

D-H 参数表生成三维机器人模型仿真系统

周芳芳¹, 樊晓平¹, 叶榛²

(1.中南大学信息科学与工程学院 自动化工程研究中心, 湖南 长沙 410075; 2.清华大学智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084)



摘要: 一般情况下机器人各关节的几何关系可通过 Denavit-Hartenberg (D-H) 参数表来描述。提出了采用 D-H 参数表生成机器人三维虚拟模型的方法, 实现了机器人的可视化。仿真系统提供的视图控制功能和场景漫游功能实现了多角度、多位置观测机器人模型的几何结构, 并为机器人操作人员提供了训练仿真平台。该系统可以作为机器人学习和机器人结构设计的辅助工具。

关键词: D-H 参数; 机器人运动学; 机器人; 三维模型; 可视化

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2006) 04-0947-04

3-D Virtual Robotic Model Generated by D-H Parameters

ZHOU Fang-fang¹, FAN Xiao-ping¹, YE Zhen²

(1. Research Center for Automation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Generally, robot manipulators are geometrically described by the Denavit-Hartenberg (D-H) parameter table. The way to generate three-dimensional virtual models of robot manipulators from a D-H parameter table was proposed to realize the visualization of robot. The functions of controlling viewpoint and cruise in the scene provided by the simulation system implemented the observation of the robot model from angles and positions and they could be used as training system for those who manipulated robot. Generation of 3-D virtual robot model is one of the useful tools in the study of robot manipulators and the structural design.

Key words: d-h parameters; robot kinematics; robot manipulator; three-dimensional model; visualization

引言

机器人各关节的几何关系一般通过 D-H 参数表来描述。在进行机器人运动学、动力学分析时, 先定义各关节的坐标系, 分析机器人的结构, 然后获取 D-H 参数表^[1]。本文提出利用 D-H 参数表生成三维机器人模型则是反其道而行之, 通过设置 D-H 参数表来生成三维机器人模型, 实现机器人可视化。

D-H 参数表生成三维机器人模型仿真系统能够高效、简便的实现三维机器人的可视化。该系统不仅能够测试机器人结构的各几何参数的结果, 还可以通过鼠标、键盘操作三维机器人模型的各个关节的运动。因此, 该系统可作为机器人学习和设计的辅助工具。机器人作为一个多交叉领域的学科, 在世界范围内的各个不同的学术机构得到应用, 其中包括各种工程领域、计算机科学以及数学等等^[2]。因此, D-H 参数表法生成机器人模型是非常有意义的。

本篇论文首先简要介绍该仿真系统生成机器人模型的 DH 参数的定义方法。然后概括的描述 DH 参数表生成三维

机器人模型仿真系统的功能结构。接着重点介绍 DH 参数表生成机器人模型的算法和仿真系统主要功能的实现方法, 并通过实例演示该系统的仿真结果。最后是小结和展望未来进一步的工作。

1 D-H 参数

在进行机器人运动学和动力学分析时, 需要在空间中为机器人的每一个杆件设置绝对坐标系或相对于机器人机座设置相对坐标系, 从而获得每一个杆件的位置及方向。D-H 参数表则用来描述机器人每一个杆件的几何结构。

D-H 参数由 a 、 d 、 α 、 θ 四个分量组成, 分别描述了机器人某一杆件相对于前一个杆件的位姿 (位置和方向)。不同的机器人采用不同的方法为机器人杆件设置坐标系, 因此, 将导致一个不同的 D-H 参数定义和参数指标。下面将结合本文的应用, 简要介绍该仿真系统实现机器人可视采用的 D-H 参数的定义^[3]。

假设机器人中两个相邻的关节为 F_{i-1} 和 F_i , 关节 F_i 将通过关节 F_{i-1} 的参数 d_i 、 a_i 、 α_i 、 θ_i 唯一确定, 如图 1 所示。

关节的 Z 向量设置在活动关节的中心轴上;

d_i 是偏移量, 沿 Z_{i-1} 方向上两个坐标轴轴心的垂直距离表示。 d 是代数变量, 可正可负。如果关节 i 是旋转关节, d 是常数; 而关节 i 是移动关节时, 则 d 是变量;

a_i 是几何参数, 表示杆件 L_i 的长度。用 Z_{i-1} 轴到 Z_i 轴的垂直距离度量。参数 a 是正的常量;

收稿日期: 2005-01-15

修回日期: 2005-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (69975003)

