

doi:10. 16055/j. issn. 1672-058X. 2021. 0006. 007

基于 dSPACE 的工业机器人运动控制系统 仿真分析及实验

路博凡, 韩家哺, 张艳伟

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘 要:针对用 ER20-1700 机械臂实现运动控制,提出了一种有效的控制方法;首先对 ER20-1700 机器人的三维建模进行运动学分析建立 DH 参数表算出机器人的逆解,再把 SolidWorks 中的三维模型用插件导入 Simulink 中快速搭建机械控制模型,然后搭建并改良电机驱动物理模型,补全整个控制模型,实现机械臂 Simscape 正逆解仿真;把算好的逆解用编程的方式写入 MATLAB 中用 robotics tool 中进行仿真模拟,并将其与 Simulink 中的仿真结果进行对比;通过编写函数程序在 MATLAB 中实现机械臂走直线和画圆的轨迹规划;通过搭建实验平台,使用 dSPACE 作为控制器把之前的控制模型转化为代码导入其中以实现机械臂的快速控制,控制机器人做直线和画圆运动,记录轨迹规划和实际机械臂所走的数据导入 MATLAB 绘制成图;实验结果表明:走直线和走圆时,最大跟踪误差小于 3 mm,控制方法可行有效。

关键词:打磨机器人;dSPACE;MATLAB/simulink

中图分类号:TH 117 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-058X(2021)06-0050-08

0 引 言

近些年来,越来越多的汽车工厂在一定精度工业生产^[1]中开始用串联机器人打磨轮毂来代替人工打磨,做法有着低成本高效率等优点,所以对于串联机械臂控制的研发也是一种大趋势。之前在国内对串联机械臂以传统方法控制较多,是以求出六自由度的机器人的正解^[2]、IPC+PMAC 的控制方法在 RTLinux 上开发工业机器人的控制系统^[3]。求解的逆利用仿生机器人^[4],机器人进行运动学标定^[5]、或是进行焊接路径的视觉识别与轨迹规划^[6]用运行程序、停止程序运行以及反馈界面从而实现了实验平台的搭建^[7]。但这种控制方法设计周期长成本高,现在使用 Lapusan 与 Simulink 的便利实现了,机器人的仿真模型和末端轨迹反映实验并借助

dSPACE 搭建了机器人的控制系统^[8]。因为 MATLAB/Simulink 是同一家公司生产的所以可以在操作使用上无缝连接,通过 Simulink 建模仿真的方法模拟控制器,可以在现实开发中节约成本以及减少因为硬件配套而要重新开发驱动的时间从而缩短了串联机器人控制系统研发周期^[9-10]。

在正常快速搭建控制模型的基础上对电机参数及机械臂的 Simscape 物理模型进行改进,从而得到更好的控制效果。

1 ER20-1700 机器人的运动建模

ER20-1700 机器人是国内市场上主流机械臂的一种,主要用于切割、打磨、上下料等场合,具有 6 个自由度,并且末端位置和姿态存在解耦关系。ER20-1700 实物模型如图 1 所示。

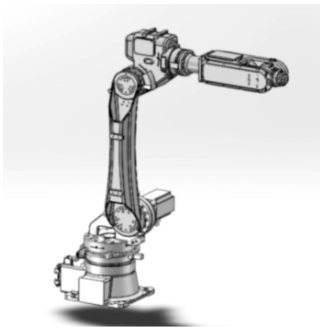


图 1 ER20-1700 机器人结构

Fig. 1 ER20-1700 robot structure

2 机器人运动学正逆解

2.1 确定机器人改进 D-H 参数

用改进 D-H 方法进行运动学建模,坐标系的 X 轴方向和连杆两端连接关节的公垂线共线,坐标系的 Z 轴方向和连杆所连接的左端关节的轴线共线,根据右手定则,来确定 Y 轴方向,然后连杆、连杆左端关节以及坐标系都是同一个编号 $i-1$ 。 a_{i-1} 为两个关节轴线之间的公垂线长度即连杆长度。 d_i, θ_i 描述了关节自身的运动状态,其中 d_i 被称为关节偏距, θ_i 被称为关节转角。

图 2 为机器人的运动模型图,图中 $\{O-XYZ\}$ 是机器人的基座标系, $\{o_i-x_iy_iz_i\}$ 是机器人末端坐标, $L_0, L_1, L_2, L_3, L_4, H_b$ 是对应机器人的连杆之间的距离,分别是 50、270、70、299、78.5 和 321.5 mm,机器人的 DH 参数见表 1。

