

基于 MATLAB 的 PUMA560 机器人运动仿真研究 Study on the Simulation of PUMA560 Robot Motion Based on MATLAB

臧庆凯, 李春贵, 闫向磊

ZANG Qing-kai, LI Chun-gui, YAN Xiang-lei

(广西工学院计算机工程系, 广西柳州 545006)

(Department of Computer Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou, Guangxi, 545006, China)

摘要:在 MATLAB 环境下,对 PUMA560 机器人进行参数设计,分析 PUMA560 机器人的运动,利用 Robotics toolbox 工具箱对机器人的正运动、逆运动、轨迹规划进行仿真,得到了良好的效果。

关键词:机器人 运动 轨迹规划 计算机仿真

中图分类号:TP24 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-7378(2010)04-0397-04

Abstract:In the MATLAB environment, the parameters of PUMA560 robot were designed and the problems of kinematics were analyzed. Using the Robotics Toolbox for the MATLAB, the simulations of PUMA560 robot on kinematics, inverse kinematics and the trajectory planning were carried out. The satisfied results were obtained.

Key words:Robot, motion, trajectory planning, computer simulation

利用计算机可视化和面向对象的手段进行机器人仿真,模拟机器人的动态特性,帮助研究人员了解机器人工作空间的形态及极限,揭示机构的合理运动方案和控制算法,并在机器人上模拟能够实现的功能,使用户直接看到设计效果,及时找出缺点和不足进行改进,从而解决在机器人设计、制造和运行过程中的问题,避免直接操作实体可能造成的事故和不必要的损失,这将使机器人的研究和生产进入一个可预知的新时代^[1,2]。一个新的机器人工作程序编制完成后,先在仿真软件中观察运行结果,分析检验轨迹规划和作业规划的正确性和合理性,为离线编程技术的研究提供有效的验证手段^[3]。

本文在 MATLAB 环境下,对 Unimation 公司生产的 6 自由度串联结构的 PUMA560 机器人^[1,2]进行参数设计,分析 PUMA560 机器人的运动学问

题,利用 Robotics toolbox 工具箱对机器人的正运动学、逆运动学、轨迹规划问题进行仿真,观察各关节运动,得到了良好的效果。

1 PUMA560 机器人的参数设计

1.1 连杆参数和坐标系

机器人机械手由一系列连接在一起的连杆构成,需要用 2 个参数来描述一个连杆,即公共法线距离 a_i 和垂直于 a_i 所在平面两轴线的夹角 α_i ;需要另外 2 个参数来表示相邻两连杆的关系,即两连杆的相对位置 d_i 和两连杆的法线的夹角 θ_i 。这 4 个连杆参数定义如下: α_i 是两关节的关节轴线 J_i 与 J_{i+1} 的夹角为连杆扭转角; a_i 是两关节的关节轴线 J_i 与 J_{i+1} 的公垂线的距离为连杆长度; θ_i 是相邻两条公垂线 a_{i-1} 与 a_i 的夹角为关节角; d_i 是相邻两条公垂线 a_{i-1} 与 a_i 的距离为连杆偏移量。对于转动关节来说, θ_i 为变量,其余为常量;对于移动关节来说, d_i 为变量,其余为常量。

采用为关节链中的每一杆件建立附体坐标系的矩阵方法 D-H^[2],为每个关节处的杆件坐标系建立

收稿日期:2010-09-21

修回日期:2010-10-16

作者简介:臧庆凯,男(1986-),硕士研究生,主要从事机器人控制、机器学习与智能系统方面的研究。

4×4 齐次变换矩阵,表示它与前一杆件坐标系的关系。定义 $X_0Y_0Z_0$ 是与固定坐标系相连的固定参考坐标系,称为基坐标系;原点 O_i 是取关节轴线 J_i 与 J_{i+1} 的公垂线在 J_i 的交点为坐标原点; Z_i 轴是取 J_i 轴的方向为 Z_i 轴方向; X_i 轴是取关节 J_i 与 J_{i+1} 的公垂线从 O_i 指向 J_{i+1} 的方向为 X_i 轴的方向; Y_i 轴是根据右手定则,由 X_i 轴和 Z_i 轴确定 Y_i 轴的方向; α_i 可以看成是绕 X_i 轴, Z_i 轴到 Z_{i+1} 轴的角度; a_i 可以看成是沿 X_i 轴方向, Z_i 轴到 Z_{i+1} 轴的距离; θ_i 可以看成是绕 Z_i 轴, X_{i-1} 轴到 X_i 轴的角度; d_i 可以看成是沿 Z_i 轴, X_{i-1} 轴到 X_i 轴的距离。

