

五自由度关节式机械臂运动学分析与仿真

陈文昀

广州市轻工技师学院 中国广州 510220

摘要: 五自由度关节式机械臂的工作运行过程中,其动作灵活,具有良好的感知能力,可精准操作,能够适应各类环境,在工业生产、日常生活中发挥着重要的功能和作用。智能化是关节式机械臂的主要发展方向,在工艺、技术升级的过程中,需要重点关注其运动学问题。通过运动学建模、仿真分析,为关节式机械臂开发、设计提供有价值的参考。基于此,本文针对五自由度关节式机械臂仿真系统的构成进行研究,通过机械臂建模,进行运动学分析,了解其运动学特征。在此基础上,开展运动学仿真、轨迹插值仿真、平台仿真等仿真试验,对于运动学分析结果进行验证。可以有效提高五自由度关节式机械臂的仿真程度,使设备的工作性能更加完善。

关键词: 关节式机械臂; 五自由度; 运动学; 仿真分析

Kinematics analysis and simulation of 5-DOF joint manipulator

Wenyun Chen

Guangzhou Light Industry Technician College, Guangzhou. China, 510220

Abstract: During the working process of the five-degree-of-freedom articulated robotic arm, its movements are flexible, it has good perception ability, it can be operated accurately, it can adapt to various environments, and it plays an important function and role in industrial production and daily life. Intelligence is the main development direction of articulated robotic arms. In the process of process and technology upgrading, it is necessary to focus on its kinematics. Through kinematic modeling and simulation analysis, it provides a valuable reference for the development and design of articulated manipulators. Based on this, this paper studies the composition of the five-degree-of-freedom articulated manipulator simulation system. Through manipulator modeling, kinematics analysis is performed to understand its kinematics characteristics. On this basis, simulation experiments such as kinematics simulation, trajectory interpolation simulation, and platform simulation are carried out to verify the kinematics analysis results. It can effectively improve the simulation degree of the five-degree-of-freedom articulated mechanical arm and make the working performance of the equipment perfect.

Keywords: articulated manipulator; five degrees of freedom; kinematics; simulation analysis

引言:

智能机器人技术水平不断升高,与人们生活的联系愈发密切,尤其是服务机器人的应用方面,其凭借比工业机器人更强的感知能力得到广泛应用。其中,服务机器人手臂作为关键之一,其运动的正确性取决于运动学问题,为使其具有正确的运动轨迹,构建MDH运动学模型解决拟人手臂末端位置与电机转角之间的映射关系是必要的。

作者简介: 陈文昀(1971.12—),女,广东人,讲师,广州市轻工技师学院,机械设计,研究方向:机械设计。

1. 五自由度关节式机械臂仿真系统构成研究

所谓五自由度关节式机械臂,主要是指用于家庭娱乐的,拥有五个自由度的服务机器人的手臂。家庭娱乐的服务机器人主要由两只五自由度的拟人机械臂、两个自由度的头部、两个驱动轮和三个万向轮构成,根据指令可以实现点头、摇头和一些替代性行为。若是结合基坐标系对服务机器人构造进行分析,则要将该坐标系建立在基座上,然后根据头部、双臂等轴建立坐标系。其中,在对五自由度关节式机械臂进行求解时,可以选取任意一点 O_{min} 作为基准参考坐标系,然后逐步求解,若想要更为细致的获得机器人抓取操作问题,可以围绕五

自由度关节式机械臂建立单一坐标系，位置轴为前两个轴，姿态轴为后两个轴，在双手对称的性质下，仅需要建立一个标志位即可，区分双手的同时也便于运动学分析仿真工作的展开^[1]。

2. 基于建模开展五自由度关节式机械臂运动学分析

有关于五自由度关节式机械臂的运动学分析，其主要流程为：构建机械臂运动学模型——按照时间轴分析机械臂变化——总结变化规律，其中变化内容包括机械臂各关节的位置、速度、加速度与机械臂末端，期间不对各项力的产生予以分析。