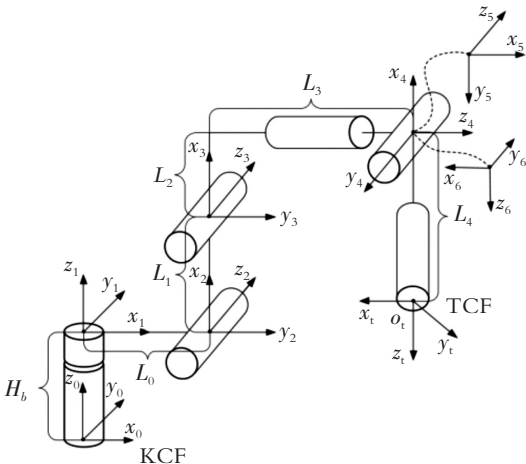


图 2 机器人运动模型图

Fig. 2 Robot motion model

表 1 机器人 DH 参数表

Table 1 D-h parameters of the ER20-1700

编号 i	α_{i-1}/rad	a_{i-1}/mm	θ_i/rad	d_i/mm
1	0	0	t_1	321.5
2	$-\pi/2$	50	$70-\pi/2$	0
3	0	270	t_3	0
4	$-\pi/2$	70	t_4	299
5	$\pi/2$	0	$t_5+\pi/2$	0
6	$-\pi/2$	0	$t_6+\pi$	0

2.2 机器人运动学逆解

根据末端坐标系和基座标系之间的关系矩阵:

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

可以将矩阵分为两个部分,可以分别用来表示末端相对于世界坐标系中的位置向量 $t = [p_x \ p_y \ p_z]^T$, 和旋转矩阵

$$R = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}$$

采用代数法来分析机器人的逆运动学。根据前面建立的机器人的 MDH 坐标图,可知机器人的 4、5、6 轴交于机器人末端的一个点,所以这 3 轴的变化不会影响该点的位置变化,因此可以先求解前 3 轴,再求解后 3 轴,求解步骤如下:

(1) 对 θ_1 求解。

$${}^0T_1^{-1}T^6T_e^{-1} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中矩阵各元素的具体表达式为

$$\begin{aligned} m_{11} &= n_x c_1 + n_y s_1 & m_{12} &= o_x c_1 + o_y s_1 \\ m_{13} &= a_x c_1 + a_y s_1 & m_{14} &= p_x c_1 + p_y s_1 - L_4 a_x c_1 - L_4 a_y s_1 \\ m_{21} &= n_y c_1 - n_x s_1 & m_{22} &= o_y c_1 - o_x s_1 \\ m_{23} &= a_y c_1 - a_x s_1 & m_{24} &= p_y c_1 - p_x s_1 - L_4 a_y c_1 + L_4 a_x s_1 \\ m_{31} &= n_z & m_{32} &= o_z \\ m_{33} &= a_z & m_{34} &= p_z - H_b - L_4 a_z \end{aligned}$$

这里 c_i, s_i , 表示 $\cos(t_i)$ 和 $\sin(t_i)$ 的缩略形式, 等式右边中第 2 行第 4 列元素为零, 联立 $m_{24}=p_y c_1 -$

$p_x s_1 - L_4 a_y c_1 + L_4 a_x s_1$ 可以解出 θ_1 :

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y - 78.5 a_y}{p_x - 78.5 a_x}\right)$$

(2) 对 θ_3 求解。

$${}^1T_2^{-10}T_1^{-1}T^6T_e^{-1} =$$

$$\begin{bmatrix} c_2 m_{31} + s_2 m_{11} & c_2 m_{32} + s_2 m_{12} & c_2 m_{33} + s_2 m_{13} & c_2 m_{34} - L_0 s_2 + m_{14} s_2 \\ m_{11} c_2 - m_{31} s_2 & m_{12} c_2 - m_{32} s_2 & m_{13} c_2 - m_{33} s_2 & m_{14} c_2 - L_0 c_2 - m_{34} s_2 \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在等式右边的结果中,选取和 θ_2 相关的部分,分别是第 1 行第 4 个结果和第 2 行第 4 个结果:

$$c_2 m_{34} + (m_{14} - L_0) s_2 = L_1 + L_2 c_3 - L_3 s_3 (m_{14} - L_0) c_2 - s_2 m_{34} = L_3 c_3 + L_2 s_3$$

