

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.01.006

服务机器人的双臂运动学仿真研究

赵宏磊, 张秋菊

(江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214000)

摘要:目前服务机器人存在结构复杂、价格昂贵等问题,课题组设计了能满足日常服务的四自由度服务机器人的双臂。设计服务机器人双臂的主要结构;采用D-H法建立各臂连杆的参考坐标系;求解了运动学的正逆解;利用MATLAB编程求解单臂的工作空间;利用MATLAB建立双臂运动仿真模型。空间轮廓运动仿真结果验证了正逆运动学求解的正确性。该双臂工作空间能满足日常服务需求。

关键词:服务机器人;四自由度双臂;D-H法;蒙特卡洛法;工作空间;MATLAB软件

中图分类号:TP242

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2019)01-0032-05

Study on Kinematics Simulation of Dual Arm of Service Robot

ZHAO Honglei, ZHANG Qiuju

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: According to the problems of complex structure and high price of service robots, dual-arm of Four-Degree-of-Freedom service robots were designed to satisfy the daily service. The main structure design of the dual-arm was designed, and the reference coordinate system of each arm connecting rod was established by D-H method, the forward and inverse kinematics solutions were solved, further MATLAB programming was used to solve the workspace of the single arm, and to establish the simulation model of the dual-arm movement. The spatial contour diagram shows that the dual-arm workspace can meet the daily service requirements. The motion simulation results show that the forward and inverse kinematics solutions are correct.

Keywords: service robot; four-degree-of-freedom dual-arm; D-H method; Monte Carlo method; working space; MATLAB

人口老龄化的趋势,劳动力成本的上升,需要机器人来替代很多人工服务。而人工智能的研究和开发,使得越来越多功能强大的服务机器人走进我们的生活^[1],如Twenty-One机器人、Care-O-bot4机器人等。Twenty-One机器人的单臂拥有7个自由度,可以跟人的手臂一样灵活。但是目前的服务机器人双臂结构复杂,价格昂贵,所以课题组研究了能完成日常服务动作又比较灵活的四自由度服务机器人的双臂。

1 双臂的结构设计及参数

1.1 双臂的结构设计

课题组根据人体手臂关节和助老服务机器人的双臂所要完成的动作,确定该双臂的外形尺寸及自由

度^[2]。单臂具有4个自由度,为了减少手臂包装的复杂性采用了电机驱动方式^[3],该手臂的特点就是占用空间小,通用性强,动作灵活,加上末端手爪完全能够完成助老服务的一些复杂动作,可以为家中行动不便的老人们提供很好的帮助。

主要的杆件材料采用7075航空铝,具有强度高、抗腐蚀性强和质量轻等优点,使得双臂更加轻盈稳定。助老服务机器人的双臂结构的虚拟模型如图1所示。

1.2 双臂的设计参数

助老服务机器人的双臂尺寸主要还是仿人手臂确定的^[4],在功能上双臂需要作出扶手的姿态,根据一般座椅扶手的舒适度设计确定连杆1和连杆2的长

收稿日期:2018-09-17;修回日期:2018-11-20

基金项目:江苏省食品先进制造装备技术重点实验室开放课题资助项目(FM-201608)。

第一作者简介:赵宏磊(1991),男,江苏仪征人,硕士研究生,主要研究方向为双臂助老服务机器人的结构设计。E-mail: 1097143166@qq.com

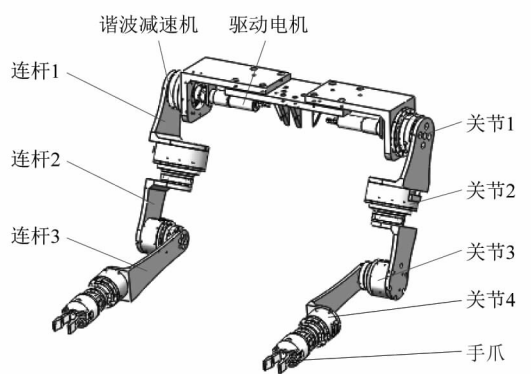


图1 助老服务机器人双臂的虚拟模型

Figure 1 Virtual model of dual arm for old age service robot

度,分别为 120 mm,而连杆 3 根据一般扶手的长度确定为 233 mm,包括各个驱动的长度,总长定为 630 mm;功能上也基本能够完成正常的助老服务需求,单臂的设计参数如表 1 所示。