1.2 PUMA560 机器人连杆参数

PUMA560 机器人由 6 自由度旋转关节构成^[1,2],其构成示意图如图 1 所示。参照人体结构,机器人的第 1 个关节(J_1)通常称为腰关节,第 2 个关节(J_2)通常称为肩关节,第 3 个关节(J_3)通常称为肘关节,关节轴线为 J_4, J_5, J_6 的关节通常统称为腕关节。其中前 3 个关节确定手腕参考点位置,后 3 个关节确定手腕的方位。

关节 J_1 的轴线为铅直方向,关节 J_2, J_3 的轴线方向水平而且平行,距离为 a_3 。关节 J_1, J_2 轴线垂直相交,关节 J_3, J_4 轴线垂直交错,距离为 a_4 。后 3 个关节的轴线相交于一点,该点也选作坐标系 {4}, {5}, {6} 的原点^[1]。各连杆坐标系如图 2 所示。

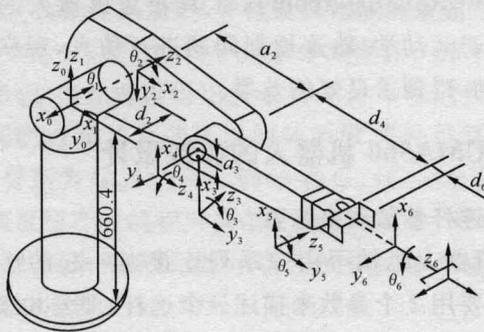


图 1 PUMA560 机器人模型

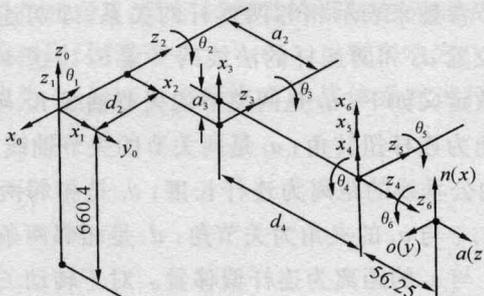


图 2 PUMA560 机器人的坐标

PUMA560 机器人的连杆参数如表 1 所示。其中 $a_2=0.4318\text{m}$, $a_3=0.0203\text{m}$, $d_2=0.1491\text{m}$, $d_4=0.4331\text{m}$ 。

表 1 PUMA560 机器人的连杆参数

连杆 i	$\alpha_{i-1} (^{\circ})$	$a_{i-1} (\text{m})$	$\theta_i (^{\circ})$	$d_i (\text{m})$	变量范围
1	0	0	90	0	-160~160
2	-90	0	0	0.1491	-225~45
3	0	0.4318	-90	0	-45~225
4	-90	-0.0203	0	0.4331	-110~170
5	90	0	0	0	-100~100
6	-90	0	0	0	-266~266

2 PUMA560 机器人的运动学分析

2.1 连杆变换矩阵

对于图 2 建立的连杆坐标系,连杆 $i-1$ 坐标系经过 2 次旋转和 2 次平移可以变换到连杆 i 的坐标系。这 4 次变换分别为:(1)沿 X_{i-1} 轴平移 a_{i-1} ,将 O_{i-1} 移动到 O'_{i-1} ; (2)以 X_{i-1} 为转轴,旋转 α_{i-1} 角度,使新的 Z_{i-1} 轴与 Z_i 轴同向; (3)沿 Z_i 轴平移 d_i ,使 O'_{i-1} 移动到 O_i ; (4)以 Z_i 轴为转轴,旋转 θ_i 角度,使新的 X_{i-1} 轴与 X_i 轴同向。