对上式进行平方相加整理可得:

$$A_1 c_3 + B_1 s_3 = C_1$$

其中:

$$A_1 = 37\ 800 \quad B_1 = -161\ 460$$

$$C_1 = 2\ 500 - 100 m_{14} + m_{14}^2 + m_{34}^2 - 167\ 201$$

$$\beta_1 = \arctan(A_1/B_1)$$

$$\theta_3 = \pm \arcsin(C_1/2.6 * 10^{10}) - \beta_1$$

(3) 求解 θ_2 。

将求得的 θ_3 结果代入下式

$$c_2 m_{34} + (m_{14} - L_0) s_2 = L_1 + L_2 c_3 - L_3 s_3$$

可以求得 θ_2 其中:

$$A_2 = m_{34}$$

$$B_2 = m_{14} - 50$$

$$C_2 = 270 + 70 c_3 - 299 s_3$$

$$\beta_2 = \arctan(A_2/B_2)$$

$$\theta_2 = \pm \arcsin(C_2/\sqrt{m_{34}^2 + (m_{14} - 50)^2}) - \beta_2$$

(4) 求解 $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ 。

取 MDH 中变换矩阵的旋转部分 $R_1 \sim R_6$, 这样可以构建等式:

$$R_3^{-1} R_2^{-1} R_1^{-1} R = R_4 R_5 R_6$$

分别取等式两边矩阵中第 3 列,第 1 行和第 3 行的元素相除,可得:

$$\frac{c_5 s_4}{c_5 c_4} = \frac{a_x s_1 - a_y c_1}{a_z c_{23} + a_x s_{23} c_1 + a_y s_{23} s_1}$$

$$\theta_4 = \arctan\left(\frac{a_x s_1 - a_y c_1}{a_z c_{23} + a_x s_{23} c_1 + a_y s_{23} s_1}\right)$$

当 $c_5 = 0$ 的时候,机器人第 4 轴和第 6 轴重合,

机器人失去一个自由度,关节进入奇异位置,这是在规划机器人关节空间运动时需要避免的情况。

当 $\cos(\theta_4) \neq 0$ 的时候,可以利用 $R_3^{-1} R_2^{-1} R_1^{-1} R = R_4 R_5 R_6$ 等式中第 3 列第 2 行除以第 3 列第 1 行,解得 θ_5 :

$$\theta_5 = \arctan\left(\frac{c_4(a_x c_{23} c_1 + a_y c_{23} s_1 - a_z s_{23})}{a_x s_{23} c_1 + a_y s_{23} s_1 + a_z c_{23}}\right)$$

当 $\cos(\theta_4) = 0$ 的时候,可以利用 $R_3^{-1} R_2^{-1} R_1^{-1} R = R_4 R_5 R_6$ 中第 3 列第 2 行除以第 3 列第 3 行,解得 θ_5 :

$$\theta_5 = \arctan\left(\frac{s_4(a_x c_{23} c_1 + a_y c_{23} s_1 - a_z s_{23})}{a_x s_1 - a_y c_1}\right)$$

当 $c_5 = 0$ 时,可以充分利用 $R_3^{-1} R_2^{-1} R_1^{-1} R = R_4 R_5 R_6$ 中第二行第二列除以第二行第一列,解得 θ_6 :

$$\frac{c_5 s_6}{-c_5 c_6} = \frac{o_x c_{23} c_1 + o_y c_{23} s_1 - o_z s_{23}}{n_x c_{23} c_1 + n_y c_{23} s_1 - n_z s_{23}}$$

$$\theta_6 = \arctan\left(\frac{o_x c_{23} c_1 + o_y c_{23} s_1 - o_z s_{23}}{-n_x c_{23} c_1 + n_y c_{23} s_1 + n_z s_{23}}\right)$$

3 ER20-1700 机器人控制系统设计

3.1 基于 SimMechanic 工具箱的机器人建模

首先将打开已经完成的三维建模装配体,注意关节之间的约束关系并在导入 Matlab 之前要尽量简化模型,使之保证导入的完整性和正确性。

(1) 在工具栏内点击 Simscape Multibody Link 内的 Export 来生成 MATLAB 可以读取的 step 和 xml 格式文件。

(2) 导出 xml 格式文件之后,在 MATLAB 命令窗口中输入指令:smimport;来生成 Simscape 物理模型。

(3) 将 Torque 设置为 Automatically Computed, Motion 设置为 Provide By Input,将传感器的信号勾选作为输出。对于六自由机械臂而言,需要控制的是 6 个旋转坐标系,为了实现控制,对其内部属性进行修改。

关节 1 配置完后如图 3 所示。

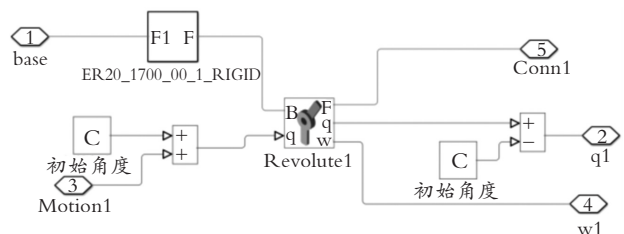


图 3 关节 1 模型图

Fig. 3 Joint 1 model

(4) 将每个 Rotation 配置成这样之后,就可以将外部的角度信号输入给机械臂 Simscape 模型中的每个关节,输出信号选择为角度值。配置完毕之

后选中所有单击右键 Creat Subsystem from Select 将整个 Simscape 封装。改进后的机械臂 Simscape 物理模型如图 4 所示。

