

文章编号: 1674-8085(2016)01-0080-05

基于 ADAMS 的双臂作业机器人的运动学分析及仿真

*杨伟超^{1,2}, 许德章^{1,2}

(1.安徽工程大学机械与汽车工程学院, 安徽, 芜湖 241000; 2.芜湖安普机器人产业技术研究院有限公司, 安徽, 芜湖 241007)

摘要: 对双臂作业机器人的协调控制问题进行分析, 采用 D-H 法在直角坐标系下建立了机器人双臂联合运动学模型。通过在机械臂的每个连杆机构上建立坐标系, 得到主机械臂的 D-H 参数, 解出主机械臂运动学正解。在已知约束条件下, 通过在末端执行器上添加点驱动, 规划单臂运动路径。借助 ADAMS 软件运动仿真, 在后处理模块中得到主机械臂各个关节角度随时间变化的曲线图, 曲线过渡平滑, 角度变化在预先设定的转角范围内, 满足操作任务要求。

关键词: 联合运动学模型; D-H 参数; 点驱动

中图分类号: TP242

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2016.01.016

KINEMATICS ANALYSIS AND SIMULATION OF DUAL-ARM OPERATION ROBOT BASED ON ADAMS

*YANG Wei-chao^{1,2}, XU De-zhang^{1,2}

(1.Engineering Faculty of Mechanical and Automotive of Anhui Polytechnic University,Wuhu,Anhui 241000, China;

2.Wuhu Ahpu Robot Technology Research Institute Co. Ltd,Wuhu,Anhui 241007, China)

Abstract: The method of D-H is adopted by establishing the united kinematics model of the arms of robot in the Cartesian coordinate system after analyzing the question of coordinate control for dual-arm operation robot. Through establishing coordinate system in each link mechanism of robot, the D-H parameters of master manipulator are acquired, which are applied for the correct answer of kinematics of master manipulator. In some known constraints, planning motion path of master manipulator by adding point motion on the end effectors. The curves in figure of Joint angle change with time can be acquired in post-processing module after motion simulation by ADAMS. The figure indicates the curves transit smoothly and the angles change in range of angles which are set, that can meet the requests of operational text.

Key words: the united kinematics model; D-H parameters; point motion

0 引言

早在上世纪 80 年代, 一些专家学者就涉足于双臂机器人协调控制的领域。在研究初期, 大多数专家学者主要精力放在了双臂机器人的系统动力学、机械臂的协调运动规划、位置与力控制、力矩

控制等研究方向上。Yoshikawa 建立了协调性评价规则, 提出了在位置控制同时控制目标轨迹的控制算法^[1]。Uchiyama 应用力/位置控制原理, 克服了双臂机器人强耦合的困难^[2]。何光彩等对在微重力环境下双臂空间飞行器运动学关系进行了研究, 规划了其在空间漂浮时抓捕目标飞行器的路径^[3]。

从以上的研究成果来看, 双臂机器人协调控制

收稿日期: 2015-09-29; 修改日期: 2015-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175001)

作者简介: *杨伟超(1989-), 男, 江苏淮安人, 硕士生, 主要从事机器人机构与控制研究(E-mail:930480272@qq.com);

许德章(1964-), 男, 安徽芜湖人, 教授, 博士, 主要从事机器人机构与控制、机器人信息与感知、信号获取科学和应用研究(E-mail: xdz@ahpu.edu.cn).