表1 设计参数

Table 1 Design parameters

单臂自由度	单手臂总长/mm	单臂总质量/kg	手爪负载质量/kg	抓取工件直径/mm
4	630	≤12	1.5	60~80

2 双臂运动学建模

双臂需要进行关于手臂的运动学分析、轨迹规划及运动控制等方面的研究^[5],双臂的运动学分析是研究助老服务机器人的基础,其中逆运动学是研究双机械臂的重点。

2.1 双臂关节坐标系的建立

在 1955 年,Denavit 和 Hartenberg 在“ASME Journal of Applied Mechanics”发表了一篇文章,提出 D-H 参数法,并推导出它们的运动方程。该方法已成为表示双臂和对双臂运动进行建模的标准方法^[6]。

为了描述双臂各连杆之间的位姿关系,使用标准 D-H 法建立双机械臂的各连杆参考坐标系^[7]。为了更好地仿真分析,先建立了基坐标系 $O_b-X_bY_bZ_b$,再分别建立双臂的坐标 $O_{10}-X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 和 $O_{11}-X_{11}Y_{11}Z_{11}$,如图 2 所示。以左臂为例,根据建立的关节坐标系来确定坐标参数,如表 2 所示。

1) 连杆的长度 a_i : $Z_{i-1} \rightarrow Z_i$ 沿 X_{i-1} 的距离,2 轴相交为 0。

2) 2 关节轴扭角 α_i : $Z_{i-1} \rightarrow Z_i$ 绕 X_i 的转角。

3) 2 连杆间距离 d_i : $X_{i-1} \rightarrow X_i$ 沿 Z_{i-1} 移动的距离。

4) 关节角 θ_i : 连杆绕 Z_{i-1} 的转角。

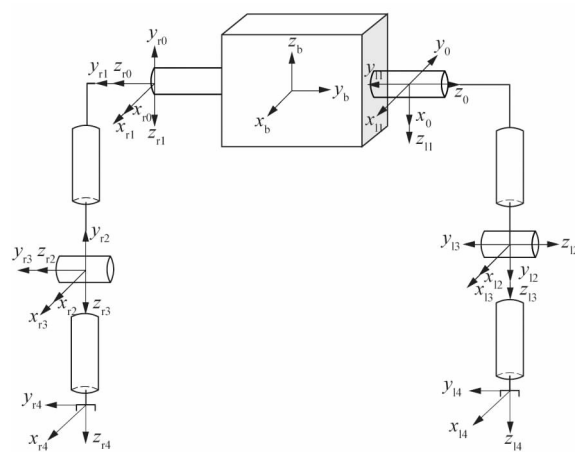


图2 双臂的坐标系

Figure 2 Coordinates of two arms

表2 左臂的 D-H 参数表

Table 2 D-H parameter table of left arm

关节 i	a_i/mm	$\alpha_i/(\circ)$	d_i/mm	$\theta_i/(\circ)$	关节范围/ $(\circ)$
1	0	-90	0	θ_1	-90 ~ 90
2	0	90	d_2	θ_2	-90 ~ 90
3	0	-90	0	θ_3	-90 ~ 90
4	0	0	d_4	θ_4	-180 ~ 180

2.2 单臂正运动学分析

连杆齐次坐标变换通式为:

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

由式(1)可得各连杆的变换矩阵为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & 0 & -S_2 & 0 \\ S_2 & 0 & -C_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & -S_3 & 0 \\ S_3 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_4 = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & 0 \\ S_4 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

从上述变换矩阵,可以得到双臂末端相对于基坐标系的变换矩阵:

$$\mathbf{T}_4 = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_3 \mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{定义 } \mathbf{R}_4 = [\mathbf{n} \quad \mathbf{o} \quad \mathbf{a}] = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \text{ 为机械臂末}$$

端的姿态, $\mathbf{p}_4 = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$ 为机械臂末端的位置。将各连杆

的变换矩阵代入式(2)中可得:

$$\begin{aligned} n_x &= C_1 C_2 C_3 C_4 - S_1 S_3 C_4 - C_1 S_2 S_4; \\ n_y &= S_1 C_2 C_3 C_4 + C_1 S_3 C_4 - S_1 S_2 S_4; \\ n_z &= -S_2 C_3 C_4 - C_2 S_4; \\ o_x &= -C_1 C_2 C_3 S_4 + S_1 S_3 S_4 - C_1 S_2 C_4; \\ o_y &= -S_1 C_2 C_3 S_4 - C_1 S_3 S_4 - S_1 S_2 C_4; \\ o_z &= S_2 S_3 S_4 - C_2 C_4; \\ a_x &= -C_1 C_2 S_3 - S_1 C_3; \\ a_y &= -S_1 C_2 S_3 + C_1 C_3; \\ a_z &= S_2 S_3; \\ p_x &= -d_4 (C_1 C_2 S_3 + S_1 C_3) - d_2 S_1; \\ p_y &= -d_4 (S_1 C_2 S_3 - C_1 C_3) + d_2 C_1; \\ p_z &= d_4 S_2 S_3. \end{aligned}$$