至此,坐标系 $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ 与坐标系 $O_iX_iY_iZ_i$ 已经完全重合。这种变换关系可以用连杆 $i-1$ 到连杆 i 的 4 个其次变换来描述,这 4 个齐次变换构成总变换矩阵(D-H 矩阵)。

$$A_i = \text{Trans}(a_{i-1}, 0, 0) \text{Rot}(X_{i-1}, \alpha_{i-1}) \text{Trans}(0, 0, d_i) \text{Rot}(Z_i, \theta_i) =$$

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

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 机器人正运动学

机器人的正向运动学,描述的就是机器人的关节空间到末端笛卡尔空间的映射关系,即给定连杆的各项参数,求解末端连杆坐标系相对于基坐标系的位姿。

将表 1 中机器人的参数代入式(1),得到第 i 坐标系相对于第 $i-1$ 坐标系的位姿 A_i ,则第 i 坐标系相对于基坐标系的位姿的齐次变换矩阵⁰ T_i ,表

示为:

$${}^0T_i = A_1 A_2 \cdots A_i. \quad (2)$$

当 $i=6$ 时, 0T_6 确定了机器人末端连杆坐标系相对于基坐标系的位姿。

$${}^0T_6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6, \quad (3)$$

其中:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.1491 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0.4318 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & -0.0203 \\ 0 & 0 & 1 & 0.4331 \\ -\sin \theta_4 & -\cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0.1491 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_6 & -\cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2.3 机器人逆运动学

机器人的逆运动学,描述的是机器人的末端笛卡尔空间到关节空间的映射关系。即已知末端连杆的位姿 0T_6 , 求解各关节变量。对于 PUMA560 机器人,需要求解的变量为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 。

机器人逆运动学求解的方法是,对(3)式两边依次左乘 A 的逆矩阵,并使两端相等矩阵的对应元素相等,即可求得各关节变量。

求解各关节变量的方程式如下:

$$A_1^{-1} * {}^0T_6 = A_2 A_3 A_4 A_5 A_6,$$

$$A_2^{-1} A_1^{-1} * {}^0T_6 = A_3 A_4 A_5 A_6,$$

$$A_3^{-1} A_2^{-1} A_1^{-1} * {}^0T_6 = A_4 A_5 A_6,$$

$$A_4^{-1} A_3^{-1} A_2^{-1} A_1^{-1} * {}^0T_6 = A_5 A_6,$$

$$A_5^{-1} A_4^{-1} A_3^{-1} A_2^{-1} A_1^{-1} * {}^0T_6 = A_5 A_6,$$

$$A_5^{-1} A_4^{-1} A_3^{-1} A_2^{-1} A_1^{-1} * {}^0T_6 = A_6.$$

3 运动仿真

研究点到点运动的轨迹规划仿真。在基于 Matlab 的机器人仿真工具箱 Robotics Toolbox 中^[4],采用改进的 D-H 参数,按照上文中坐标系的建立和 $\alpha_i, a_i, \theta_i, d_i$ 的定义,link 函数的前 4 个元素依次为 $\alpha_{i-1}, a_{i-1}, \theta_i, d_i$,最后 1 个元素是 0(代表转动关节)或 1(代表移动关节),link 函数最后的参数为 'mod', 以此进行 PUMA560 机器人运动仿真。(1)根据表 1 的数据,构建机器人的仿真程序。(2)显示机器人的三维图如图 3 所示,这是机器人在初始位置 ($\theta_i = 0$) 时的三维图,可以通过调节滑块的位置来使关节转动,就像实际操作机器人一样^[3,5]。(3) A 点为初始位置,表示为 $qA = [0, 0, 0, 0, 0, 0]$,对于图 1 中机器人的位置为 B 点,表示为 $qB = [\pi/2, 0 - \pi/2, 0, 0, 0]$,实现机器人正运动学的求解,即求得机械手在 B 点相对于基坐标系的齐次变换矩阵 TB。机器人在 qB 位置的三维图如图 4 所示。图 4 中机器人的三维图正好与图 1 中机器人的示意图一致。(4)根据齐次变换矩阵求得由初始位置到指定位置时各关节变量。(5)对机器人由 A 点到 B 点的运动轨迹进行仿真,仿真时间是 2s,时间间隔是 0.056s,绘出机器人由 A 点运动到 B 点,各关节随时间变换的位置图像(图 5),而且还可以很容易得到关节的速度图像(图 6)。机器人末端关节沿 X, Y, Z 方向的运动轨迹(图 7),而且也很容易得到机器人末端关节在三维空间的运动轨迹(图 8)。通过调节各关节参数,可以使图 3 中各关节按照设计时的要求转动,即关节 1 绕铅直方向转动,关节 2,3 绕水平方向转动,后 3 个关节可以使末端关节具有不同的姿态,从而验证了仿真的合理性。