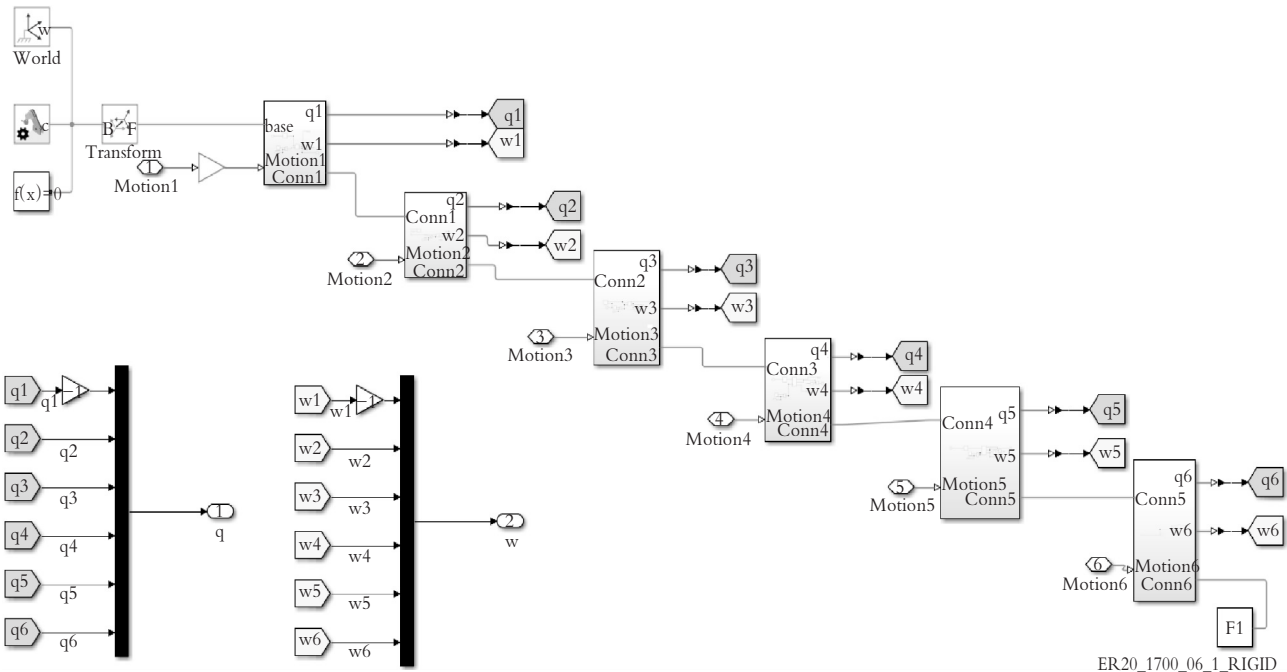


图 4 改进后的机械臂 Simscape 物理模型

Fig. 4 Improved mechanical arm Simscape physical model

3.2 搭建电机驱动 Simscape 物理模型

因为在 Simulink 中步进电机模型输出的是位置信号并且不需要编码器来检测所以可以很好地满足角度输出的要求,并且给到的 PWM 信号通过步进电机模可以输出扭矩 R 。因此需要搭建步进电机模型。

(1) 在 MATLAB 命令窗口输入 `elec_motor_stepper` 指令直接创建步进电机模型。将默认输入

给电机的阶跃信号改为 Input1,再除上步距角 1.8° 得到步进电机的步数,再给到电机的控制器,将步数转化为对应的 PWM 信号。

(2) 为了让电机信号能够输出给各个关节,并且适应不同初始角度状态的 Simscape,需要在电机的输出 a 后接 PS-Simulink 元件将电机的物理角度信号转换成 Simulink 的模拟值,修改后的电机模型如图 5 所示。

