

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.012

Dobot 型机器人运动学分析与仿真

蔡汉明, 钱永恒

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 为了获得 Dobot 机器人的正逆解计算公式、避免解被丢失的可能性和保证角的精度, 根据该型机器人的结构特点, 运用 D-H 法建立了机器人的坐标系和运动学方程, 进行了正逆运动学的分析, 将双变量反正切函数应用到了逆解的表达式中。针对逆解多解和运动平稳性问题, 对笛卡尔空间中利用直线插补和调用逆解公式求出的关节角序列进行了分析研究, 提出了运用动态规划算法选出一组最优解序列, 再利用三次 B 样条插值进行了连续化处理, 并进行了实例验证和 Matlab 软件仿真。研究表明, 利用该算法能够选出一组最优解和保证机器人运动的平稳性, 为该型机器人的应用及轨迹规划与控制器的研究打下基础, 所运用的算法和思想也适用于其他类型的多关节机器人。

关键词: Dobot 机器人; 运动学; 动态规划; 三次 B 样条插值; Matlab 仿真

中图分类号: TH112; TP241.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)10-1217-04

Kinematics analysis and simulation of Dobot robot

CAI Han-ming, QIAN Yong-heng

(Mechanical and Electrical Engineering Collage, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: In order to obtain Dobot robot forward and inverse kinematics formula, avoid the possibility of the solutions being lost and guarantee the angle precision, according to the structural characteristics of the robot, the coordinate system and the kinematics equation of the robot were established by the method of D-H, forward and inverse kinematics analysis was presented, two variable of the inverse tangent function was applied into the expression of inverse solution. Aiming at the multiple results problem of inverse solution and the problem of motion stability, the joint angle sequence obtained by using linear interpolation and calling inverse solution formula in Descartes space was analyzed and researched, a dynamic programming algorithm was proposed to select a set of optimal solution sequence. And the method of three B spline interpolation for continuous processing was used, and the example verification as well as the Matlab software simulation was carried out. The results indicate that the algorithm can select a set of optimal solution and guarantee the smoothness of robot motion, this can lay a foundation for this type of robots application, trajectory planning and the research of controller, the algorithm and ideas adopted in this paper are also applicable to other types of multi joint robots.

Key words: Dobot robot; kinematics; dynamic programming; three B spline interpolation; Matlab simulation

0 引 言

目前, 在机器人运动学研究中, 机器人正解的求法已比较统一^[1], 而逆解的求法主要有数值迭代法、几何法、神经网络法、旋量解法和奇异回避算法等^[2-4]。机器人逆解算法复杂, 数值迭代法计算量大, 收敛速度

较慢。几何法依赖于机器人的机构模型, 适用于自由度较少的情况, 通用性较差。在机器人逆解过程中, 一般在关节变量范围内计算机器人关节角, 而文献[5]在求解关节角时采用单变量反正切函数, 这样求解, 不仅可能会造成一个解的丢失, 而且角的精度也难以保证。文献[6]中所求逆解有 8 组解, 但文中没有给出

怎样选取一组解作为最后逆解结果的方法。文献[7]对逆解多解虽然利用了优化算法选出了一组最优解,但并未提出对离散的最优解进行连续化处理的方法,这可能会导致机器人运动平稳性差,精度不高,甚至会损坏动力元件。

针对以上问题,本研究在求解关节变量时采用解析法并用双变量反正切函数,通过两变量的符号确定关节角所在的象限,以避免解被丢失的可能性,同时保证角的精度。针对反解多解,本研究提出采用“动态规划”法选取一组最接近当前操作臂的解,该方法描述为从起始角度开始,求出到终点角度位置的路径之和最优为目标,再利用三次 B 样条插值进行拟合。

1 关节坐标系的建立及参数设定

本研究根据 Dobot 机器人的特点进行运动学分析研究。该机器人主要由回转主体、大臂、小臂、臂头等部分组成。该机器人是一种 4 自由度串联开链式机械臂,4 个关节都是转动关节,可用于完成夹取、书写、焊接、搬运、雕刻等工作,是一种典型的操作型机器人。为了描述机器人各连杆之间的相对位置和方向关系,需要根据关节结构在每个连杆上建立一个坐标系。