作者简介: 周芳芳 (1980-), 女, 湖南株洲人, 博士生, 研究方向为虚拟现实技术, 计算机网络, 机器人仿真等; 樊晓平 (1961-), 浙江绍兴人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为智能控制, 智能机器人, 虚拟现实技术, 智能交通系统等; 叶榛 (1945-), 女, 江苏人, 教授, 研究方向为系统仿真, 临场感及虚拟现实技术等。

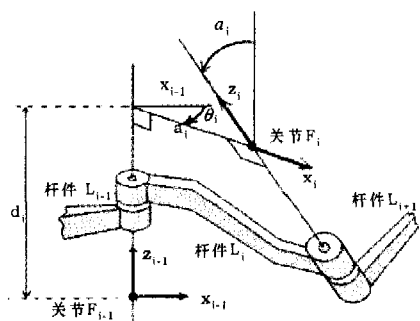


图1 D-H参数

θ_i 是关节变量角,表示 X_{i-1} 轴绕 Z_{i-1} 轴旋转到 X_i 轴的角度。如果关节 i 是旋转关节, θ 是变量;如果关节 i 是移动关节, θ 是常量,并可以指定 $\theta_i=0$;

α_i 是杆件的扭角,用 Z_{i-1} 轴绕 X_i 轴旋转到 Z_i 轴的角度度量。 α 选择旋转的最小的正角。

2 仿真系统结构

D-H参数表生成三维机器人模型仿真系统的功能结构,如图2所示。

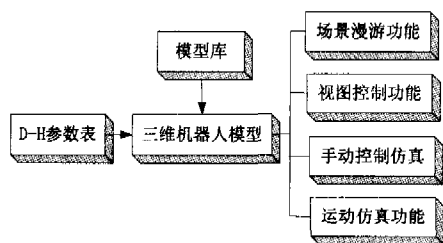


图2 系统功能结构图

D-H参数:首先可以根据需要选择机器人的自由度。该系统提供生成从1~6自由度的机器人。然后系统根据设置的D-H参数表生成三维机器人模型。D-H参数表可保存为文件,多次调用。

模型库:模型库提供了生成三维机器人模型的基本部件,如:移动关节、旋转关节。在生成机器人模型时,系统根据D-H参数调用模型库的模型,在视图窗口中绘制机器人模型。模型库中的模型采用的是简单的三维模型,如:立方体、圆柱体。虽然是简单的模型,但是它们却代表了一定的含义简便地实现机器人的可视化。如:圆柱体代表旋转关节、立方体代表移动关节。

场景漫游模块:通过在系统的视图窗口中点击鼠标可以在虚拟环境下漫游,从各个位置和角度观测机器人结构。系统主要提供了前、后、左、右、上、下六个方向的移动功能,和左、右两个方向的旋转功能。

视图控制模块:视图控制模块提供了一个快速切换视角的功能。系统主要提供前、后、左、右四个方向的视图。机器人一般以实体模型显示,为了更加仔细的观测机器人模型结构,系统还提供了机器人的线框显示功能^[6]。

伺服仿真模块:机器人的运动是通过活动关节选择和平移完成的^[4]。伺服仿真功能主要实现了通过外部设备控制机

器人模型的运动关节的旋转或平移,从而实现对机器人的手动操作。伺服控制仿真可以作为机器人操作人员的训练平台,降低训练费用,减少事故的发生。

运动仿真模块:运动仿真包括机器人的正运动学和逆运动学仿真。正运动学通过设置各个运动关节的运动角度或运动位移,获得末端执行器的位置。逆运动学仿真,通过指定末端执行器的位姿,求解出各个运动关节^{[4][5]}。该系统独到之处,可以通过可视化判断逆运动解的有效性,排除不合实际情况的解。

下面具体介绍D-H参数表生成机器人模型的算法,模型库的设计,视图控制功能和场景漫游功能的实现。

3 仿真系统的实现

3.1 三维机器人模型的生成算法

D-H参数表是机器人几何结构的数学描述方法。D-H参数表的一行代表一个关节,它包含四个变量。为了生成三维机器人模型,首先需要构造一个固定的立方体,它表示机器人的机座。然后生成的红色圆柱体代表旋转关节,红色立方体代表移动关节。以活动关节为起始点,继续生成细圆柱体,它们的长度代表距离参数 d 、 a ,它们的夹角代表角度 α 和 θ 。为了将这个问题阐述清楚,假设关节 B 由前一个相邻关节 A 通过四个D-H参数 d 、 a 、 α 和 θ 确定。如图2所示,关节 B 的位姿可以通过以下步骤确定:

