

双手互换机械臂的运动学建模及控制研究

田志彬,崔顺风

(苏州大学 机电工程学院,江苏 苏州 215100)

摘要:设计一种通过两只手爪的转换实现翻面作业的搬运机械臂。运用机器人原理,通过 D-H 的齐次变换矩阵法建立双手机械臂的运动学模型。采用多核工控机,利用 CODESYS RTE 将工控机的一个核配置成软控制器,通过 Ethercat 协议连接实轴驱动器,实现对双手机械臂的运动仿真,并采用梯形速度规划生成平滑连续的位姿轨迹。利用 7 次多项式插值实现加速度平滑变化的轨迹,减少机械结构的冲击。仿真分析表明:双手机械臂的结构设计合理可靠,所求解出的运动学理论方程准确。

关键词:双手机械臂;运动学建模;CODESYS;轨迹规划;7 次多项式插值

中图分类号:TP241 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)04-0113-03

Research on Kinematics Modeling and Control of Two-handed Interchangeable Manipulator

TIAN Zhibin, CUI Shunfeng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215100, China)

Abstract: A handling manipulator arm for turning over is designed by means of the conversion of two claws. The kinematic model of two-hand mechanical arm is established by using the principle of robot and the homogeneous transformation matrix method of D-H. A core of the industrial control computer is configured as a soft controller with multi-core industrial control computer and CODESYS RTE. The real-axis driver is connected by Ethercat protocol to realize motion simulation of two-hand mechanical arm, and a smooth and continuous position and attitude trajectory is generated by trapezoidal speed planning. Seven-degree polynomial interpolation is used to realize smooth track of acceleration variation and reduce impact of mechanical structure. The simulation analysis shows that the structural design of the two-hand mechanical arm is reasonable and reliable, and the kinematics theoretical equation solved is accurate.

Keywords: two-hand mechanical arm; kinematic model; CODESYS; track planning; seven-degree polynomial interpolation

0 引言

目前越来越多的机器人正在取代人工,机械手臂作为现代化生产线的重要组成部分,已被广泛应用于工件加工、货物搬运和产品组装等环节^[1-2]。汪满新等^[3]提出了一种 3-SPR 并联机械手结构,基于量纲-尺寸参数相对应的方法对机构的运动学及性能做了相关研究。梁辉等^[4]提出一种具有 9 自由度的上肢康复机构,通过运动仿真,验证了该康复机构运行的稳定性和可行性。当前在简单工件的正反冲压作业中,大部分采用人工翻面处理为主,如果将这部分工作交给机器人完成,不仅会解放更多的劳动力,还会大大提高生产效率。因此,设计了 4 自由度的双手机械臂,通过两个手爪的交替使用,实现冲压工件的翻面处理。通过 CODESYS 软控制器对运行轨迹进行规划,在三维空间上实现了工件的自动正反面冲压处理,且具有较快的速度和平滑的轨迹。

1 机械系统及运动学建模

1) 三维模型

双手机械臂的三维模型如图 1 所示,1 关节、2 关节为

旋转副,实现二维空间的定位;3 关节为上下移动的模组,实现上下运动;4 关节为活动手爪 8 的旋转运动,实现两手的转换,固定手爪 7 固定在模组上面;手爪的末端固定吸盘,实现对工件的吸取搬运。

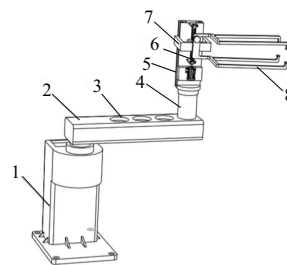


图 1 双手机械臂三维实体模型

2) 运动学建模

运用 D-H 参数方法建立机械臂的连杆坐标系如图 2 所示。其中, x_0z_0 为其基坐标系,基坐标系原点位于第一关节的轴线与底座的交点处。两个连杆参数分别为 a 和 d , a 为两个轴关节之间的连杆的长度, d 为相邻者两个

第一作者简介:田志彬(1996—),男,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为机器人轨迹控制和机器视觉。

