

文章编号: 1002-0446(2005)03-0193-04

基于虚拟样机技术的空间机器人系统的建模与仿真*

徐文福¹, 强文义¹, 梁斌², 李成²

(1. 哈尔滨工业大学控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨, 150001; 2. 哈尔滨工业大学深圳研究院, 广东 深圳 518057)

摘要: 首次采用虚拟样机技术对空间机器人系统进行建模和仿真, 得出了反映机器人与卫星本体间运动学和动力学耦合情况的一些重要结果, 为保持本体姿态稳定和驱动机器人按预定轨迹运动所需的控制力矩等. 该方法可方便地用于验证固定基座、自由飞行、自由飘浮机器人的路径规划、控制算法、奇异空间等. 与其它建模和仿真方法相比, 该方法建模简单、可视化强、后处理功能极其强大, 可实现多刚体系统闭环控制的仿真.

关键词: 空间机器人; 虚拟样机; 建模与仿真; 动力学耦合; 多刚体系统

中图分类号: TP24 文献标识码: B

Modeling and Simulation of Space Robot System Based on Virtual Prototyping Technology

XU Wen-fu¹, QIANG Wen-yi¹, LIANG Bin², LI Cheng²

(1. Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. HIT Research Institute in Shenzhen, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518057, China)

Abstract: Using virtual prototyping technology to model and simulate a certain space robot system, we obtain some important results about the kinematic and dynamic coupling between the satellite and the robot, and the control torques required to stabilize the satellite attitude and to drive the robot to track the given path, etc. The method is applicable to verify path planning, control algorithm, singularity space of the fixed base, free-flying and free-floating robots, etc. Compared with other methods, it has simpler modeling procedure, greater post processing capability and higher visual quality. It is also able to realize the closed-loop control simulation for multi-body system.

Keywords: space robot; virtual prototyping technology; modeling and simulation; dynamic coupling; multi-body system

1 引言 (Introduction)

在未来的空间活动中, 空间机器人系统将扮演举足轻重的角色. 然而, 由于缺少像地球那样的固定基座, 机器人的运动会对作为其基座的卫星 (称本体) 产生反作用力和力矩, 从而导致卫星的姿态和位置发生改变. 为分析机器人和本体间的耦合情况, 采用有效的控制手段, 首先要对系统进行建模和仿真. Papadopoulos E. 和 Dubowsky S. 提出了基于拉格朗日方程的动力学模型^[1], 该方法反映了系统的动力学特性, 但计算量大; Vafa Z. 和 Dubowsky S. 提出了虚拟机械臂^[2] (Virtual Manipulator, VM) 的方法, 将它用于工作空间分析和逆运动学问题的求解等方面; 梁斌等人提出了动力学等价机械臂^[3] (Dynamically

Equivalent Manipulator, DEM) 的概念; Umetani Y. 和 Yoshida K. 将动量守恒原理用于动力学建模, 提出了反映空间机器人微分运动的广义雅可比矩阵^[4] (GJM), 与前述方法相比计算量较小, 但当末端的载荷发生变化、本体由于燃料消耗等发生动力学参数的变化时, 需要辨识这些参数, 无论从计算量还是辨识精度来说都难以让人满意.

在空间机器人仿真方面, 德国 Stefan Anton 公司开发了 EASYRob^[5], 该软件适合于运动学仿真, 但动力学仿真能力有限; Shimizu M. 等人根据广义雅可比矩阵理论编写了 Matlab 工具箱 Spacedyn^[6], 可以完成空间机器人的各种仿真, 然而没有三维图形显示; 哈尔滨工业大学采用基于虚拟现实的方法^[7], 开

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2002AA742010).

收稿日期: 2004 - 06 - 22

发了空间机器人仿真系统, 具有较强的可视化能力, 然而采用的 OpenGL三维建模功能相对较弱, 而且其运动学和动力学模型必须单独建立, 建模过程较复杂. 本文采用虚拟样机技术建立空间机器人系统的模型, 对各种情况下机器人运动对卫星的扰动情况进行了仿真, 得到了一些重要的结果.