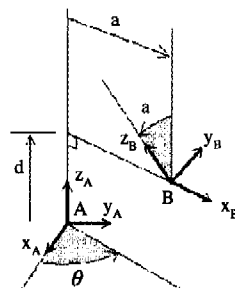


图3 由D-H参数表生成机器人构件

DH算法:

Step1: 确定机器人的自由度 n ;

Step2: 沿着 Z_A 轴移动距离 d 。 d 是代数变量可正可负;

Step3: X_A 轴绕 Z_A 轴旋转 θ 角度,得到 X_B 轴;

Step4: 沿 X_B 方向移动距离 a ,此时,坐标原点到达关节 B 的中心。因此, X_B 轴的方向完全确定; Z_A 轴绕 X_B 轴旋转 α 角度,确定 Z 轴的方向。

Step5: 重复Step2到Step5直至生成 n 自由度到机器人模型。

特殊情况:

如果相邻关节的 Z_{i-1} 轴和 Z_i 轴相交,则 $a_i=0$;

如果 Z_{i-1} 和 Z_i 的中垂线与 Z_{i-1} 轴相交于关节 F_{i-1} 坐标原点,则 $d_i=0$;

如果 Z_{i-1} 和 Z_i 互相平行,则 $\alpha_i=0$;

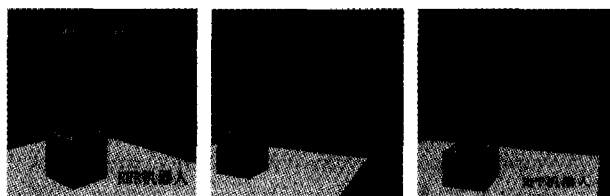
机器人的第一个关节 F_0 位于 Z_0 和 Z_1 中垂线上,可设置

参数 d_i 为零;

末端执行器(杆件 n) F_n (n 为机器人的自由度)是唯一可以不与关节中心轴相连的杆件。因此,如果关节 n 是旋转关节,那么参数 d_n 、 a_n 、 α_n 为 0;而如果关节 n 是移动关节,那么 a_n 、 α_n 、 θ_n 为 0。

3.2 模型库的设计

模型库主要依据 D-H 参数的特点来设计,采用基本的三维实体模型和颜色来生成三维机器人模型。该模型库可以方便到生成 5 大常用机器人:关节型(RRR),球型(RRP),SCARA 型(RRP),柱型(RPP)和笛卡尔型(PPP)。如图 4 所示。



(a) RRR

(b) RRP

(c) RPP

图 4 模型库

模型库主要模型定义如下:

R: 旋转关节。红色圆柱代表旋转关节,圆柱顶部的蓝色小圆盘以及蓝色箭头代表 Z 轴的正方向,侧面的红色箭头代表 X 轴的正方向;

P: 移动关节。红色的立方体代表移动关节,立方体顶部的蓝色方片和蓝色箭头代表 Z 轴正方向,侧面的红色箭头代表 X 轴正方向;

A: 参数 a 。D-H 参数中的 a 用红色的细圆柱体表示, a 的大小为圆柱的长度;

D: 参数 d 。D-H 参数中的 d 用绿色的细圆柱体表示, d 的大小为圆柱的长度。

3.3 视图控制模块

视图功能的实现需要考虑三种坐标系的转换。D-H 参数表生成机器人模型时,坐标系统固定在每一个模型上,称作局部坐标系 LCS,局部坐标系控制机械部关节自身的旋转和位移;第二个是世界坐标系 WCS。世界坐标系是仿真系统的基础,机器人的根部节点的位置和方向定义在世界坐标系上。而机器人的其它关节和末端执行器则相对于机器人根节点。因此,则世界坐标系中,机器人末端执行器的位置可以表示为公式:

$$T_E = A_1 A_2 \cdots A_n = \begin{bmatrix} R_0^n & D_0^n \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix}$$