2.1 机械臂模型建立

2.1.1 三维模型

运用Solid Works软件对五自由度关节式机械臂三维模型进行绘制，模型由六部分组成，分别为末端执行器、腕回转轴、腕关节摆动、肘关节摆动、肩关节摆动以及腰回转轴构成。之后结合运用舵机伺服系统对相邻连杆之间的关节轴进行驱动，使其联结为转动副，在对转动副进行调整与控制时，使用PWM脉宽调制技术，依托于脉宽的调节实现对转动副转动信息的有效控制，实现关节变量的精准改变。其中，抓取行为作用主要由末端执行器的舵机进行，通过伸缩控制实现目标物的抓取，但在此过程中不会发生旋转与平抑，故末端执行器被排除在自由度之外。

2.1.2 运动学模型

对于五自由度关节式机械臂而言，其空间上的位姿变化主要通过具有旋转、滑动功能的关节和长度不一的连杆实现，在强化位姿变化表达时，获取次关节到下一个关节的变换流程，故需要面向关节落实一个参考系，常用技术方法为D-H法。D-H法属于数学方法，主要用于机器人和连杆建模相关领域，在运用该方法对五自由度关节式机械臂的所有关节制定一个参考系时，主要通过引入参数的方式实现对空间中各个连杆姿态、相对位置的准确描述，具体包括 θ 、 d 、 a 、 α 。本文采用改进型D-H法完成五自由度关节式机械臂建模工作，具体如下：

以三个连杆为例，分别为 $n-1$ 、 n 、 $n+1$ ，每个关节均可以开展顺滑的旋转或平移运动，每个相连关节均有其自己的坐标轴，其中， Z_n 轴表示为 θ_n ，即 x_n 与 x_{n-1} 之间的角度； x 轴表示为 α_n ，即 z_{n+1} 与 z_n 之间的角度；绕 z_n 轴表示为 d_n ，即 x_n 与 x_{n-1} 之间的距离。通过这一建模方法，可以获得连杆坐标系，在改进型D-H建模时，需要设定基坐标参考系，并围绕各个关节落实制定的本地参考系^[2]。需要注意的是，无论哪个关节，在建立坐标参

考系时都要制定 x 、 z 轴的方向。具体如图1所示：

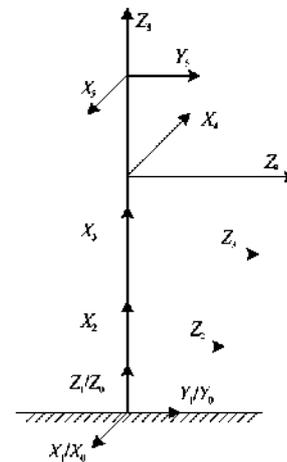


图1 五自由度关节式机械臂的连杆坐标系

此外，末端执行器不属于自由度范畴，因而D-H参数中不计入相关数据。根据图1的连杆坐标系，可以对五自由度关节式机械臂相邻连杆之间的几何关系进行推导，得到相应的D-H参数。五自由度关节式机械臂D-H参数为：

θ_1 的 d_i 为0mm， a_{i-1} 为0mm， α_{i-1} 为 0° ，变量范围为 $-135-135^\circ$ ； θ_2 的 d_i 为0mm， a_{i-1} 为0mm， α_{i-1} 为 90° ，变量范围为 $-90-90^\circ$ ； θ_3 的 d_i 为0mm， a_{i-1} 为90mm， α_{i-1} 为 0° ，变量范围为 $-135-135^\circ$ ； θ_4 的 d_i 为0mm， a_{i-1} 为65mm， α_{i-1} 为 0° ，变量范围为 $-135-135^\circ$ ； θ_5 的 d_i 为0mm， a_{i-1} 为0mm， α_{i-1} 为 -90° ，变量范围为 $-135-135^\circ$ 。