本研究利用 D-H 关节坐标系建立原则^[8],建立的连杆坐标系的分布情况如图 1 所示。

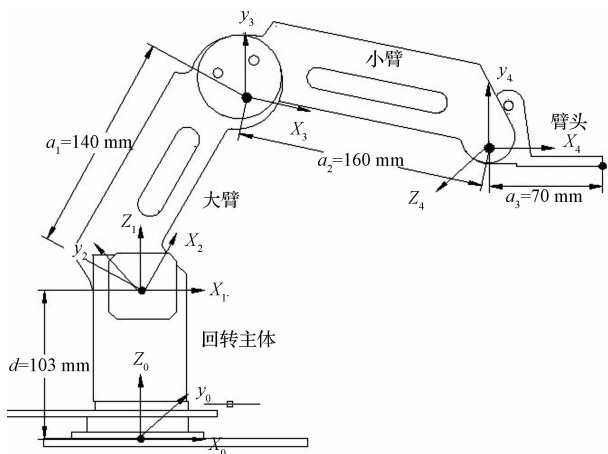


图 1 机器人关节坐标系示意图

D-H 参数如表 1 所示。

表 1 机器人连杆的 D-H 参数

连杆 <i>i</i>	轴转角 $\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	连杆长度 a_{i-1}/mm	连杆偏距 d_i/mm	关节变量 $\theta_i/(^{\circ})$	关节变量范 围 $\theta_i/(^{\circ})$
1	0	0	<i>d</i>	θ_1	-135 ~ 135
2	90	0	0	θ_2	-15 ~ 85
3	0	a_1	0	θ_3	-20 ~ 95
4	0	a_2	0	θ_4	-90 ~ 90

2 正运动学方程的推导及求解

连杆坐标系 $\{i\}$ 相对于 $\{i-1\}$ 的齐次变换 ${}^{i-1}T_i$ 称为连杆变换,它与 α_{i-1} 、 a_{i-1} 、 d_i 、 θ_i 这 4 个连杆参数有关。可以把它分解为坐标系 $\{i\}$ 的 4 个基本子变换问题,每个子变换只依赖于一个连杆参数,则有:

$${}^{i-1}T_i = Rot(x, \alpha_{i-1}) Trans(x, a_{i-1}) Rot(z, \theta_i) Trans(z, d_i) \tag{1}$$

由式(1) 右边的 4 个子变换,得到相邻连杆间变换通式:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i \sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

根据式(2), 可求得各连杆的齐次变换矩阵: 0T_1 、 1T_2 、 2T_3 、 3T_4 ,相乘便得到 Dobot 机器人末端相对于基坐标系 $\{0\}$ 的齐次变换矩阵 0T_4 。

坐标变换图如图 2 所示。

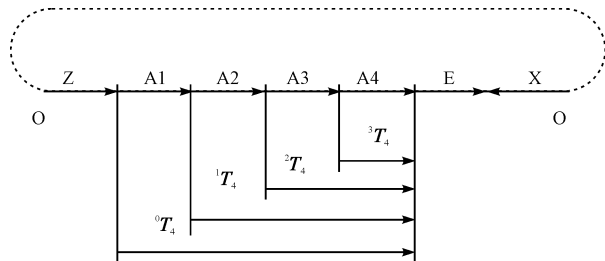


图 2 Dobot 机器人的坐标变换图

左上角 3×3 的矩阵表示末端执行器在基系中的姿态,第 4 列 3×1 的矩阵表示末端执行器在基系中的位置。即建立的运动学方程为:

$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

根据式(3) 方程左、右两边对应元素相等得到:

$$n_x = c_4 c_1 c_{23} - s_4 c_1 s_{23}, n_y = c_4 s_1 c_{23} - s_4 s_1 s_{23},$$

$$n_z = c_4 s_{23} + s_4 c_{23};$$

$$s_x = -s_4 c_1 c_{23} - c_4 c_1 s_{23}, s_y = -s_4 s_1 c_{23} - c_4 s_1 s_{23},$$

$$s_z = c_4 c_{23} - s_4 s_{23};$$

$$a_x = s_1, a_y = -c_1, a_z = 0;$$

$$p_x = 160c_1 c_{23} + 140c_1 c_2, p_y = 160s_1 c_{23} + 140s_1 c_2,$$

$$p_z = 160s_{23} + 140s_2 + 103.$$

注: $c_1 = \cos\theta_1, s_1 = \sin\theta_1, c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2), s_{12} =$