其中, T_E 代表末端执行器在世界坐标系中的位姿, R 代表末端执行器相对于机座的方向, D 代表末端执行器相对于机座的位置。

控制观测者的视点的坐标系统称作视图坐标系 VCS。视点定义了仿真系统中的物体投影到屏幕上的位置和方向。

如图 5 所示,视点的位置位于视图坐标系的原点,视点的方向沿着视图坐标系的 Z 轴正方向,此时视图坐标系的 Y 轴和世界坐标系的 Y 轴刚好平行。当视点位置和方向改变时,观测者的观测点和观测方向也改变了,因此实现了多方位、多角度的观察。视图坐标系统相对于世界坐标系统的变换公式可以表示为:

$$T_w = \begin{bmatrix} R & T_v \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix}$$

其中, R 代表视点方向, T_v 代表视点的位置。通过计算和试验可以得到该仿真系统前、后、左、右视图得视点的位置和方向。因此可以实现四个视图控制功能。

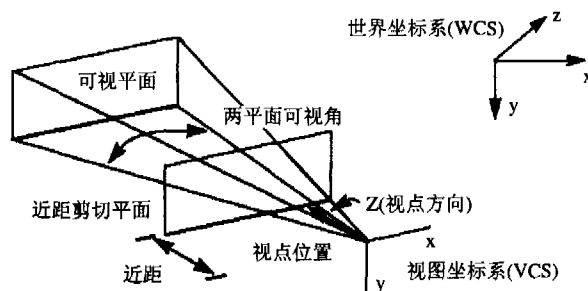


图 5 视图原理图

3.4 场景漫游模块

场景漫游功能的实现是以视图控制为基础的,通过改变视点的位置和方向来实现。它和视图控制功能共同实现了用户和仿真系统的交互操作。但是在漫游的过程中,视点的位置和方向需要通过外部设备的位置和方向来确定。因此称外部设备的位置方向为源信息,被控制对象的位置和方向为目标信息,如图 6 所示。当外部设备(如:鼠标)与视点关联,仿真系统获取鼠标的位置和方向,并将此信息传给视点,达到改变观测点的位置和方向的效果,从而实现了场景的漫游功能。外部设备除了和视点关联,还可以和场景中的模型关联。当鼠标和模型关联时,源信息仍然是鼠标,而目标信息则是模型的位置和方向。鼠标的位置和方向将传给模型,实现模型的位置和方向的改变。机器人抓取时的目标物体的设置,可以通过该方法实现。

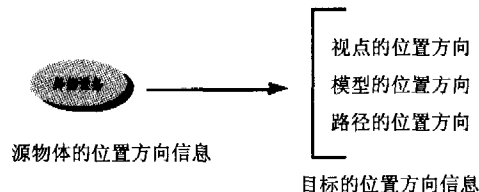


图 6 场景漫游原理图

3.5 仿真实验

本系统在 Visual C++ 环境中调用 OpenGL 的图形函数实现了 D-H 参数表动态生成机器人模型及仿真系统交互操作功能。下面以 MOTOMAN 机器人为例,实现 D-H 参数表生成机器人模型^[7]。首先分析 MOTOMAN 机器人结构获得 D-H 参数表,如表 1 所示。根据 MOTOMAN 机器人的 D-H 参数表,

生成的机器人初始模型,如图7(a)所示。通过伺服控制仿真功能调整机器人关节的位姿,并配合场景漫游功能调节视点的位置和方向来观测MOTOMAN机器人模型和关节的运动,如图7(b)所示。仿真系统在生成机器人实体模型的同时,还可以生成线框图,模型的线框图更清楚地反映了机器人关节的连接情况,如图7(c)所示。

表1 MOTOMAN 机器人的 D-H 参数

关节	a	d	α°	θ°	关节类型
1	a_1	d_1	90	(-170,170)	旋转关节
2	a_2	0	0	(-90,155)	旋转关节
3	a_3	0	-90	(-170,190)	旋转关节
4	0	d_4	90	(-180,180)	旋转关节
5	0	0	-90	(-45,225)	旋转关节
6	0	0	0	(-360,360)	旋转关节

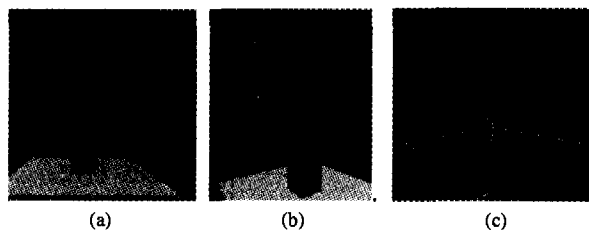


图7 (a)MOTOMAN 机器人三维模型 (b)伺服控制图 (c)线框图

4 结论

D-H 参数法生成三维机器人模型实现了机器人结构的可视化。一方面,学习者可以通过 D-H 参数生成的机器人

模型以及系统提供的场景漫游和视图控制功能,更好的理解机器人运动学和动力学;另外一方面,该系统为设计者提供了一个机器人辅助设计工具,大大的简化了设计过程。同时也可作为机器人研究者进一步研究机器人理论提供帮助。