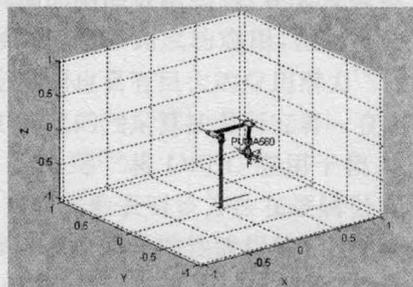


图 3 PUMA560 机器人的三维图

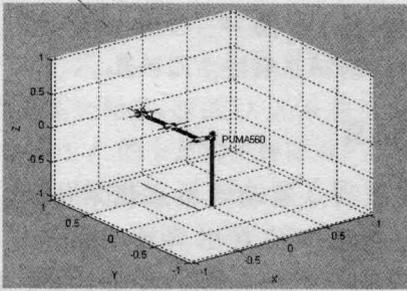


图4 机器人在 qB 位置时的三维图

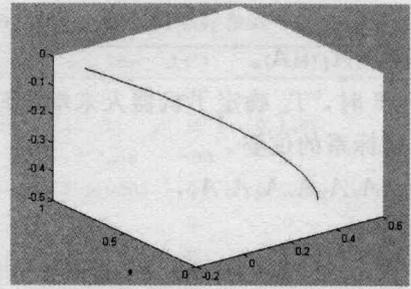


图8 末端关节在三维空间的运动轨迹

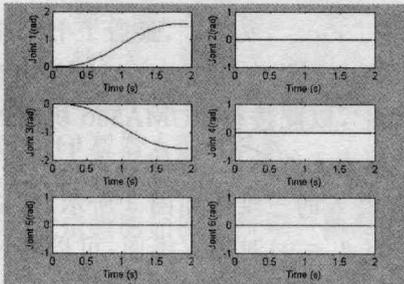


图5 关节随时间变化的位置图像

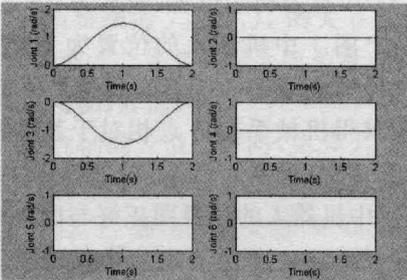


图6 关节随时间变化的速度图像

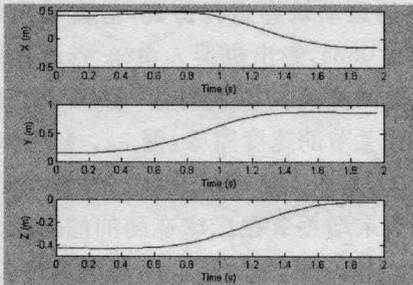


图7 末端关节沿 X,Y,Z 方向的运动轨迹

由图5和图6我们可以看到各关节能够平稳的由初态运动到末态,图7和图8说明机器人由A运动到B,末端关节平稳的由初态到达末态,达到了运动规划的目标。

参考文献:

- [1] 谭民,徐德,侯增广,等. 先进机器人控制[M]. 北京: 高等教育出版社,2007.
- [2] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [3] 罗家佳,胡国清. 基于 MATLAB 的机器人运动仿真研究 [J]. 厦门大学学报:自然科学版,2005, 44(5): 640-644.
- [4] Coke P I. A Robotic Toolbox for MATLAB[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 1996, 3(1):24-32.
- [5] 舒志兵,张海荣. 多关节机器人的运动学动态仿真研究[J]. 机器人技术与应用,2006 (6): 39-42.

(责任编辑:邓大玉)