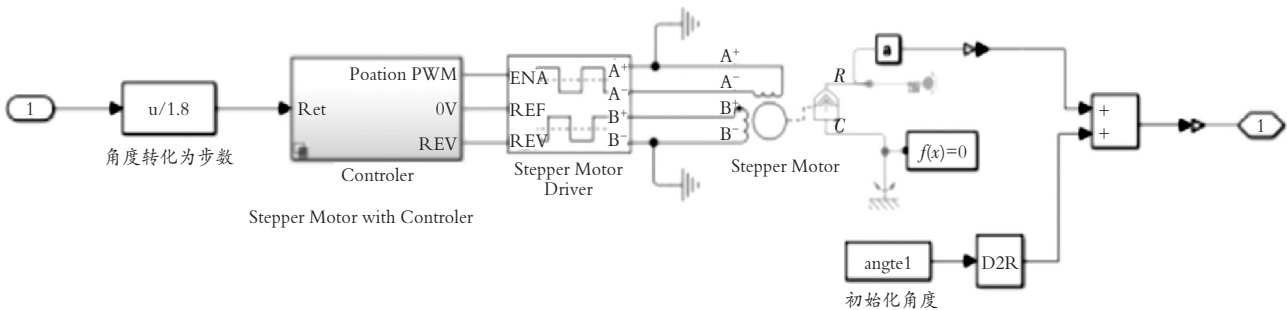


图 5 改进后步进电机模型图

Fig. 5 Improved model of rear stepper motor

3.3 机械臂 Simscape 正逆解仿真

将上面两个模块进行封装整理后,并加入之前

做好的机械臂的正解逆解算法。经整理后最终的仿真模型如图 6 所示。

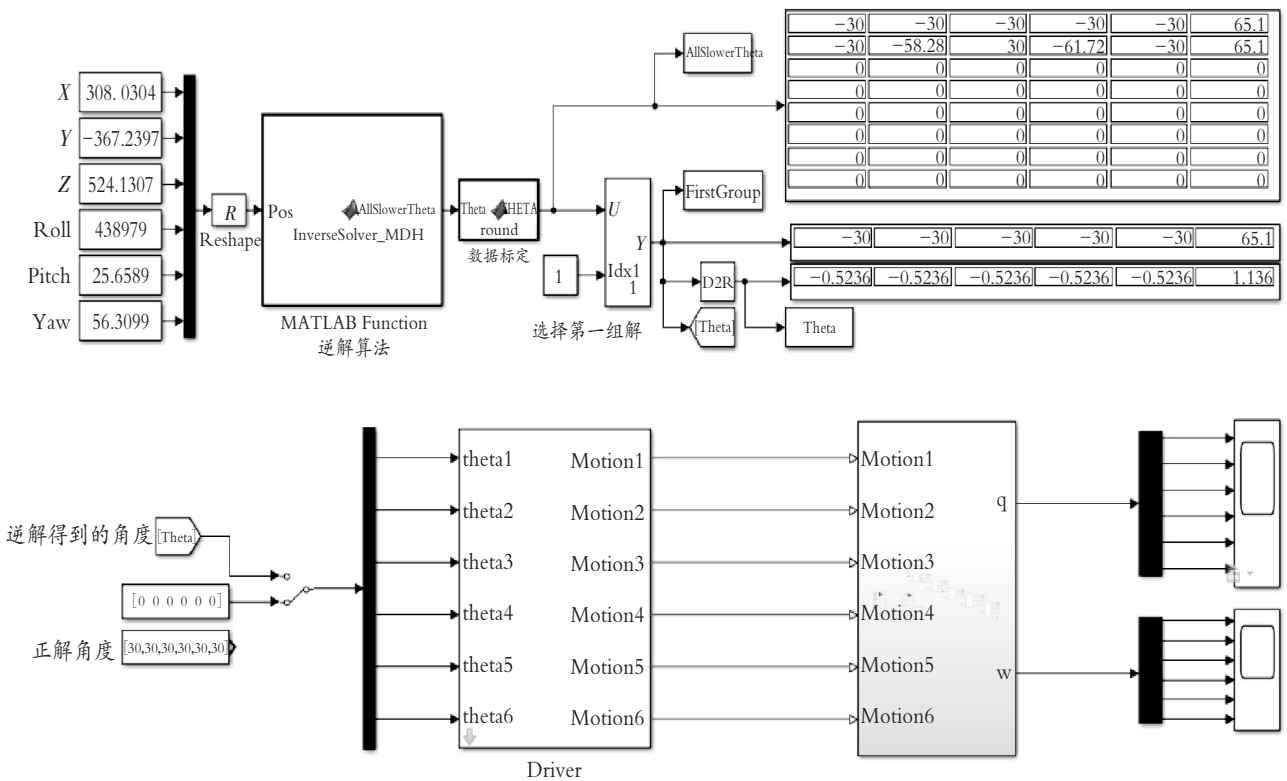


图 6 机械臂仿真模型图

Fig. 6 Mechanical arm simulation model

在模型下,在下方输入角度可以得到通过正解算法得到机器人末端的位置。在上方输入末端位置坐标可以使仿真模型中的机械臂转动相应角度。为验证其仿真的准确性,把之前的正逆解算法通过编程写入 MATLAB 的机器人工具箱中,出仿真结果。先验证正解的准确性同时输入各关节角度(-30, -60, 100, -30, 60, -30)与之前的仿真结果对比完全一致,如图 7 所示。