问题已成为双臂机器人在实际应用领域的研究热点。从大多数的专家学者的研究领域可以看出，他们主要是通过控制算法，动力学等方法从双臂协调的控制策略方向对双臂机器人进行协调控制。这样不仅研究难度大，计算量大，同时不确定因数也很多。本文从运动学分析着手，建立数学模型，借助软件仿真，不仅节约成本，缩短研发周期，还可以提高可靠性。首先，根据操作任务的需求，构建三维模型；其次，把双臂分为主臂、从臂，对双臂进行运动学分析，针对插装等典型操作任务，探寻双臂之间的约束关系，建立联合运动学模型。借助ADAMS软件对主机机械臂进行运动路径规划，从臂通过约束关系辅助完成操作任务。

1 双臂作业机器人主机机械臂运动学模型的建立

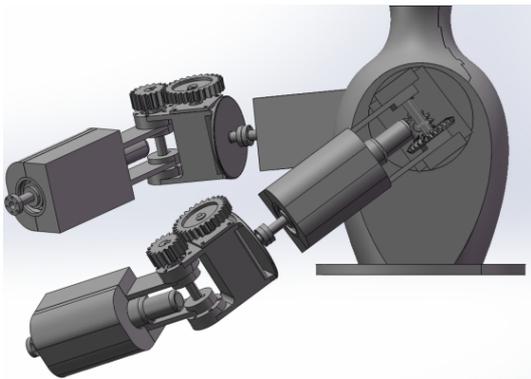


图1 双臂作业机器人三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of the dual-arm operation robot

1.2 主机机械臂运动学分析

本文在建立机械臂运动学模型时，采用D-H法建立机械臂各相邻杆件的坐标系，如图2所示。D-H法是通过建立 4×4 阶变换矩阵来描述相邻杆件之间的位姿关系。D-H法需要确定四个参数：1) 关节角 θ_i 绕 z_{i-1} 轴由 x_{i-1} 轴转向 x_i 轴；2) 偏置距离 d_{i-1} 从 x_{i-1} 轴到 x_i 轴沿着 z_{i-1} 轴偏置的距离；3) 连杆长度 a_{i-1} 从轴线 z_{i-1} 到轴线 z_i 沿着 x_{i-1} 方向的距离；4) 连杆转角 δ_{i-1} 绕 x_{i-1} 轴由 z_{i-1} 轴转到 z_i 轴的偏角。机械臂的D-H法具体参数如表1所示。

1.1 建立双臂作业机器人的三维模型

目前，随着工厂中越来越复杂的操作任务，单臂在一些场合已经不再适用了。本文针对双臂作业协调完成插装等典型操作任务的功能需求，设计出满足需求的双臂机器人模型。为了能够完成插装任务，单个机械臂需要五个关节。五个关节分别为：肩关节、大臂关节、肘关节和两个手腕关节。其中肩关节、大臂关节和肘关节保证机械臂能够到达指定的位置，手腕关节保证插装时机械臂末端执行器的姿态。由此可知，为了完成插装任务，双臂作业机器人的主、从臂总共设计为十个自由度。假设每个部件均为刚体，质量分布均匀。机身通过法兰与地面固定，十个关节均采用转动副连接。在solidworks中建立了双臂作业机器人的三维模型，如图1所示。

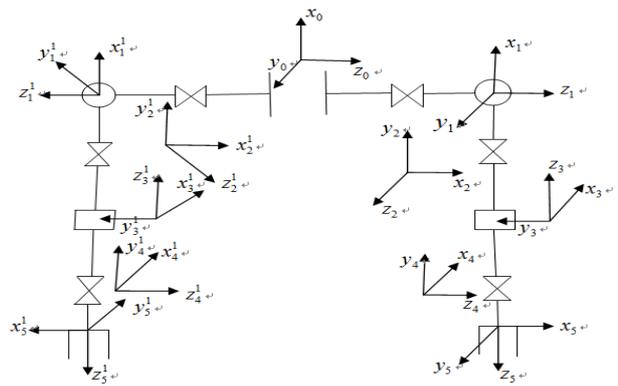


图2 双臂连杆机构D-H坐标系

Fig.2 D-H coordinate system of dual-arm linkage

表1 主机机械臂的D-H参数

Table1 The D-H parameters of master manipulator

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i	关节范围	
1	0	0	L_1	0	-90°	$\sim 90^\circ$
2	0	-90°	0	-90°	-90°	$\sim 90^\circ$
3	0	$+90^\circ$	L_3	$+90^\circ$	-180°	$\sim 180^\circ$
4	0	-90°	0	0	-90°	$\sim 90^\circ$
5	0	-90°	L_5	-90°	-180°	$\sim 180^\circ$