$\sin(\theta_1 + \theta_2)$ 依次类推。

3 逆运动学方程的推导及求解

逆运动学问题是已知机器人末端执行器的位姿,求解各对应的关节变量。本研究利用 Paul 等人^[9]提出的反变换法进行求解。

将式(3)变形为:

$${}^0T_1(\theta_1)^{-1}T_4 = {}^1T_2T_3T_4 \quad (4)$$

由式(4)矩阵方程两端的元素(2,4)对应相等可得:

$$-p_x s_1 + p_y c_1 = 0 \quad (5)$$

求得:

$$\theta_1 = \text{Atan2}(p_y, p_x) \quad (6)$$

同理可求得:

$$\theta_2 = \text{Atan2}\left(\frac{k_2}{\rho}, \pm \sqrt{1 - \frac{k_2^2}{\rho^2}}\right) - \text{Atan2}(k_1, (p_z - d_1)) \quad (7)$$

$$\theta_3 = \text{Atan2}(k_3, k_4) \quad (8)$$

$$\theta_4 = \text{Atan2}(s_4, c_4) \quad (9)$$

式中:

$$k_1 = c_1 p_x + s_1 p_y;$$

$$k_2 = [k_1^2 + (p_z - d_1)^2 + a_2^2 - a_3^2]/2a_2;$$

$$k_3 = -s_2 k_1 + (p_z - d_1) c_2;$$

$$k_4 = c_2 k_1 + (p_z - d_1) s_2 - a_2;$$

$$c_4 = c_3(c_2 c_1 n_x + c_2 s_1 n_y + s_2 n_z) + s_3(-s_2 c_1 n_x - s_2 s_1 n_y + c_2 n_z);$$

$$s_4 = -s_3(c_2 c_1 n_x + c_2 s_1 n_y + s_2 n_z) + c_3(-s_2 c_1 n_x - s_2 s_1 n_y + c_2 n_z)。$$

从以上逆解所求关节角表达式可知,对于每一个末端位姿,同时对应着两种关节角度值。而控制机器人各关节的角度是唯一的。若忽略避障要求,可按以下步骤得到最优解。首先利用直线插补算法得到笛卡尔空间的位置和姿态序列^[10],再调用各关节角的逆解公式,得到各关节角序列;其次,通过调用动态规划算法^[11-13],选出一组最优关节角序列;最后,通过三次 B 样条插值进行连续化处理^[14-16]。

4 实例验证及仿真

已知起始点的关节位置 $q_A = [25.78 \ 50 \ 60.7 \ -37.3]$,终止点的关节位置 $q_B = [5.12 \ 80.3 \ 12.2 \ 40.5]$ 。通过机器人正向运动学求得两点在笛卡尔空间对应的位姿分别为:

$$T_A = \begin{bmatrix} -0.3307 & 0.7260 & 0.6030 & 13.8812 \\ -0.2500 & 0.5488 & -0.7977 & 10.4926 \\ -0.9100 & -0.4145 & 0 & -42.1206 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix},$$

$$T_B = \begin{bmatrix} 0.1962 & -0.3445 & -0.9181 & -0.7190 \\ -0.4543 & 0.7978 & -0.3964 & 1.6651 \\ 0.8690 & -0.4949 & 0 & -191.9975 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}。$$

本研究利用直线插补算法,得到 AB 段的位置和姿态插补后,调用逆解公式,求出 AB 段笛卡尔空间逆解得到的角度序列,如表 2 所示。

表 2 AB 段笛卡尔空间逆解所得角度序列

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	
起始点 q_A	25.78	50	60.7	-37.3	
q_1	第一解	20.8516	-29.1103	55.8924	-20.2887
	第二解	20.8516	52.7000	163.8368	119.7263
q_2	第一解	17.6889	218.0152	48.5124	-5.7298
	第二解	17.6889	54.2091	-115.5370	73.7868
q_3	第一解	10.7917	310.0379	157.7029	7.2500
	第二解	10.7917	61.9766	27.6615	-149.6282
q_4	第一解	7.3010	70.853	-127.2941	30.3718
	第二解	7.3010	-59.0901	20.7059	-171.2348
终止点 q_B	5.12	80.3	11.2	40.5	

笔者再通过动态规划算法选出一组最优角度序列如表 3 所示。

表 3 AB 段最优角度序列

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
起始点 q_A	25.78	50	60.7	-37.3
q_1	20.8516	52.7000	55.8924	-20.2887
q_2	17.6889	54.2091	48.5124	-5.7298
q_3	10.7917	61.9766	27.6615	7.2500
q_4	7.3010	70.853	20.7059	30.3718
终止点 q_B	5.12	80.3	12.2	40.5