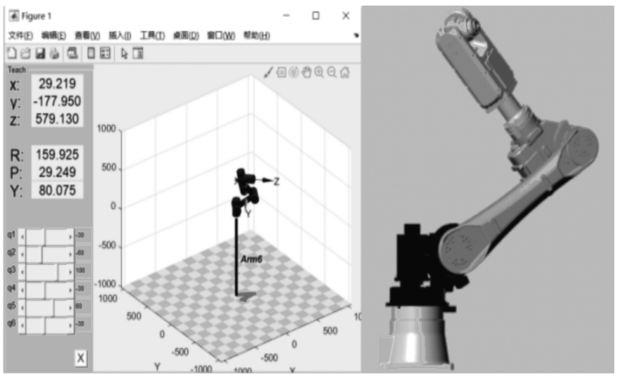


图 7 仿真结果对比图

Fig. 7 Comparison of simulation results

输入末端位置($x = 29.219, y = -177.95, z = 578.13, R = 159.925, P = 29.249, Y = 80.075$) 然后可以通过模型中 scope 模块观察到各个关节旋转的角度,如图 8 所示。

对比图 7 可得仿真模型在输入末端指令后的 2 s 内达到指定姿态。由图 10 可知关节 1 在 1 s 内达到-30 度位置,关节 2 在 2 s 内达到-60 度位置,关节 3 在 2 s 内达到 100 度位置,关节 4 在 1 s 内达到-30 度位置,关节 5 在 1 s 内达到 60 度位置,关节 6 在 1 s 内达到-30 度位置,于逆解运算结果保持一致。由此可得逆解算法正确。

3.4 机械臂的轨迹规划

在轨迹规划中,首先在 MATLAB 中运用编程建立机器人模型。定义轨迹规划中的初始关节角度 (First_Theta) 和终止关节角度 (Final_Theta) 并定义其步数为 777。随后使用 jtraj 函数带入初始角度、终止角度和步数后,可以得到关于位置、速度和加速度的一个 6×777 的矩阵,随后把得到的数据用编程制成图像。可得机械臂运动时各关节的位置曲线、速度曲线和加速度曲线如图 9 所示。