在确定D-H参数后，建立虚拟样机相邻连杆坐标系之间的齐次变换矩阵 0T_5 为：

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\delta_{i-1} & c\theta_i c\delta_{i-1} & -s\delta_{i-1} & -s\delta_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\delta_{i-1} & c\theta_i s\delta_{i-1} & c\delta_{i-1} & c\delta_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, s 表示 \sin , c 表示 \cos 。

从虚拟样机的三维模型可以看出, 每一个手臂从机身到末端执行器共有五个关节, 每一个关节都建立了一个坐标系, 相邻坐标系之间的位置与姿态关系即可以用来描述相邻杆件之间的位姿关系^[4-5]。虚拟样机的机身固定, 坐标系 $\{0\}$ 建立在机身上作为参考坐标系, 末端执行器的位置与姿态可以用 0_5T 来描述, 其中 0_5T 为:

$${}^0_5T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T \quad (2)$$

式 (2) 为 4×4 矩阵, 暂且假设为:

$${}^0_5T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式 (3) 中第一列, 第二列, 第三列用来描述末端执行器的姿态, 第四列是用来描述末端执行器的位置。

2 双臂联合运动学建模

2.1 双臂作业机器人的约束关系

双臂作业机器人的运动学示意图如图 3 所示。左臂为主臂, 右臂为从臂, 主从臂协调完成的操作任务是: 主臂挟持工件, 从臂配合主臂完成插装任务。

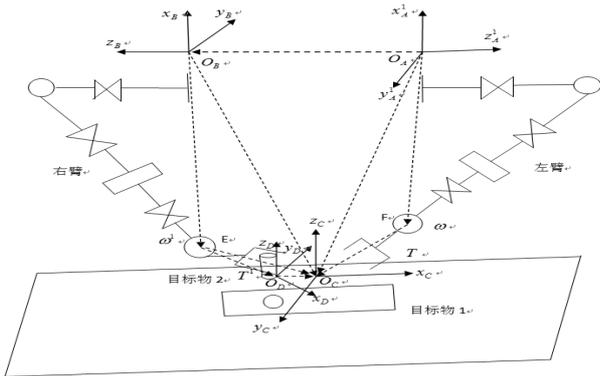


图 3 双臂作业机器人的约束关系

Fig.3 Constraints of the dual-arm operation robot

如图 3 所示, $\{O_A\}$ 为主臂的基坐标系, 同时也作为世界坐标系, $\{O_B\}$ 为从臂的基坐标系, $\{W\}$ 为主臂的腕坐标系, $\{W^1\}$ 为从臂的腕坐标系, $\{O_C\}$ 为目

标物 1 的目标坐标系, $\{O_D\}$ 为目标物 2 的目标坐标系。

如图 3 所示, 机器人双臂的位置矢量及变换矩阵的约束关系^[6]见下式:

$$\text{主臂: } \begin{cases} \overline{AF}^{(A)} = \overline{AC}^{(A)} - \overline{FC}^{(A)} \\ {}^A_C R = {}^A_F R \cdot {}^F_C R \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{从臂: } \begin{cases} \overline{BC}^{(B)} = \overline{BE}^{(B)} + \overline{EC}^{(B)} \\ {}^B_C R = {}^B_E R \cdot {}^E_C R \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{目标物 1 和从臂: } \begin{cases} \overline{EC}^{(E)} = \overline{ED}^{(E)} + \overline{DC}^{(E)} \\ {}^E_C R = {}^E_D R \cdot {}^D_C R \end{cases} \quad (6)$$

