+39.544\ 8}{1.717\ 1} = \frac{z-701.937\ 7}{-0.860\ 1} \end{cases} \quad (21)$$

关节轴线与拟合平面的交点分别为:

$$\begin{cases} O_2(-261.577\ 9, 342.701\ 6, 684.778\ 0) \\ O_3(-93.778\ 0, 234.136\ 9, 698.427\ 0) \\ O_4(65.797\ 1, 119.945\ 9, 726.821\ 3) \\ O_5(107.511\ 5, -84.864\ 7, 724.638\ 2) \end{cases}$$

根据已求得的关节轴线和交点,可得机器人的实际 DH 模型如图 5 所示。由最终拟合图可见,运动学模型大致与理论模型相符,只是出现了轴线、连杆的倾斜,应该是机器人后续关节的重力引起的,所以最终拟合结果符合真实运动学模型。

运动学模型最终拟合结果

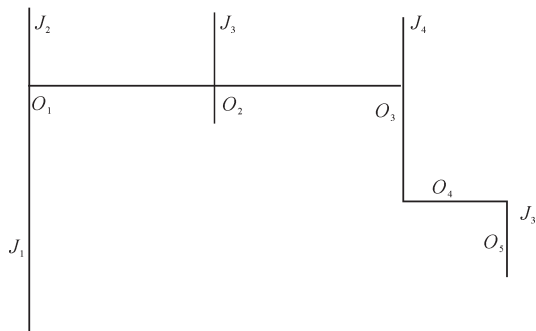


图 5 5 关节数据的最终拟合结果示意图

$J_1 \sim J_5$ —关节轴线, J_1 、 J_2 重合,与实际情况相符; $O_1 \sim O_5$ —关节轴线与连杆的交点

4 标定结果

由机器人的实际 DH 模型,通过空间几何计算得到脑外科机器人的实际 DH 参数如表 2 所示。

表 2 脑外科机器人的实际 DH 参数

构件	a_i	l_i	d_i	θ_i
1	2.212 3	-0.000 1	350	-0.001 5
2	0.375 9	195.422	-0.000 1	3.442 9
3	-0.654 7	198.267 6	00.006 9	4.480 7
4	-85.462 5	-1.385 9	-169.993 2	-88.927 8
5	-92.130 3	-1.417 9	142.465 6	3.555 1
6	0	-1.418 9	145.305 9	-0.040 3

DH 参数标定的误差主要来自于摄像头的精度和数据处理算法的精度,摄像头的精度为 0.015 mm,满足要求,数据处理算法的精度也满足要求,所以标定结果是可以接受的。

本研究选取 20 个空间点进行测量、比较 DH 参数修正前后的定位精度误差,整理结果如表 3 所示。

表 3 DH 参数修正前后定位误差的比较

序号	修正前 误差/mm	修正后 误差/mm	序号	修正前 误差/mm	修正后 误差/mm
1	1.866	0.609 2	11	2.255	0.741 0
2	2.530	0.724 3	12	2.482	0.842 2
3	2.445	0.815 8	13	1.773	0.623 7
4	1.988	0.653 1	14	2.387	0.596 4
5	2.120	0.731 7	15	2.644	0.645 0
6	2.554	0.914 9	16	2.208	0.701 1
7	2.018	0.587 3	17	1.960	0.714 2
8	1.989	0.691 1	18	1.751	0.662 1
9	2.104	0.602 1	19	1.784	0.900 2
10	2.854	0.423 8	20	2.426	0.627 3

由参数修正前后定位误差值比较可以发现:标定前后机器人的定位精度由原来的 2 mm 左右降低到 1 mm 以内。经过该方法标定得到了机器人的实际关节参数,使得机器人的实际运动学模型和控制模型有了较高的吻合度,从而提高了该机器人的定位精度。