式中: C_i 代表 $\cos \theta_i$; S_i 代表 $\sin \theta_i$; $\mathbf{n}$ 为法线矢量; $\mathbf{o}$ 为方向矢量; $\mathbf{a}$ 为接近矢量; $\mathbf{p}_4$ 为位置矢量; p_x, p_y 和 p_z 为机械手末端的3个坐标分量。

2.3 单臂逆运动学分析

逆运动学是已知机械臂的末端在空间中的位姿坐标,反向求出该位姿的各个关节角^[8]。在机器人双臂的控制中,关节变量通常由已知的目标位姿来求解,因此逆运动学分析是机器人手臂运动控制和轨迹规划的基础。运动学正解是唯一且确定的,即在给出每个关节变量之后,可以唯一确定手臂末端的位姿。然而,对于逆运动学的解,可能有多种解,或者唯一解,甚至没有解。笔者利用反变换法来求逆运动学的解。

1) 求 θ_1

根据式(2)两边分别左乘 $\mathbf{A}_1^{-1}$ 可以得到 $\mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{T}_4 = \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_3 \mathbf{A}_4$, 即:

$$\mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_3 \mathbf{A}_4 \quad (3)$$

即:

$$\begin{bmatrix} n_x C_1 + n_y S_1 & o_x C_1 + o_y S_1 & a_x C_1 + a_y S_1 & p_x C_1 + p_y S_1 \\ -n_z & -o_z & -a_z & -p_z \\ -n_x S_1 + n_y C_1 & -o_x S_1 + o_y C_1 & -a_x S_1 + a_y C_1 & -p_x S_1 + p_y C_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_2 C_3 C_4 - S_2 S_4 & -C_2 C_3 S_4 - S_1 C_4 & -C_2 S_3 & -d_4 C_2 S_3 \\ S_2 C_3 C_4 + C_2 S_4 & -S_2 C_3 S_4 + C_2 C_4 & -S_2 S_3 & -d_4 S_2 S_3 \\ S_3 C_4 & -S_3 S_4 & C_3 & -d_4 C_3 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)可得:

$$\begin{cases} a_x C_1 + a_y S_1 = -C_2 S_3; \\ p_x C_1 + p_y S_1 = -d_4 C_2 S_3. \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可得,当 $C_2 S_3 \neq 0$ 时,化简可得

$$\theta_1 = \arctan \left(-\frac{d_4 a_x - p_x}{d_4 a_y - p_y} \right).$$

当 $C_2 S_3 = 0$ 时,可得

$$\theta_1 = \arctan \left(-\frac{a_x}{a_y} \right).$$

2) 求 θ_2

在式(3)左乘 $\mathbf{A}_2^{-1}$ 可以得到

$$\mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ S_2 & -C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{T}_4 = \mathbf{A}_3 \mathbf{A}_4 \quad (6)$$

根据式(6)两边相等的原则,简化可得:

$$p_x C_1 S_2 + p_y S_1 S_2 + p_z C_2 = 0.$$

可得:

$$\theta_2 = \arctan \left(-\frac{p_z}{p_x C_1 + p_y S_1} \right).$$

3) 求 θ_3

由式(6)两边相等的原则,简化可得:

$$\begin{cases} p_x C_1 C_2 + p_y S_1 C_2 - p_z S_2 = -d_4 S_3; \\ -p_x S_1 + p_y C_1 = d_4 C_3. \end{cases}$$

可得:

$$\theta_3 = \arctan \left(\frac{p_x C_1 C_2 - p_y S_1 C_2 - p_z S_2}{p_x S_1 - p_y C_1} \right).$$

4) 求 θ_4

由式(6)两边相等的原则,简化可得:

$$\begin{cases} -n_x S_1 + n_y C_1 = S_3 C_4; \\ -o_x S_1 + o_y C_1 = -S_3 S_4. \end{cases}$$

可得:

$$\theta_4 = \arctan \left(\frac{o_x S_1 - o_y C_1}{-n_x S_1 + n_y C_1} \right).$$