2.2 机器人双臂的关节空间的求解

要想对机器人双臂进行运动学逆解, 得到关节空间的每个关节角度, 就必须得知每个机械臂末端的位置和姿态, 即 $\overline{AF}^{(A)}$, ${}^A_F R$ 和 $\overline{BE}^{(B)}$, ${}^B_E R$ 。在实际规划时, 无法直接规划一些量, 必须通过坐标变换间接的得知一些未知量。

对于双臂作业机器人本体来说, 位置矢量 $\overline{AB}^{(A)}$ 和 $\{O_B\}$ 坐标系相对于 $\{O_A\}$ 坐标系的变换矩阵 ${}^A_B R$ 是已知的。

在一次特定的操作任务中^[7], (1) 对于主臂来说, 目标物 1 坐标系 $\{O_C\}$ 相当于基坐标系 $\{O_A\}$ 的位置与姿态是已知的。即 $\overline{AC}^{(A)}$ 和 ${}^A_C R$ 。主臂的末端执行器必须要以一固定姿态挟持目标物, 所以, 位置矢量 $\overline{FC}^{(F)}$ 和变换矩阵 ${}^F_C R$ 为已知。2) 对于从臂来说, 在完成插孔时, 从臂挟持目标物 2 的位置和姿态也是已知的, 即 $\overline{ED}^{(E)}$ 和 ${}^E_D R$ 。3) 对于目标物 1 和目标物 2 来说, 在插孔起始阶段, 目标物 2 相对于目标物 1 的位置和姿态是不变的, 即 $\overline{DC}^{(D)}$ 和 ${}^D_C R$ 。

当 $\overline{AC}^{(A)}$, $\overline{FC}^{(F)}$ 和 ${}^A_C R$, ${}^F_C R$ 已知时, (4) 式可以推导出下式:

$$\begin{cases} \overline{AF}^{(A)} = \overline{AC}^{(A)} - {}^A_C R {}^F_C R^{-1} \overline{FC}^{(F)} \\ {}^A_F R = {}^A_C R {}^F_C R^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

当 $\overline{AC}^{(A)}$, $\overline{AB}^{(A)}$ 和 ${}^A_B R$ 已知时, 可以推导出下式:

$$\overline{BC}^{(B)} = {}^A R^{-1} \overline{AC}^{(A)} - {}^A R^{-1} \overline{AB}^{(A)} \quad (8)$$

当 ${}^A R, {}^A R, {}^C R$ 和 ${}^E R$ 已知时, 可以推导出下式:

$${}^B R = {}^A R^{-1} {}^A R {}^C R {}^E R^{-1} \quad (9)$$

根据式 (5)、(6)、(8)、(9), 最终可以推导出下式:

$$\begin{cases} \overline{BE}^{(B)} = {}^A R^{-1} \overline{AC}^{(A)} - {}^A R^{-1} \overline{AB}^{(A)} - {}^B R (\overline{ED}^{(E)} + {}^E R \overline{DC}^{(D)}) \\ {}^B R = {}^A R^{-1} {}^A R {}^C R {}^E R^{-1} \end{cases} \quad (10)$$

3 实验仿真

在前文对双臂作业机器人的三维模型进行了运动学分析, 建立主机械臂的运动学模型以及双臂联合运动学模型基础上, 为了验证主机械臂的运动学模型是否能应用于插装等典型的操作任务中, 本文拟定了应用 ADAMS 对双臂作业机器人进行运动学分析, 并且使主机械臂能够按照期望的路径进行运动的实验方案。首先, 将双臂作业机器人的三维模型导入到软件 ADAMS 中, 在主机械臂的末端添加点驱动, 将主机械臂末端执行器的运动轨迹方程带入到驱动输入关于位置输出的函数中, 从而能够得到与末端执行器运动轨迹方程相对应的各驱动关节参数。根据主机械臂运动学理论解与实验仿真结果比较, 得出主机械臂运动学模型的准确性, 同时也实现了主机械臂的运动学逆解。