5 结束语

通过 DH 参数的标定,可以看出理论模型和实际模型之间存在着一定的偏差,但尚在由于加工、装配等造成的偏差范围之内。本研究通过上述方法得到了准确关节参数,进而修改了机器人的控制模型,实现了对机器人的准确控制。标定验证结果表明,参数修正后机器人的定位精度比修正前有较大提高,最终精度锁定在 1 mm 以内,满足了临床手术的要求,说明标定方法的正确性、可行性,也为其他方面机器人的调试提供了参考方法。

致 谢

本论文所陈述的方法和实验过程,得到了导师的点拨、师弟的实验协助和医生的帮助,在此表示感谢。

参考文献(References):

- [1] BAI Ying, ZHUANG Han-qi, ROTH Z S. Experiment study of PUMA robot calibration using a laser tracking system [C]//Proceeding of the 2003 IEEE International Workshop on Soft Computing in Industrial Applications. Binghamton, New York, 2003: 139-144.
- [2] HAN Xiang-yu, DU Dong, CHEN Qiang, et al. Study of measurement of trajectory precision for industrial robot based on kinematics analysis[J]. **Robot**, 2002, 24(1): 1-5.
- [3] 李 振, 张玉茹, 刘军传. 一种基于机器视觉的机器人标定方法[J]. **机械设计与研究**, 2007, 23(3): 66-69.
- [4] 陈伟华, 张 滔. 基于 ARM 移动机器人视觉系统的设计[J]. **机电工程技术**, 2012, 41(7): 26-27.
- [5] WANG Jian-ping, DAI Yi-fan, HONG Xiao-li. Precision machine tool accuracy of neural network model [J]. **Journal of National University of Defense Technology**, 2002, 24(1): 89-93.
- [6] WANG Dong-shu, CHI Jian-nan. Robot error compensation optimization method research [J]. **Computer Engineering and Application**, 2005(14): 15-17.
- [7] XIA Kai, HONG Tao, LI Wen. Robot position error compensation of neural network [J]. **Robot**, 1995, 17(3): 171-176.
- [8] 张永贵, 黄玉美, 高峰. 基于遗传算法的机器人运动学参数误差识别[J]. **农业机械学报**, 2008, 39(9): 153-157.
- [9] ZIEGENT J, DATSERIS P. Basic Consideration for Robot Calibration [C]. Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1988: 932-938.
- [10] MAAS H G. Dynamic photogrammetric calibration of industrial robots [C]. SPIE's 42nd annual meeting, San Diego, 1997: 1-7.
- [11] 冯 涛, 杨向东, 熊 绿, 等. 穿刺机器人本体标定实验研究[J]. **机械设计与制造**, 2010(2): 155-157.
- [12] HAYATI S A. Robot arm geometric link parameter estimation [C]//Proceedings of 22th IEEE Decision and Control Conference. San Antonio, TX, USA, 1983: 1477-1483.

[编辑:罗向阳]

中国轻工机械协会 中国联合装备集团公司
轻工业杭州机电设计研究院 主办

轻工机械

LIGHT INDUSTRY MACHINERY MAGAZINE
全国轻工装备行业杂志



为您服务

全国邮局订阅全年6期60元
邮发代号32-39
广告经营许可证: 3300004000067

《轻工机械》为中国科技核心期刊、中国核心学术期刊、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊。

《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《中国学术期刊综合评价数据库》、《万方数据-数字化期刊群》、《中文科技期刊数据库》全文收录。

英国《科学文摘》(SA, INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、美国《乌利希期刊指南》(Ulrich)、波兰《哥白尼索引》(IC)收录期刊。

杂志社地址: 杭州市体育场路71号

电 话: (0571) 85186130 85187520

联 系 人: 江仲文 王晓彬 高 蓝 叶 涛

E-mail: qgjxzz@126.com (投稿) 或 qgjxzz@163.com (广告)

邮政编码: 310004

传 真: (0571) 85187520

网 站: <http://www.qgjxzz.com>