

针对手术空间的医疗机器人参数优化^①

陈 华^{②*} 王 栋^{*} 曹 彤^{③*} 倪自强^{**} 刘 龙^{*}

(* 北京科技大学机械工程学院 北京 100083)

(** 北京航空航天大学机器人研究所 北京 100191)

摘 要 考虑到医疗机器人工作空间的既定性和集中性,提出了在不存在明显的关节误差、控制误差等精度影响因素的情况下,按手术空间对机器人的关节参数进行优化补偿的方法,以提高机器人在手术空间中的定位精度。不同于传统机器人的标定,该方法借助摄像头和运动学模型得到针尖点的真实坐标和理论坐标,然后对关节参数进行优化以使理论值向真实值逼近,并得到相应的关节参数。以 BH-7 医疗机器人为例对所述方法进行了验证,验证结果是机器人的定位精度锁定在 1mm 以内,说明了上述方法的可靠性与实用性。

关键词 医疗机器人,手术空间,参数优化,定位精度

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,而且对其精度的要求日益提高,尤其是应用于临床的医疗机器人,对精度的要求更高,这是病人生命安全的必然要求,因此必须提高医疗机器人的精度。本文研究了通过标定手段提高其精度的方法。

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,我们可以考虑提高机器人的制造、装配精度的思路,或者辨识出已成型机器人的关节参数,经综合考虑,选择便捷、实用的参数辨识的思路。近些年,出现了轴线测量法^[1]、神经网络^[2,4]、遗传算法^[2,5]等现代标定技术,但这些方法或多或少地存在一定的弊端,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,加之其工作空间的确定性,我们只需要保证机器人在手术空间具有较高的定位精度便可。故本文针对手术空间尝试参数优化补偿的方法,获得允许机器人应用于临床的定位精度,并得到相应的关节参数。主要过程如下:(1)选

用合适的运动学模型描述机器人末端位姿和关节变量的关系;(2)测得机器人不同位姿下针尖点真实位置和对应的关节变量;(3)根据运动学模型和关节变量计算机器人的理论空间位置,本着减小理论位置和真实位置之间差距的目标,选用一定的数据处理方法进行优化,得到理想的关节参数;(4)对原来机器人的运动学模型进行修正,检验其在工作空间的定位精度。

1 标定原理

机器人是一种开环的运动学结构,可以通过关节测量装置(在本研究中,机器人使用的是增量编码器)得到关节变量^[6,7],并通过关节变量和机器人的运动学模型计算得到机器人当前针尖点的理论位置坐标^[8],同时使用先进的测量装置(本机器人使用的是高精度的双目摄像头)获得当前针尖点的真实位置坐标^[9]。由于机器人本身制造、装配误差的存在,理论位置和真实位置存在一定的偏差,偏差主要来源于实际的关节参数跟理论的关节参数之间的误差^[10,11],因此我们要对关节参数进行识别,使其尽可能地真实逼近^[12]。

本文采用参数优化补偿的方法,在关节参数允

① 863 计划(2009AA045301)资助项目。

② 女,1974 年生,讲师;研究方向:医疗机器人技术;E-mail:chenhua@ustb.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail:caotong1601@163.com

(收稿日期:2012-04-01)

许的误差范围内寻找最优值,使得机器人的理论坐标值和真实坐标值之间的偏差尽可能小。在此,将标定过程中测得的数据作为已知值,将机器人的关节参数作为目标值,并以理论的关节参数作为初始值,对其进行优化,得到综合位置误差最小时所对应的关节参数。

2 标定过程

2.1 运动学模型

本文所阐述的参数优化方法是以北京航空航天大学 BH-7 脑外科医疗机器人为实验对象。如图 1 所示,该机器人以力矩电机为动力源,电机驱动各关节运动,待末端执行器(此处为穿刺针)运动到合适的空间位置,依靠电磁锁紧,获得手术需要的位姿。选用经典的 Denavit-Hartenberg (DH) 运动学模型描述该机器人如图 2 所示。