连杆之间的偏移距离。另外还有两个变量用来描述连杆本身或连杆之间的相互关系,其中一个为连杆连接两端轴线的夹角度数,另一个则是两个相邻连杆之间的夹角度数。不过对于本机器人来说,它有3个旋转轴以及1个移动轴,轴线之间的夹角都是90°或者0°。

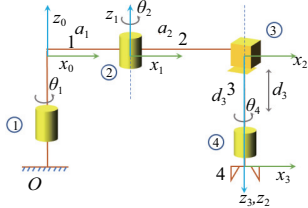


图2 双手机械臂的连杆坐标系

当确定了各个连杆参数之后就可以画出连杆参数表。关节4作为附加轴,独立于轴组之外,单独控制,工件末端的位置由前3个关节决定。设 θ_i 为杆件*i*相对于杆件*i-1*的角度, d_i 为杆件*i*相对于杆件*i-1*的偏移量, a_i 为杆件*i*的长度, α_i 为杆件*i*的扭转角度。

表1 机械臂的连杆参数

杆件	α_i/mm	$\alpha_i/(\text{°})$	d_i/mm	$\theta_i/(\text{°})$
1	l_1	0	0	θ_1
2	l_2	180	0	θ_2
3	0	0	d_3	0

依据参数表,根据D-H法,求出坐标系*i*相对于坐标系*i-1*的齐次变换矩阵 ${}^{i-1}T_i$,可得

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1+\theta_2) & \sin(\theta_1+\theta_2) & 0 & l_2 \cos(\theta_1+\theta_2) + l_1 \cos\theta_1 \\ \sin(\theta_1+\theta_2) & -\cos(\theta_1+\theta_2) & 0 & l_2 \sin(\theta_1+\theta_2) + l_1 \sin\theta_1 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中矩阵对应元素相等,得出

$$\begin{cases} p_x = l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ p_y = l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ p_z = -d_3 \end{cases} \quad (2)$$

上式为机器人运动学正解,可将关节角度转变成机器人末端位置。

由于本机械臂没有末端姿态的旋转,由末端位置即可反解出 θ_1 、 θ_2 和 d_3 。

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccot(A/\pm\sqrt{1-A^2}) - \varphi \\ A = (l_1^2 - l_2^2 + p_x^2 + p_y^2) / (2l_1 \times \sqrt{p_x^2 + p_y^2}) \\ \varphi = \arccot(p_x/p_y) \quad \theta_2 = \arccos\{\sin[\theta_1 + \arccot(p_x/p_y)] \\ \times \sqrt{p_x^2 + p_y^2} - l_1/l_2\} \\ d_3 = -p_z \end{cases} \quad (3)$$

3) 运动学模型初步验证

利用MATLAB的Robotics工具,进行运动学建模的验证。机械臂的规格为 $l_1 = 200, l_2 = 200$ 。利用Link函数指定连杆,SerialLink函数连接连杆,bot.fkine和bot.ikine两个函数分别实现正运动学和逆运动学的计算和验证。输入2个轨迹点的轴坐标 $(-41.234, 75.829, 40, 0)$ 、 $(-33.563, 73.472, 60, 180)$,正解出的位置坐标分别为 $(315.042, -18.277, -40)$ 、 $(320.069, 17.742, -60)$,手爪分别为闭合状态和分离状态。进而利用得到的位置坐标,进行运动学逆解,结果与两个点的轴坐标吻合,运动学模型初步得以验证。

4) 运动模拟

借助SolidWorks实现对双手机械臂的作业机制的模拟仿真。

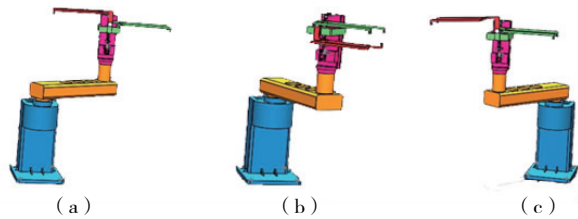


图3 运动模拟图

作业机制如下:首先机械臂两手爪呈分离状态,固定手爪抓取正面已经加工完毕的工件;机械臂改变位置,固定手爪将工件转移到活动手爪;活动手爪转动180°,即实现了工件的翻面处理,通过位置控制将工件放到工位上。