2.4 工作空间仿真分析

工作空间指的是在一定条件下机器人臂的末端关节坐标系原点所能达到空间位置点的集合^[9]。机械臂的工作空间研究存在2个基本问题:①给出某一种机器臂的具体机构形式、结构参数及可变范围,从而求解机械臂的工作空间,称为工作空间分析的正问题;②给出有限的工作空间,从而求解机械臂的形式、参数及变量的变化范围,这一类问题被称为工作空间分析的逆问题。机器人的工作空间决定了其活动范围,笔者利用蒙特卡洛法(又称统计模拟法)求解机械臂的工作空间^[10]。以右臂为例求其工作空间如图3所示。根据三维图能清楚得出单臂的工作空间,再根据各坐标平面的投影可以更全面、多方位地分析单臂的工作空间,该工作范围基本与人的双臂工作范围一致,这为双臂工作空间优化和结构设计提供参考。

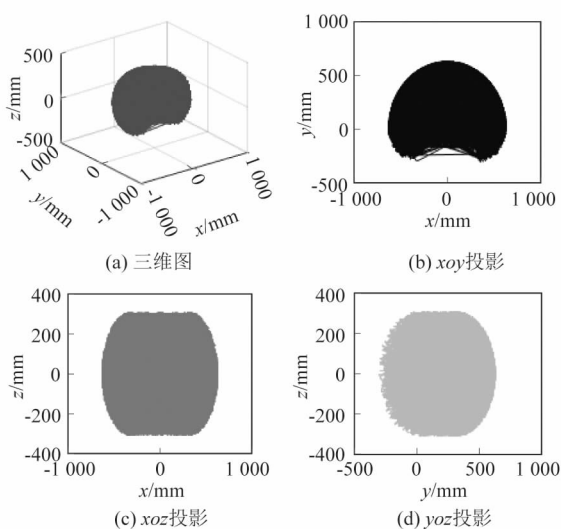


图3 机械臂的工作空间

Figure 3 Workspace of robotic arm

3 双臂的仿真验证

robotics toolbox 工具箱提供了机器臂研究所涉及的重要功能,如运动学仿真、动力学及轨迹规划等^[11]。在本文中,使用该工具箱构建机器人的双臂仿真模型,并且验证机器人双臂正逆运动学分析的正确性。图4

即为机器人的双臂运动学的仿真模型。

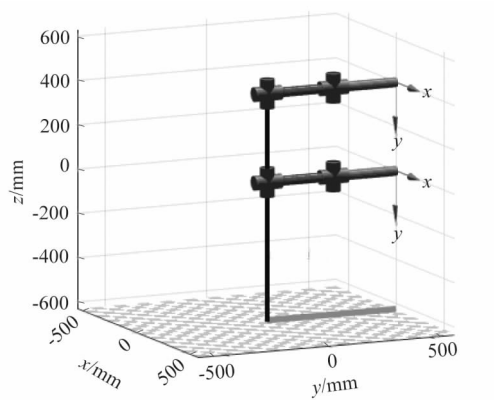


图4 双臂仿真模型

Figure 4 Dual-arm simulation model

以右臂为例,定义关节变量为 $\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 90^\circ, \theta_3 = 90^\circ, \theta_4 = 90^\circ$,通过正运动学的欧拉角形式计算得到的位姿为: $(p_x, p_y, p_z, \Phi, \theta, \Psi) = (-323, 0, 307, -90^\circ, -180^\circ, 0)$,与原始数据计算得到的位姿结果相同;在逆运动学的求解过程中,当末端位姿输入 $p_x = -323, p_y = 0, p_z = 307$ 和 $\Phi = -90^\circ, \theta = -180^\circ, \Psi = 0$ 时,则可以求解得到一组解为 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 90^\circ$,从而验证了计算结果与仿真结果是一致的,如图5所示。

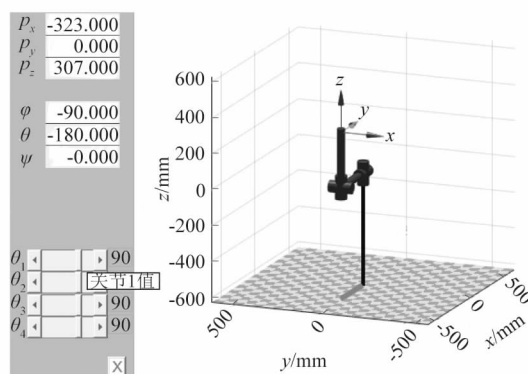


图5 右臂的仿真模型

Figure 5 Simulation model of right arm

4 结论

课题组研究了服务机器人的双臂主要结构设计及参数,运用 MATLAB 求解服务机器人双臂的工作空间,观察工作空间的点云图形状变化,工作空间的形状变化基本与人双臂活动范围一致;并建立双臂仿真模型,验证了双臂正运动及逆运动学算法的正确性,并完成机械臂的运动仿真。在能完成日常服务需求的同时,通过简化自由度简化双臂结构,降低了服务机器人

(下转第42页)