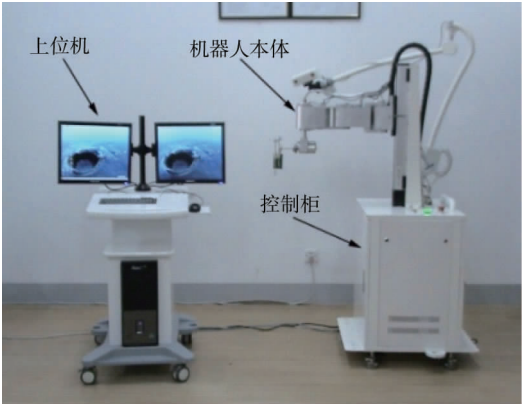


图 1 BH-7 脑外科机器人系统

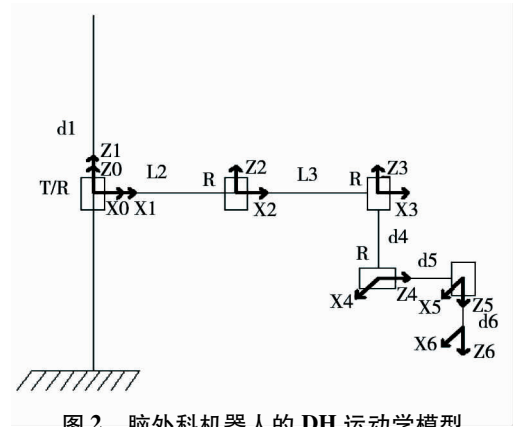


图 2 脑外科机器人的 DH 运动学模型

由 DH 模型可知,该脑外科机器人共有 5 个自由度,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,第 2、3、4 关节轴名义上互相平行,第 4、5 关节轴名义上互相垂

直。由机器人的 DH 运动学模型得到该机器人的理论 DH 参数见表 1。

表 1 机器人零位时的理论 DH 参数

构件	d_i (mm)	a_i (°)	l_i (mm)	θ_i (°)	变量
1	0	0	0	0	d_1
2	0	0	200	0	θ_2
3	0	0	200	0	θ_3
4	-170	-90	0	-90	θ_4
5	145	-90	0	0	θ_5
6	150	0	0	0	~

2.2 数据采集

对于医疗机器人,由于其工作空间的既定性和集中性,我们对标定参数的获取也相应地具有针对性;对于 BH-7 医疗机器人针尖点的测取,主要是使其穿刺针在确定的手术空间内运动,尽可能多地以不同的姿态定位在不同的位置,此时用光学摄像头记录下针尖点的真实空间位置,同时记录下机器人的各个关节变量,并由关节变量计算得到针尖点的理论空间位置。具体过程如下:

(1)工作空间的界定。将测取针尖点需要用到的方箱(表面贴有点阵的坐标纸)稳固放置于机器人的工作空间。

(2)注册点的测取。人为地移动机器人,使其针尖点运动到方箱上 3 点不共线、4 点不共面的 4 个注册点。每当针尖点到达其中一个注册点,用摄像头记录该点的空间坐标值,并记录机器人的关节变量。

(3)优化点的测取。人为地移动机器人,使穿刺针以不同的姿态抵达方箱上的坐标点,同样用摄像头记录针尖点的位置,并记录机器人的关节变量。

针尖点的测取过程如图 3 所示。

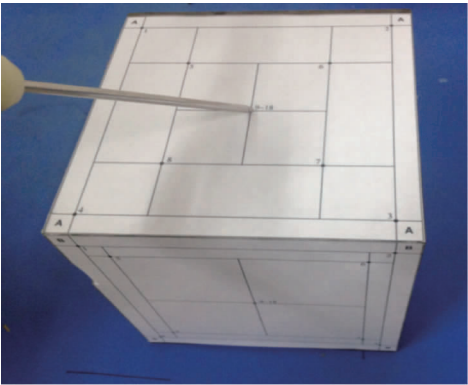


图 3 针尖点的测取

在上述的操作过程中注意保证摄像头、方箱和机器人的相对位置固定不变,还要防止机器人各关节产生弹性变形,以免引入随机误差。

2.3 目标函数

采用参数优化的标定方法,主要思路是通过对关节参数的微量调整来减小针尖点理论坐标和真实坐标之间的差值,提高机器人的定位精度。在针尖点的测取中,通过摄像头测得针尖点的真实坐标,通过关节变量和运动学模型计算得到针尖点的理论坐标,将两个坐标值转换到同一个坐标系下进行数据分析:

$$b_i^* = M a_i \quad (1)$$

其中:

a_i 为直接测得的摄像头坐标系下点的真实值;