然后,再开始验证逆解准确性在仿真模型上端

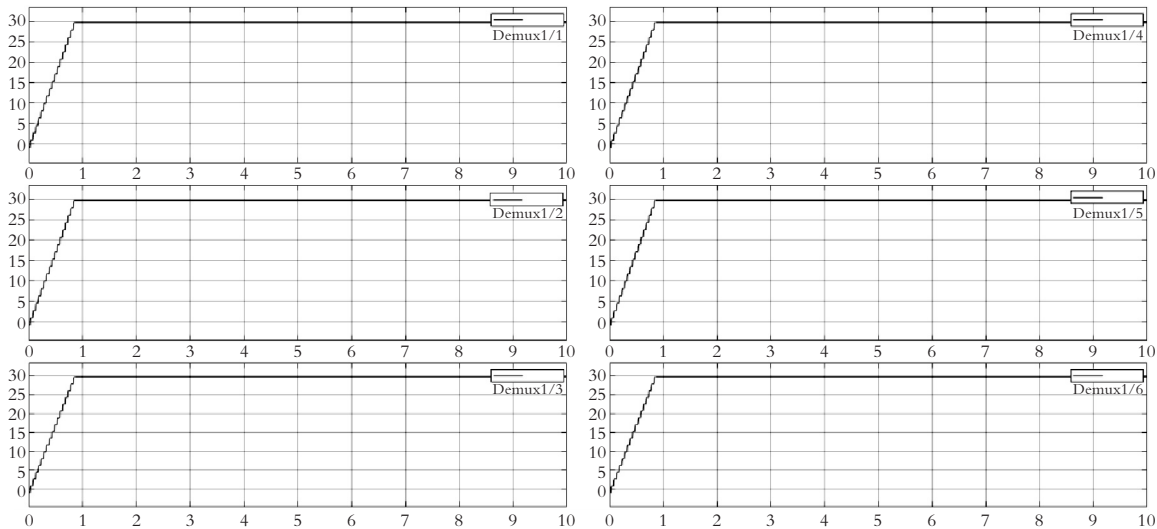


图 8 各关节旋转角度仿真结果图

Fig. 8 The results of rotation angle of each joint

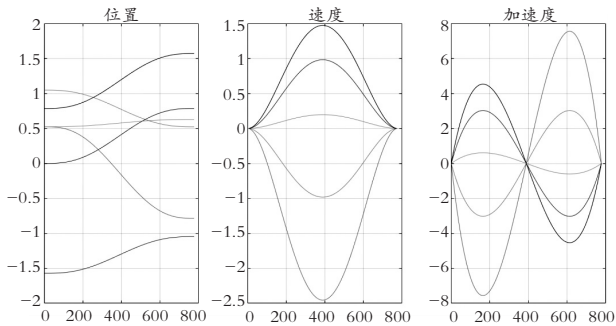


图 9 各关节的位置曲线、速度曲线和加速度曲线图

Fig. 9 Position curve, velocity curve and acceleration curve of each joint

然后通过之前计算的正运动学公式输入初始关节角度和终止关节角度可以得到起始和终止的位姿矩阵。接下来就利用 `ctrj` 在笛卡尔空间规划轨迹,在 `ctrj` 函数中输入步数起始和终止的位姿矩阵,就可以得到表示 2 点之间运动信息的齐次旋转矩阵,是一个 6×777 的矩阵,使用 `transl` 函数在齐次旋转矩阵中提取移动变量,相当于笛卡尔坐标系的点的位置。最后用编程的手段画出 A1 到 A2 直线和 B2 圆的轨迹,如图 10 所示。

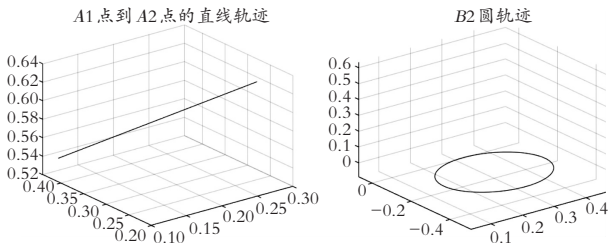


图 10 A1 到 A2 直线和 B2 圆轨迹图

Fig. 10 The A1 to A2 line and the B2 circle

4 实验平台的搭建与结果

4.1 实验设备介绍

实验平台由 dSPACE DS1007 组件系统,包含 12 个 DA 接口、12 个编码器接口、2 路 RS422 接口和 24 个 IO 接口;一台电机伺服驱动器、一块转接板、一台 ER20-1700 机械臂、紧急制动装置、一台 pc 控制台以及力矩传感器组成如图 11 所示。



图 11 串联机器人实验平台图

Fig. 11 Serial robot experiment platform

4.2 实验过程与结果

由于 Dspace 和 Simulink 是由同一家公司生产的,所以可以直接把仿真环境下系统转化为程序导入其中。当在 Simulink 软件中编译好程序后,需要在 Control Desk 软件中进行调试和变量的读取。打开 Control Desk 软件后,先加载 Simulink 软件编译的

sdf 文件,然后可以看见一个调试界面,通过配置完以后的实验界面先控制机械臂以 0.05 m/s 的速度走完 0.05 m 长的直线再控制机械臂以 0.025 m/s 的速度走完半径为 0.025 m 的圆为观测其数值显示变量的历史变化轨迹,让灵活的触发式测量和多个控件同步比较。

如图 12 所示,给出了机械臂跟踪直线和圆时机械臂的关节误差。通过 Dspace 把实验数据导入 MATLAB 中制作成实验对比图。其中虚线是系统规划在 x,y 坐标系下走的路径,实线是机械臂在 x,y 坐标系下的实际移动距离。最大跟踪误差小于 3 mm。故证明了系统及方法的有效性。

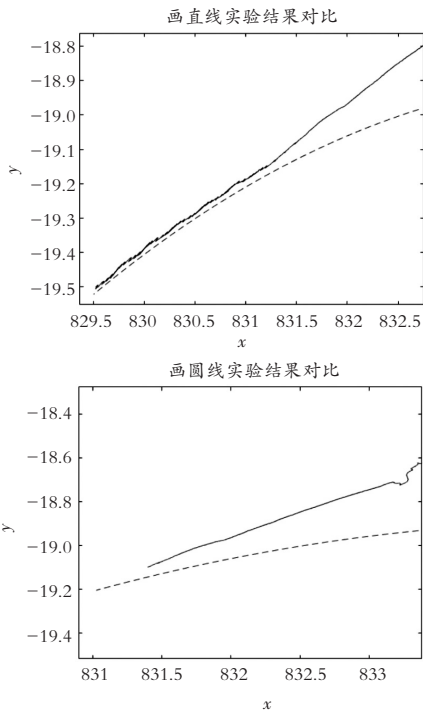


图 12 走直线与圆实验结果对比图

Fig. 12 Comparison of the experiment results of straight line and circle

5 结 论

从零搭建 ER20-1700 机器人的控制系统,先在 MATLAB/SIMULINK 中搭建仿真模型并进行仿真实验。仿真结果表明,逆解算法搭建成功。再在进行实际实验,通过 dSPACES 进行走直线和画圆实验。实验结果表明最大跟踪误差小于 3 mm,控制方法可行。

参考文献(References):