机械臂的末端执行器在空间里运行的轨迹如图 4 所示。并且假设机械臂末端执行器在运行时始终只是改变位置, 姿态未发生改变。

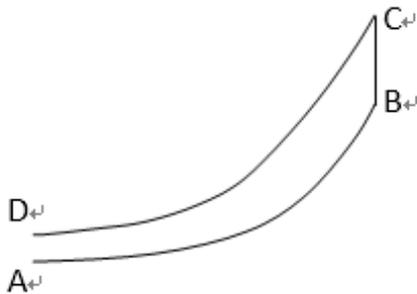


图 4 主机械臂的期望轨迹图

Fig.4 The figure of desired trajectory of master manipulator

已知了机械臂执行器末端初始时的位置坐标, 要求执行器末端能够按照规定好的轨迹路线 AB-BC-CD 依次运行。这里可以在 ADAMS 中对样机模型进行关约束。基座采用固定约束, 除了执行器末端以外, 其他的机械臂关节采用铰接约束。

添加完约束后, 我们需要在机械臂的末端执行器上添加点驱动。对机械臂末端执行器添加点驱动是通过 ADAMS 中的 General Point Motion 来完成的。

由于执行器在运动过程中姿态始终不变, 仅仅只是改变了位置, 所以点约束的 3 个旋转变化为 0*time。由于位置在不断变化, 所以需要根据机械臂末端执行器运动轨迹来设置点约束在 3 个方向上的位置的变化。

当所有的约束和驱动定义好之后, 还对样机进行 ADAMS 仿真前检测, 如果显示 Model Verify Successfully^[8], 则说明可以进行仿真。整个仿真过程需要持续 6s, 设置步长为 200 步。

仿真过后, 可以通过 ADAMS 中自带的轨迹跟踪功能, 直观的显示出机械臂末端执行器运动过轨迹, 如图 5 所示。

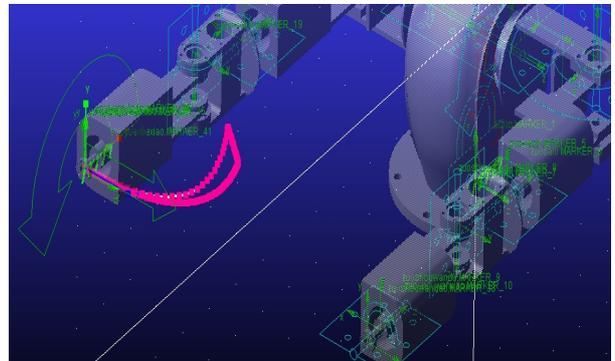


图 5 主机械臂在 ADAMS 中运动轨迹图

Fig.5 The figure of Trajectory of master manipulator in ADAMS

4 运动学结果

通过在机械臂执行器末端添加点驱动, 进行 ADAMS 运动学仿真过后, 保存仿真结果。通过 ADAMS 的后处理, 可以得出主机械臂各关节的运动输入曲线。如图 6 所示。