M 为摄像头坐标系到机器人坐标系的转换矩阵;

b_i^* 为该点转换到机器人坐标系下的真实坐标。

如果机器人的关节参数是准确的,即理论参数和真实参数相同,可以建立如下等式:

$$\sum_{i=1}^n |b_i - b_i^*| = 0 \quad (2)$$

其中:

b_i 为机器人坐标系下该点的理论坐标;

$| \quad |$ 为欧氏距离。

但实际上机器人的真实参数和理论参数不可能一样,所以

$$\sum_{i=1}^n |b_i - b_i^*| > 0 \quad (3)$$

即

$$\sum_{i=1}^n |b_i - M a_i| > 0 \quad (4)$$

又由于

$$b_i = f(t_i) = f(t_0 + \Delta t_i) \quad (5)$$

$$M = g(t_0 + \Delta T) \quad (6)$$

其中:

t_0 为机器人零位时的关节参数;

Δt_i 为关节相对于零位时的变化量;

ΔT 为测取注册点时关节相对于零位的变化量。

所以有

$$\sum_{i=1}^n |f(t_0 + \Delta t_i) - g(t_0 + \Delta T) a_i| > 0 \quad (7)$$

在此,将上式中的 t_0 视为变量,并用 X 代替,将测取的 Δt_i 、 ΔT 、 a_i 视为已知值,定义如下函数:

$$F(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f(X + \Delta t_i) - g(X + \Delta T) a_i| \quad (8)$$

基于使真实坐标跟理论坐标之间的差值尽可能降低,以提高机器人精度的目标。在机器人关节参数允许的误差范围内寻求上式 $F(X)$ 的最小值。

确定参数优化的目标函数:

$$\begin{cases} \min F(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f(X + \Delta t_i) - g(X + \Delta T) a_i| \\ |x_i - x_i^*| \leq \delta_i \end{cases} \quad (9)$$

其中:

X 为关节参数 x_i 的集合;

x_i 为第 i 个关节参数;

x_i^* 为第 i 个关节参数的理论值;

δ_i 为第 i 个关节参数的误差范围。

由该思路建立的目标函数能反映机构的综合定位效果,目标函数取得最小值时的机构运动学参数可以使得机构在整个工作空间内的重复定位精度最好。至此,运动学模型参数求解问题就转化为求满足规定范围的多变量最值问题,对于这种多变量约束的非线性最值问题,可用 Matlab 中的 Optimization Toolbox 工具进行求解。Matlab 中提供了相应的 fmincon 优化函数,该函数采用序列二次规划法进行求解,在每一步迭代中求解二次规划问题,并用 Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) 公式更新拉格朗日 Hessian 矩阵,效率较高。

3 标定结果

将表 1 中机器人处于零位时的理论 DH 参数 $X = [175, 0, 0, 0, 0, 0, 200, 0, 0, 0, 200, 0, -170, -90, 0, -90, 145, -90, 0, 0, 150, 0, 0, 0]$ 作为关节变量的初始值,并设定各参数允许的偏差范围,借助 fmincon 函数进行优化计算,求得机器人运动学参数的优化解如表 2 所示。

由表中参数可知优化所得参数是比较合理的,只是在理论参数的基础上做了微小的调整,这一点符合机器人的制造和装配误差的情况,而且使得理论值更加逼近真实值,从而减小定位误差。