2.2 机械臂正逆运动学分析

以五自由度关节式机械臂的三维模型为基准，采用D-H法对各连杆间建立空间几何关系，具体流程为：建立空间几何关系——确定D-H参数值——齐次变换矩阵——建立运动学方程数学模型。通过这一流程，能够得到五自由度关节式机械臂的运动学模型。根据上述五自由度关节式机械臂D-H参数值以及齐次变换矩阵空间中的末端执行器的 $\{i-1\}$ 、 $\{i\}$ 坐标系的位姿进行矩阵变换。

2.2.1 机械臂运动学正解

对于五自由度关节式机械臂运动学分析的正解问题而言，其主要目的是对已知手臂的所有关节角的转角进行解决，通过建模、求解等流程得到末端执行器的姿态和位置。在本次研究所得矩阵为如下：

$${}^0_5T = \begin{bmatrix} n_x a_x a_x P_x \\ n_y a_y a_y P_y \\ n_z a_z a_z P_z \\ 0001 \end{bmatrix} \quad (1)$$

以矩阵(1)为基础对五自由度关节式机械臂进行运动学虚拟建模, MDH相关参数数据为: 关节轴1的连杆转角为0, 连杆长度为0, 连杆偏距为L1, 关节角为 θ_1 ; 关节轴2的连杆转角为90°, 连杆长度为0, 连杆偏距为0, 关节角为 θ_2 ; 关节轴3的连杆转角为-90°, 连杆长度为0, 连杆偏距为L2+L3, 关节角为 θ_3 ; 关节轴4的连杆转角为0, 连杆长度为90°, 连杆偏距为0, 关节角为 θ_4 ; 关节轴5的连杆转角-90°, 连杆长度为0, 连杆偏距为L1, 关节角为 θ_5 。

通过这些数据可得到关节间的变换矩阵, 分别为 0T_1 、 1T_2 、 2T_3 、 3T_4 、 4T_5 , 由此变换得到矩阵乘积, 具体如下:

$${}^0T_5 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 = \begin{bmatrix} r_{11}r_{12}r_{13}P_x \\ r_{21}r_{22}r_{23}P_y \\ r_{31}r_{32}r_{33}P_z \\ 0001 \end{bmatrix} \quad (2)$$

然后分别求解。为保证求解所得结果的正确性, 分别计算手臂变换矩阵的值, 即: $\theta_1=0$; $\theta_2=-90^\circ$; $\theta_3=0$; $\theta_4=0$; $\theta_5=0$ 。最终得到以下结果:

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} 010L2 + L3 \\ 0010 \\ 100L1 \\ 0001 \end{bmatrix} \quad (3)$$

从计算结果可知, 结论正确。

2.2.2 机械臂运动学反解

对于五自由度关节式机械臂运动学分析的反解问题而言, 关节机械范围对反解结果的影响较大, 由于机械范围存在限制, 因此在求取机械臂运动学反解时间一部分解直接舍弃。五自由度关节式机械臂的运动范围参数为: 腕部关节旋转时, 手臂角度为-90-90°, 机械限位为-95-95°; 肘部关节摆动, 手臂角度为0-90°, 机械限位为-5-94°; 肘部关节旋转时, 手臂角度为-51-51°, 机械限位为-54-54°; 肩部关节外展时, 手臂角度为0-80°, 机械限位为-2.5-95°; 肩部关节旋转时, 手臂角度为0-70°, 机械限位为-8-135°。在求取五自由度关节式机械臂的运动学反解时, 实质上是解决已知末端执行器的姿态和位置, 并获得手臂全部关节的转角。与运动正解不同, 运动反解求取主要采用运动学分析、编程和轨迹规划等工作, 分别对轴进行求取。

其中, 在求取第一个轴的解时, 主要是令所得方程两边第二行与第四列相等, 进而得到: $-s_1P_x + c_1P_y = 0$, 当 P_x 为0时, θ_1 为90°或是 $\tan \theta_1 = P_y/P_x$; θ_1 为 $\alpha \tan P_y/P_x$, 由此确定第一个轴的解是唯一的。之后逐一求取第二个轴、第三个轴、第四个轴和第五个轴的解, 得到五自由度关节式机械臂运动学反解^[4]。