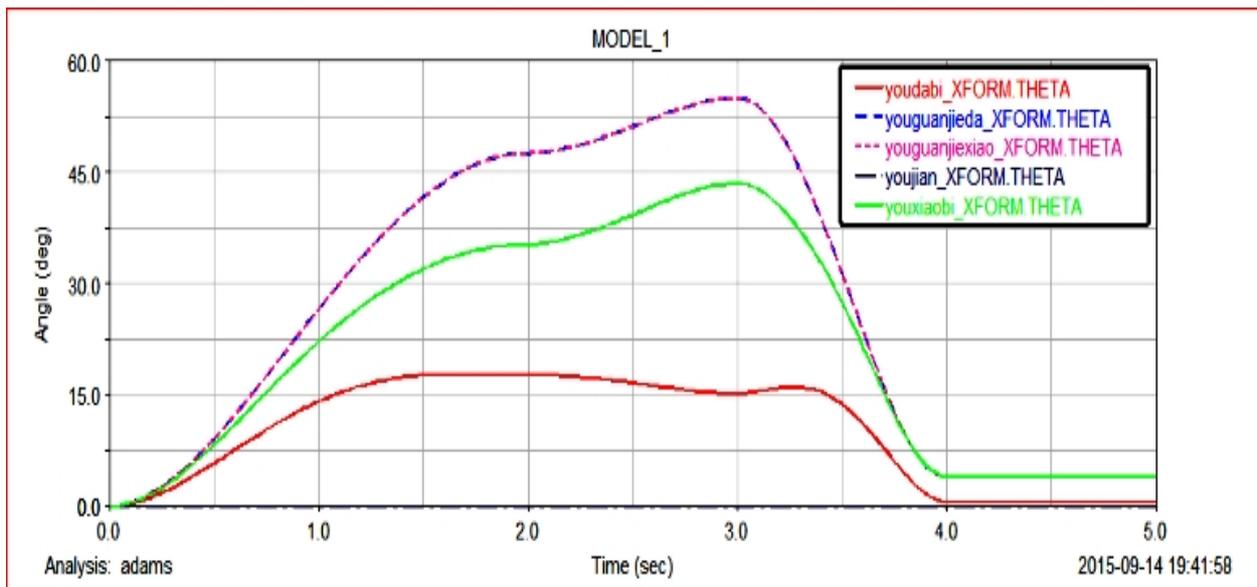


图6 主机械臂各关节的运动输入曲线

Fig.6 Motion input curves of master manipulator's joints

如图6所示,在机械臂末端执行器添加点驱动仿真后,得出的机械臂各个关节角度随时间变化曲线平滑,没有产生奇异,并且每个关节角度的变化都在转角范围内。

通过ADAMS的SPLINE工具对关节角度随时间变化的曲线采集数据点,生成样条函数。去掉机械臂末端执行器的点驱动,在每个关节添加电机驱动,驱动函数为样条函数,仿真后,得出样条函数的曲线和测量的运动关系曲线图基本一致,满足实际应用要求。

5 结语

针对双臂作业机器人协调运动这一问题,本文以插装典型操作任务为例,采用D-H法建立主机械臂的运动学模型,通过对作业任务的研究探寻双臂机器人协调作业的运动学关系,最后,借助软件ADAMS对双臂机器人进行运动学仿真。仿真结果表明:1)验证了双臂作业机器人主机械臂运动学模型的正确性,主机械臂可以按照期望轨迹运动。2)通过添加点驱动,仿真后处理可以得出各个关节的运动学曲线图。3)仿真大大提高了运动学分析的效率,生成的期望轨迹图有利于直观地了解机器人的运动形态和可达工作空间,为进一步研究双臂作业机器人的路径规划等问题提供良好的基础。

参考文献:

- [1] Yoshikawa T. Analysis and control of robot manipulators with redundancy[C]. Robotics research: the first international symposium. Cambridge, MA: Mit Press, 1984: 735-747.
- [2] Uchiyama M, Dauchez P. A symmetric hybrid position/force control scheme for the coordination of two robots[C]. 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 1988: 350-356.
- [3] 何光彩,洪炳熔.双臂自由飞行空间机器人自主控制系统仿真[J].计算机仿真, 1999,16(2): 57-59.
- [4] 陈安军,黄学玉.双臂机器人机构运动学分析.信阳师范学院学报,1995,8(2):151-154.
- [5] Gao X, Dawson D, Qu Z. On the Modeling of Two Manipulators Holding a Rigid Object[C]. American Control Conference, 1992. IEEE, 1992: 1227-1231.
- [6] 陈安军,程方荣,韩运侠.双臂机器人机构的约束方程.信阳师范学院学报.1996, 7(9):251-255.
- [7] Yeo H J, Suh I H, Yi B J, et al. A single closed-loop kinematic chain approach for a hybrid control of two cooperating arms with a passive joint: an application to sawing task[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(1): 141-151.
- [8] 范成建,熊光明,周明飞.虚拟样机软件MSC.ADAMS应用与提高[M].北京:机械工业出版社, 2006.