将优化得到的实际关节参数带入控制模型,测试并比较参数优化前后其定位误差,结果分别如图 5 和图 6 所示。

表 2 机器人零位时的实际 DH 参数

构件	$d_i(\text{mm})$	$a_i(^{\circ})$	$l_i(\text{mm})$	$\theta_i(^{\circ})$
1	0.2451	0.1829	-0.0001	0.0012
2	0.0152	0.0568	195.4223	-0.3835
3	0.0047	0.0982	194.9624	3.8598
4	-169.9972	-89.6506	0.2105	-88.9308
5	145.1452	-89.4194	-0.3317	3.6216
6	146.3008	0.1027	-0.3317	-0.0081
重复定位精度	平均误差: $\varepsilon = 0.601\text{mm}$ 最大误差: $\Delta = 1.863\text{mm}$ 标准误差: $\delta = 0.429\text{mm}$			

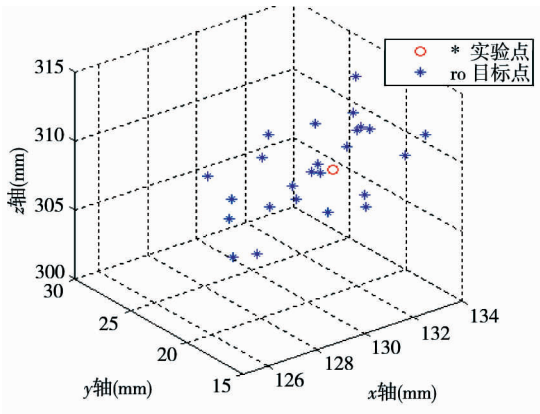


图 4 参数优化前的定位精度

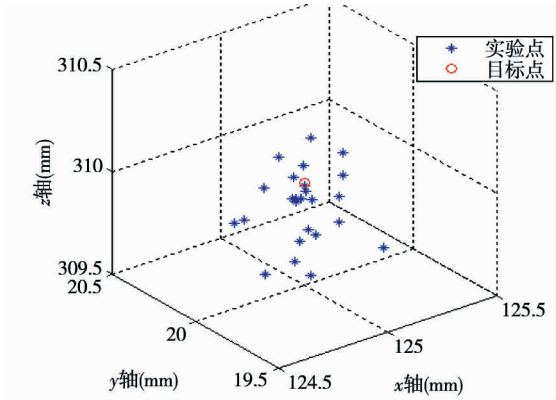


图 5 参数优化后的定位精度

为了排除偶然性,充分说明该标定方法的可靠性、实用性,多次进行标定实验验证,结果如表 3 所示。

通过图 4 和图 5 比较可知,经过优化得到的 DH 参数可以使得机器人的定位精度得到明显的提高,减小到 2mm 以内,说明了该标定方法的可行性;由表 3 试验结果可知,机器人的精度稳定提高,说明了

该方法的可靠性;为了充分说明标定后机器人在整个工作空间都具有可靠的定位精度,选定覆盖整个工作空间的 50 个随机点作为目标点,检测机器人的重复定位精度和绝对定位精度,结果如图 6 所示。

表 3 实验结果验证

组数	参数优化	重复定位精度(mm)			采集次数
		ε	Δ	δ	
1	优化前	6.782	14.051	2.584	30
	优化后	0.687	1.982	0.405	
2	优化前	8.124	12.086	1.781	30
	优化后	0.741	1.423	0.264	
3	优化前	7.328	11.869	2.841	30
	优化后	0.912	1.824	0.415	
4	优化前	7.948	11.842	1.794	30
	优化后	0.804	1.607	0.481	
5	优化前	8.425	13.408	2.108	30
	优化后	0.938	1.414	0.281	