但是,在该系统中采用的是最简单的几何模型和运动模型,生成的机器人比较简单。因此,在未来的工作中,可以丰富模型库和完备运动控制,使仿真系统更加真实。

参考文献:

- [1] 王庭树. 机器人运动学及动力学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1990.
- [2] 孙增圻. 机器人系统仿真及应用[M]. 系统仿真学报, 1995, 7(3): 23-29.
- [3] M F Robinette, R Manseur. ROBOT-DRAW, an Internet-Based Visualization Tool for Robotics Education [J]. IEEE Trans. on Education (S0018-9359). 2001, 44(1): 29-34.
- [4] L W Tsai, A P Morgan. Solving the kinematics of the most general six-and five-degree-of-freedom manipulators by continuation methods [J]. Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design (S0738-0666). 1985, 107(2): 189-200.
- [5] R Manseur, K L Doty. A robot manipulator with 16 real inverse kinematic solution sets [J]. International Journal of Robotics Research (S0278-3649). 1989, 8(5): 75-79.
- [6] Qu Xiaoping, Li Xiaobo. 3D surface tracking algorithm [J]. Computer Vision and Image Understanding (S1077-3142). 1996, 64(1): 147-156.
- [7] H Fu. A set of geometric invariants for kinematic analysis of 6R manipulators [J]. International Journal of Robotics Research (S0278-3649). 2000, 19(8): 784-792.

(上接第946页)

标系 $x_i^*y_i^*z_i^*$ 中 Z 轴上的单位矢量在刚体连体基上的坐标 h_i' ; 铰点坐标系 $x_i^*y_i^*z_i^*$ 中 X 轴上的单位矢量在刚体连体基上的坐标 f_i' 。解法: $h_i' = A^{CT} * h_i$, $f_i' = A^{CT} * f_i$, 刚体 j 同理。

(5) 求解滑移铰约束方程的常值参数 2。需求: 刚体 i 铰点坐标系 $x_i^*y_i^*z_i^*$ 原点(铰点)在刚体 i 连体基 $x_i^*y_i^*z_i^*$ 上的坐标 X_{TC} 。解法: 调用 CAXA-API 可以求得 A_T 上的 Tagger 坐标系原点的三维坐标 X_T 、刚体 i 质心的三维坐标 X_C 。因此, $X_{TC} = X_T - X_C$, 刚体 j 同理。

4 结论

本文从并行工程角度出发,在机械虚拟原型中集成产品设计、分析模型,研究了从 CAXA-CAD 中,笛卡尔多刚体系统动力学模型下,物理属性的抽取方案。以万向节零件装配体惯量张量、滑移铰约束模型坐标基的变换关系抽取流程为例进行了阐述。实验结果表明,从 CAD 中提取多体动力学模型意义下的物理属性,开发基于组件的多体系统虚拟原型的分析模型,实现设计、分析集成的机械虚拟原型自主开

发,方案是可行的。从 CAD 中提取多体动力学模型意义下的物理属性,在定义转化的形式化语义方面还需要深入的研究,这是进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 洪嘉振. 计算多体系统动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 9-11.
- [2] E.J.豪格. 机械系统的计算机辅助运动学和动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [3] Donald Hearn, M.Pauline Baker. 计算机图形学(Computer Graphics) [M]. 蔡士杰, 吴春铭, 孙正兴译. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [4] 张文苑, 贾荣珍, 刘丽. 基于组件技术的飞行器动力学虚拟样机模型库的研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(8): 1197-2003.
- [5] 贾荣珍, 张文苑, 刘刚. 基于 UML 的飞行器动力学虚拟样机仿真建模研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 231-233.
- [6] Joines J A, Barton R R, Kang K, Fishwick A, et al. A model-based approach for component simulation development [C]//Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, 2000, 1831-1840.
- [7] Peters B A, Smith J S, Medeiros D J, Rohrer M W, et al. the Extend Simulation Environment [C]//Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, 2001, 217-225.