[1] 陈伟华,张铁,崔敏其. 基于五次多项式过渡的机器人轨迹规划的研究[J]. 煤矿机械, 2011, 32(12):49—50
CHEN W H, ZHANG T, CUI M Q. Research on Robot Trajectory Planning Based on the Transition of Quintic Polynomial [J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(12): 49—50(in Chinese)

[2] 于常娟. 六足仿生机器人并联运动学分析[J]. 制造业自动化,2015(11):56—58
YU C J. Kinematics Analysis of Bionic Hexapod Robot in Parallel [J]. Manufacturing Automation, 2015 (11): 56—58(in Chinese)

[3] 张学涛,杨建新,余跃庆. 高速柔性平面 3-RRR 并联机器人 实验系统开发 [J]. 机械设计与研究, 2008,24(5):39—41
ZHANG X T, YANG J X, YU Y Q. Experiment System for the High-speed Flexible Planar 3-RRR Parallel Robot [J]. Machine Design and Research, 2008,24(5):39—41(in Chinese)

[4] 皇甫亚波. 基于 LM 算法的机器人运动学标定[J]. 轻工机械,2017,35(4):1—7
HUANGFU Y B. Robot Kinematics Calibration Based on LM Algorithm[J]. Light Industrial Machinery, 2017, 35(4):1—7(in Chinese)

[5] 冯春. 基于共形几何代数的 6-DOF 机器人运动学逆解[J]. 机械设计与研究,2018(1):100—105
FENG C. Inverse Solution of 6-dof Robot Kinematics Based on Conformal Geometric Algebra [J]. Mechanical Design and Research,2018(1):100—105(in Chinese)

[6] YU Y Q, DU Z C, YANG J X, et al. Experimental Study on the Dynamics of A 3-RRR Flexible Parallel Robot [J]. IEEE Transaction on Robotics,2011,27(5):992—997

[7] 王雷. 焊接路径的视觉识别与机器人轨迹规划[D]. 广州:广东工业大学,2016
WANG L. Visual Recognition of Welding Path and Robot Trajectory Planning [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology,2016(in Chinese)

[8] LAPUSAN C, MATIES V, BALAN R. et al. Rapid Control Prototyping Using Matlab and Dspace on Application for a Planar Parallel Robot [C]//2008 IEEE International Conference on Quality and Testing, Robotics, AQTR 2008

- [9] 沈悦明,陈启军. dSPACE 快速控制原型在机器人控制中的应用 [J]. 机人,2002(6):545—549

SHEN Y M, CHEN Q J. dSPACE Rapid Control Prototyping and It's Application in Robot Control [J]. Robot,2002(6): 545—549(in Chinese)

[10] 潘峰,薛定宇,徐心和. 基于 dSPACE 半实物仿真技术
- 的伺服 控制研究与应用 [J]. 系统仿真学报,2004,16(5):936—939

PAN F,XUE D Y,XU X H. The Application of DSPACE-based Hardware-in-loop Simulation Technique in Servo Control[J]. Journal of System Simulation,2004,16(5): 936—939(in Chinese)

Simulation Analysis and Experiment of Industrial Robot Motion Control System Based on dSPACE

LU Bo-fan, HAN Jia-bu, ZHANG Yan-wei

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract:An effective control method is proposed for ER20-1700 manipulator to realize motion control. Firstly, DH parameter table was established to calculate the inverse solution of the robot through kinematic analysis of the Three-Dimensional modeling of ER20-1700 robot. Then, the three-dimensional model in SolidWorks was imported into Simulink with plug-ins to quickly build the mechanical control model. Then, the physical model driven by motor was built and improved to complete the whole control model, and the positive and inverse solution simulation of the robotic arm Simscape was realized. The calculated inverse solution was programmed into MATLAB and simulated in robotics Tool, and the simulation results were compared with those in Simulink. By writing function program in MATLAB, the manipulator to walk straight line and draw a circle trajectory planning was achieved. By building an experimental platform and using dSPACE as a controller, the previous control model was converted into code and imported into it to realize the rapid control of the robot arm. The robot was controlled to make straight lines and draw circles, and the trajectory planning was recorded and the data of the actual robot arm was imported into MATLAB to be drawn. The experimental results show that the maximum tracking error is less than 3 mm when walking in a straight line and a circle, and the control method is feasible and effective.

Key words:polishing robot;dSPACE;MATLAB/simulink

责任编辑:田 静

引用本文/Cite this paper:
路博凡,韩家哺,张艳伟. 基于 dSPACE 的工业机器人运动控制系统仿真分析及实验[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2021,38(6):50—57

LU B F, HAN J B, ZHANG Y W. Simulation Analysis and Experiment of Industrial Robot Motion Control System Based on dSPACE[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2021, 38(6): 50—57