2 控制系统搭建及运动学仿真

1) 控制系统搭建

工控机选用海康威视视觉工控机MV-VC2210,其中一个网卡安装Ethercat驱动,用于和驱动器通信;驱动器采用新时达MS-R四轴驱动器,支持Ethercat通信;驱动器连接4个带有绝对编码器的伺服电机。配置工控机为软控制器,在CODESYS软控制器上面建立双手机械臂模型,实现对机械臂的运动学仿真。控制系统如图4所示。

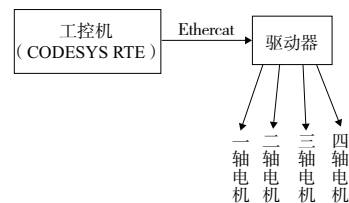


图4 控制系统构成

2) 运动学仿真

根据逆运动学,前3个轴构建为轴组,为其构造正逆解模块用于运动控制,第4个轴单独控制。CODESYS中的虚拟模型为双手机械臂,仿真的实体为SCARA机器人。因为SCARA机器人的大臂和小臂以及上下轴与本机械臂的结构大致相同。CODESYS可视化只显示二维位置模型,另外两个轴的位置信息用Ethercat捕捉,显示其运

动轨迹即可。dArmLength1、dArmLength2 分别为 200 mm、200 mm。

利用双手机械臂的正逆解模块进行编程,通过梯形速度规划实现对双手机械臂的运动仿真,工控机作为 Ethercat 主站,驱动器作为从站,利用直线插补将机器人从 (300, -200) 运动到 (300, 50), 跟踪 4 个轴的轨迹,每隔 4 ms 捕捉一次位置、速度、加速度信息及所有点构成平稳的位置和速度曲线。虽然实体机器人运行平稳,但是一轴、二轴的加速度有突变,会对机器人寿命产生影响。运动学逆解的关节曲线和对应的运动学正解的空间位置曲线如图 5、图 6 所示。

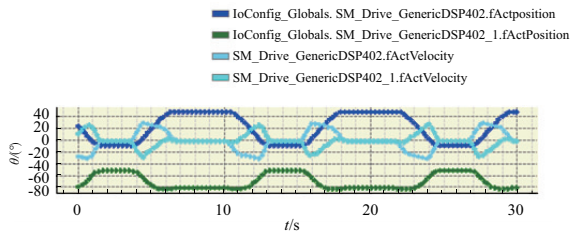


图 5 双手机械臂一轴、二轴的位置和速度轨迹曲线

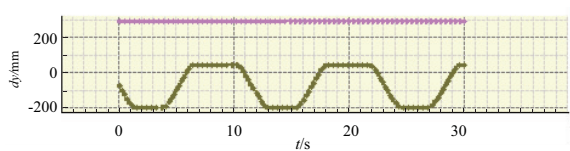


图 6 双手机械臂空间位置 xy 变化曲线

3 轨迹规划

由于梯形速度规划在实际中会引起加速的突变,于是在关节空间进行轨迹规划,利用机械臂工作时必经的 5 个点,反解出每个轴的参数,对每个轴进行 7 次多项式插值。给定 $n+1$ 个点位 (t_i, p_i) , 利用分段 7 次多项式插值,使得分段多项式经过所有点序列。

起点处一阶导数估计:

$$v_0 = (p_1 - p_0) / (t_1 - t_0) \quad (4)$$

终点处一阶导数估计:

$$v_n = (p_n - p_{n-1}) / (t_n - t_{n-1}) \quad (5)$$

中间点处一阶导数估计:

$$v_k = [(p_{k+1} - p_k) / (t_{k+1} - t_k) + (p_k - p_{k-1}) / (t_k - t_{k-1})] / 2 \quad (6)$$