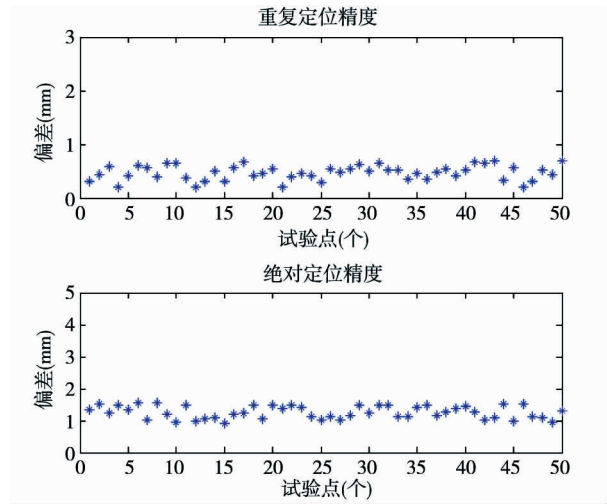


图 6 重复定位精度和绝对定位精度

4 结 论

由定位精度验证结果可知,使用本文方法优化得到的医疗机器人的关节参数可以使其重复定位精度控制在 1mm 以内,绝对定位精度控制在 2mm 以内,满足了手术精度的要求,提高了手术的安全性和可靠性,因此这种针对于手术空间的参数优化的方法具有应用于临床的实效性。

通过对医疗机器人运动学模型参数进行优化,减小运动学模型与机构之间的差距,将能显著提高医疗机器人的定位精度。推导并建立了机器人运动学模型参数的优化方法,并通过仿真和试验验证了理论分析的可靠性,通过对机器人运动学参数的理论值进行优化,得到了更符合实际机构特征的运动学模型,显著提高了机器人的定位精度,这对应用于临床医疗的机器人很具有现实意义。

参考文献

- [1] William K, Veitschegger. Robot calibration and compensation. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2008, 14(6):643-656
- [2] 王东署,迟健男,徐心和. 机器人误差补偿优化方法研究. *计算机工程与应用*, 2005, 14:15-17
- [3] 夏凯,洪涛,徐文立. 补偿机器人定位误差的神经网络. *机器人*, 2005, 17(03):171-176
- [4] 王建平,戴一帆,洪晓丽. 精密机床神经网络法精度建模. *国防科技大学学报*, 2002, 24(01):89-93
- [5] 周学才. 机器人误差补偿技术的研究. *机器人*, 2000, (4):28-30
- [6] Maas H G. Dynamic photogrammetric calibration of industrial robots. In: *Proceedings of the SPIE's 42nd Annual Meeting*, San Diego, 1997. 1-7
- [7] Gong C H, Yuan J X, Ni J. Nongemetric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000, 40(14):447-450
- [8] Han X Y, Du D, Chen Q. Study of measurement of trajectory precision for industrial robot based on kinematics analysis. *Robot*, 2002, 24(1):1-5
- [9] Ziegert J, Datsoris P. Basic consideration for robot calibration. In: *Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, USA, 1988. 932-938
- [10] Hayati S A. Robot arm geometric link parameter estimation. In: *Proceedings of the 22nd IEEE Decision and Control Conference*, New York, USA, 1993. 1477-1483
- [11] Bai Y, Zhuang H Q, Roth Zvi S. Experiment study of PUMA robot calibration using a laser tracking system. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Workshop on Soft Computing in Industrial Applications*, Binghamton, USA, 2003. 139-144
- [12] Motta J M S T, de Carvalho G C, McMaster R S. Robot calibration using a 3D vision-based measurement system with a single camera. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2001, 17:487-497

Parameter optimization of medical robots according to the surgery space

Chen Hua^{*}, Wang Dong^{*}, Cao Tong^{*}, Ni Ziqiang^{**}, Liu Long^{*}

(^{*} School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

(^{**} Robotics Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191)

Abstract

Considering the determinacy and concentricity of a medical robot's workspace, an ideal method for optimizing and compensating of robot joint parameters according to the surgery space was proposed to improve the positioning accuracy in the space under the condition of without obvious factors such as joint error and control error which have the influence on precision. Different from traditional robot calibrations, this method obtains the real and theoretical coordinates by camera and kinematics model, and optimizes the joint parameters in order to make the theoretical value approximate to the real value, and obtains the corresponding joint parameters. The described method was verified with the BH-7 medical robot, finally the positioning accuracy of the robot was locked within 1 mm, which illustrated the reliability and practicability of the method.

Key words: medical robot, surgery space, parameter optimization, positioning accuracy