3. 仿真试验

为了验证五自由度关节式机械臂的运动学分析结果, 需要建立仿真模型和搭建仿真平台, 开展仿真试验。该过程中, 通过运动学仿真、轨迹插值仿真、平台仿真等方法, 分析、判断机械臂的运动学特征。在运动学仿真中, 主要用于验证运动学分析是否正确。通过轨迹插值仿真, 进行仿真动态轨迹解析。应用平台仿真, 进一步验证机械臂的运动学分析结果。在五自由度关节式机械臂的开发、设计中, 为了满足不同环境、空间需求, 可以通过仿真实验, 分析其运动动作的精准度。

3.1 运动学仿真

分析五自由度关节式机械臂的运动学特征, 了解各个关节的相对关系。建立连杆坐标系, 并进行运动学建模(正、反)。在运动学模型中, 输入轨迹(螺旋线)。参照逆解, 进行关节值的求取。在正解模型中, 代入关节值, 进行末端轨迹的求解, 并与输入轨迹进行对比。通过正反解程序验证对比, 将规划螺旋线经过反解、正解计算后, 得到一条曲线, 与规划螺旋线进行对比。两者重合时, 反映出运动学分析的准确性。如两者不重合, 则说明运动学计算不正确。

3.2 轨迹插值仿真

在轨迹插值仿真的过程中, 需要进行路径规划。以空间几何信息作为参考, 对于空间中的运动轨迹进行规划, 控制对象的运动轨迹呈现为离散点。在路径点插值的过程中, 为了保留原来函数信息, 应用双三次插值算法。在轨迹插值仿真实验中, 可应用最近邻插值、双三次插值或双线性插值。其中, 双三次插值优点在于插值函数光滑, 但是需要经过较为复杂的计算过程。在实时性要求较高的情况下, 并不适用双三次插值。双线性插值的应用, 可以更好的满足实时性要求。

4. 总结

通过对五自由度关节式机械臂进行运动学分析和仿真试验, 发现机械臂在运动过程中各关节位移、角速度、角加速度的状态以及末端执行器可以到达设定参数值目标, 而且通过运动路径可以增强机械臂设计的科学合理性。根据上述仿真实验结果, 多项式运动轨迹更为平滑, 在机械手臂运动过程中不会出现关节碰撞等不良现象, 有效解决加速过程中的突变问题, 机械手臂工作准确性、稳定性得到有效提升。但是需要注意的是, 随着插值函数次数增加, 机械手臂相关软件的计算量也会随之增加, 这意味着在五自由度关节式机械臂运动过程中, 对应将平台算力具有较高要求, 实际应用过程中可能会因为较

长的计算时间出现龙格现象。但总而言之，对于五自由度关节式机械臂而言，七次多项式插值算法是一种相对有效且稳定的机械臂轨迹规划方法，相较于三次多项式，七次多项式能够避免角位移突变情况、角速度突变情况、角加速突变情况的发生，针对其较大的数据计算量和较长的数据处理时间，在设计时则要有所取舍。

5. 结论

综上所述，通过三维模型对五自由度关节式机械臂的连杆坐标系进行制作，通过确定的D-H参数值构建运动学模型，运用MATLAB软件平台得到5-DOF机械臂运动学模型，确定其空间范围。通过多项式插值算法开展仿真试验，发现七次多项式插值算法所达成的效果更为理想。

参考文献：

- [1]王裕民, 秦飞舟.五自由度机械臂的运动学建模和轨迹规划研究[J].电工技术, 2022(8): 62-66, 69.
- [2]史汉卿.五自由度并联驱动修磨机械臂设计与分析[D].山西:太原理工大学, 2021.
- [3]王延强.移动式五自由度喷砂机器人结构设计与位姿误差建模[D].天津:天津理工大学, 2020.
- [4]鲁守银, 张蔚然, 赵洪华.主从式上肢外骨骼康复机器人的运动学研究[J].济南大学学报(自然科学版), 2021, 35(5): 494-501.
- [5]吴呈子.五自由度机械臂网络化远程控制系统的设计与实验[D].江苏:南京邮电大学, 2020.