二阶导数和三阶导数同理。

设每段的 7 次多项式方程为

$$p(t) = \sum_{i=0}^7 a_i \times (t - t_s)^i \quad (7)$$

利用 7 次多项式方程、一阶导数、二阶导数、三阶导数的起点和终点,构成 8 个约束方程: $p(t_s) = p_s; p'(t_s) = v_s; p''(t_s) = a_s; p'''(t_s) = j_s; p(t_e) = p_e; p'(t_e) = v_e; p''(t_e) = a_e; p'''(t_e) = j_e$ 。

根据约束方程即可求解每一时间段的 7 次多项式系数 a_0, \dots, a_7 。

$$\begin{cases} a_0 = p_s \\ a_1 = v_s \\ a_2 = a_s / 2 \\ a_3 = j_s / 6 \\ a_4 = [210h - [(30a_s - 15a_e)T + (4j_s + j_e)T^2 + 120v_s + 90v_e]T] / 6T^4 \\ a_5 = [-168h + [(20a_s - 14a_e)T + (2j_s + j_e)T^2 + 90v_s + 78v_e]T] / 2T^5 \\ a_6 = [420h - [(45a_s - 39a_e)T + (4j_s + 3j_e)T^2 + 216v_s + 204v_e]T] / 6T^6 \\ a_7 = [-120h + [(12a_s - 12a_e)T + (j_s + j_e)T^2 + 60v_s + 60v_e]T] / 6T^7 \end{cases} \quad (8)$$

对机械臂的一轴进行轨迹规划,通过机器臂的 5 个位置反解出一轴的 5 个角度 $[-41.234, -33.563, -15.680, 2.566, -45.785]$, 每个节点对应的时间点为 $[0, 2, 4, 8, 10]$, dt 设为 0.001, 利用 7 次多项式分段插值得到每个时间点的位置、速度、加速度和加加速度, 绘制出第一个轴的位置、速度、加速度、加加速度曲线, 如图 7 所示。与梯形速度规划的加速度曲线相比, 7 次多项式分段插值轨迹规划加速度连续平滑, 解决了加速度突变的问题。

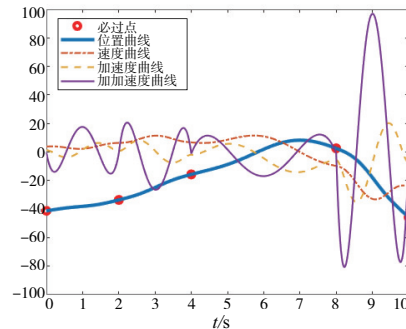


图 7 一轴的位置、速度、加速度、加加速度曲线

4 结语

设计了一种双手互换实现工件正反面加工的搬运机械臂, 首先推导出运动学方程并通过 D-H 法建立机械臂的运动学模型, 解决了在工作空间内从 A 位置精准运动到 B 位置的问题, 误差在 0.1 mm 以内; 然后通过 Ethercat 通信协议搭建机械臂的控制平台, 在 CODESYS 上建立机械臂模型, 仿真得到机械臂在 0~30s 内各关节角度和末端执行机构质心的变化曲线以及速度曲线。通过 MATLAB 进行轨迹研究, 利用 7 次多项式插值实现更平滑的轨迹曲线, 改善了加速度突变的问题, 得到了良好的控制效果。仿真结果表明: 机械臂的结构设计十分可靠, 推导出的运动学理论方程正确, 求解出的工作空间直观、准确。

参考文献:

- [1] 李文锦, 竺晓程. 关节一体化机器人动力学与阻抗控制算法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(12): 33-36, 40.
- [2] 肖心远, 石永华, 李怀俊. 基于双目视觉的水下对接焊缝跟踪机器人姿态调节[J]. 热加工工艺, 2018, 47(1): 224-227.
- [3] 汪满新, 刘海涛, 黄田. 3-SPR 并联机构运动学性能评价[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 108-115.
- [4] 梁辉, 张广兴, 王术徽, 等. 九自由度上肢康复机构及其运动学分析研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(6): 39-43.

收稿日期: 2021-04-12