从表 3 数据可以看出,所得最优角度序列是离散序列,为了使关节角位移、速度、加速度皆连续,需对离散序列进行连续化处理。本研究采用三次 B 样条插值进行拟合并用 Matlab 软件编程实现仿真^[17]。

各关节角位移变化如图 3 所示。

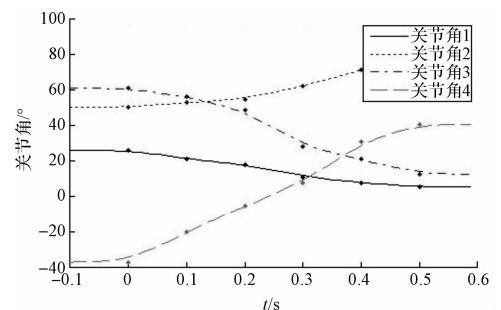


图 3 各关节角位移变化情况

5 结束语

(1) 本研究在求解关节角逆解过程中使用了双变量反正切函数,通过两变量的符号可以判断逆解所在的象限,避免了解的丢失,同时也保证了角的精度。

(2) 本研究在笛卡尔空间采用直线插补算法,得到了实例的位置和姿态插补。调用逆解公式,求得笛卡尔空间逆解的角度序列,并用动态规划算法选出了一组最优解序列。通过 Matlab 软件编程,验证了运动学解的正确性和算法的有效性。

(3) 本研究对于离散的最优解序列,利用三次 B 样条插值进行连续化处理,保证了机器人运动的平稳性,并通过 Matlab 软件仿真,仿真结果(图 3)达到了预期目标,验证了算法的正确性。

(4) 本研究所得结果为该型机器人的应用及轨迹规划与控制器的研究打下了基础。同时,本研究采用的算法和思想也适用于其他类型的多关节机器人。

参考文献(References):

- [1] 李 庆,谢一首,郑力新,等. STEP-SA1400 型机器人运动学建模与仿真[J]. 微型机与应用,2016,35(5):4-7,11.
- [2] KOKER R, OZ C, CAKAR T, et al. A study of Neural network based inverse kinematics solution for a three-Joint robot [J]. *Robotics and Autonomous System*, 2004, 49 (3 - 4):227-234.
- [3] 张立栋,李亮玉,王天琪. 工业机器人逆解问题的旋量解法[J]. 机械科学与技术,2016,4(35):539-544.
- [4] 董伯麟,彭 航. 工业机器人逆运动学的奇异回避算法[J]. 机械设计与研究,2016,2(32):35-40.

- [5] 张 用,郝卫东,朱博譔,等. 六自由度机器人焊接轨迹研究[J]. 微型机与应用,2016,35(7):16-18.
- [6] 程永伦,朱世强,刘松国,等. 基于 Matlab 的 QJ-6R 焊接机器人运动学分析及仿真[J]. 机电工程,2007,24(11):107-110.
- [7] 王其军,杜建军. MOTOMAN 机器人逆运动学新分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010,42(3):451-454.
- [8] John J Craig. 机器人学导论[M]. 3 版. 北京:机械工业出版社,2006.
- [9] 蔡自兴. 机器人学[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2009.
- [10] 刘松国. 六自由度串联机器人运动优化与轨迹跟踪控制研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2009.
- [11] 张 军,钟竞辉. 算法设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- [12] ROOZEGAR M, MSHJOOB M J, JAHROMI M. Optimal motion planning and control of a nonholonomic spherical robot using dynamic programming approach: simulation and experimental results[J]. *Mechatronics*, 2016(5):1-11.
- [13] 付晓龙,何建萍,王付鑫. 焊接机器人轨道规划的研究现状[J]. 轻工机械,2015,33(2):110-113.
- [14] 李林峰,马 蕾. 三次均匀 B 样条在工业机器人轨迹规划中的应用研究[J]. 科学技术与工程,2013,13(13):3621-3625,3646
- [15] 王付值,刘满禄,张 婧,等. 基于 ADAMS 的六轮自适应越障机器人的设计与研究[J]. 机械,2014,41(5):61-65.
- [16] 孙开林. 六自由度工业机器人运动与控制技术的研究[D]. 无锡:江南大学机械工程学院,2012.
- [17] 赵书兰. MATLAB 编程与最优化设计应用[M]. 北京:电子工业出版社,2013.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

蔡汉明,钱永恒. Dobot 型机器人运动学分析与仿真[J]. 机电工程,2016,33(10):1217-1220.

CAI Han-ming, QIAN Yong-heng. Kinematics analysis and simulation of Dobot robot[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(10):1217-1220.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>