2 空间机器人系统虚拟样机模型的建立 (Modeling of virtual prototype of the space robot system)

本文采用虚拟样机技术建立空间机器人系统的模型. 所研究的仿真系统由卫星、六自由度机器人、在轨可更换单元 (ORU) 组成, 以轨道坐标系 (+X为飞行方向, +Z为对地指向, +Y为通过右手定则确定的方向) 为参考系. 整个仿真系统

表 1 各刚体质量属性和约束关系

Table 1 Bodies' mass properties and constraints between them

刚体 (Body _i)	质量 (kg)	相对于质心坐标系的转动惯量 (kg·m ²)			刚体 <i>i</i> 1 和 <i>i</i> 之间的约束关系
		<i>I_{xx}</i>	<i>I_{yy}</i>	<i>I_{zz}</i>	
0	323	53.0	111.0	114.0	
1	2.0	5.2E - 003	5.2E - 003	2.2E - 003	旋转关节
2	2.0	2.2E - 003	5.2E - 003	5.2E - 003	旋转关节
3	1.9	0.1	5.9E - 004	0.10	旋转关节
4	2.0	2.2E - 003	5.2E - 003	5.2E - 003	旋转关节
5	1.6	6.1E - 002	5.0E - 004	6.14E - 002	旋转关节
6	2.0	5.15E - 003	2.19E - 003	5.15E - 003	旋转关节
7	28	0.48	0.57	0.45	固定约束

2.2 刚体坐标系及关节变量的定义

按 D-H 规则^[8]建立整个系统的刚体坐标系. 如图 2, 坐标系 {0} ~ {6} (用 *z*₀ ~ *z*₆ 表示) 分别表示固连在刚体 0 ~ 6 上, *Z*_{*i-1*} 轴表示第 *i* 关节的旋转轴, *z*₀ 的原点为机器人在卫星上的安装点. 相应的 D-H 参数如表 2 所示. 空间机器人系统的刚体固连坐标系

Fig. 1 The whole simulation system

首先利用 ProE 建立系统的三维实体模型, 通过 Adams 和 Pro/E 的接口模块 MEPRO 定义刚体及刚体间的约束, 所得的机构模型导入 Adams 中, 工作如下.

2.1 定义各刚体的质量属性和质心坐标系

从 ProE 导入 Adams 的模型, 各刚体都有默认的质量属性和质心坐标系, 可以根据需要重新定义. Adams 根据各刚体的质量属性、质心坐标系、刚体间的约束, 建立系统的动力学模型. 如图 1 所示的系统, 按从本体到机器人末端执行器的连接顺序依次有 Body₀ (本体, 即机器人基座)、Body₁, ..., Body₆ (末端手爪)、Body₇ (ORU), 其质量属性和约束关系如表 1 所示. 质心坐标系的原点取在刚体的几何中心, 各轴的指向同系统的参考坐标系.

Fig. 2 Body fixed frames of the space robot system

表 2 空间机器人 D-H 参数表

Table 2 The D-H parameters of the space robot

<i>i</i>	$\theta_i / ^\circ$	$\alpha_i / ^\circ$	a_i / mm	d_i / mm
1	90	-90	0	199.5
2	0	0	807.5	213.25
3	-90	-90	0	-213.25
4	0	-90	0	680
5	0	90	0	0
6	0	0	0	463.5

为了测出每个关节转动的角度, 还需要建立辅助坐标系 MAR₁ ~ MAR₆. MAR_{*i*} 固连在刚体 *i* 上, 但初始指向与 *z*_{*i-1*} 相同. 关节 *i* (*i*=1, 2, ..., 6) 转过的角度 *q_i* 和角速度 \dot{q}_i 可以用 Adam 函数表示为:

$$q_i = AZ(MAP_i, z_{i-1}), \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

$$\dot{q}_i = WZ(MAP_i, z_{b_{i-1}}, MAR_i), \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

2.3 卫星姿态的表示

在 Adams中建立卫星的轨道坐标系 GMAR, 以及固定在卫星上的坐标系 BMAR(初始指向与 GMAR相同).则卫星 轴 ($j= X, Y, Z$)的姿态角和姿态角速度可表示为:

$$q_j = Aj(BMAR, GMAR), \quad j= X, Y, Z \quad (3)$$

$$\dot{q}_j = Aj(BMAR, GMAR, BMAR), \quad j= X, Y, Z \quad (4)$$

2.4 关节控制力矩和卫星姿态控制力矩

机器人关节、卫星姿态都采用 PD控制, 控制规律分别表示如下:

$$\tau_i = k_{pi}(q_{di} - q_i) + k_{di}(\dot{q}_{di} - \dot{q}_i), \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (5)$$

$$\tau_j = k_{pj}(q_{dj} - q_j) + k_{dj}(\dot{q}_{dj} - \dot{q}_j), \quad j= X, Y, Z \quad (6)$$

其中, k_p 和 k_d 分别为 P参数和 D参数, q_d 和 \dot{q}_d 分别为期望的关节(姿态)角和角速度.

2.5 空间微重力环境的模拟

在 Adams中通过设定重力加速度 g 的数值来实现, 本文设 $g=0$.

3 闭环控制的实现 (Implementation of closed loop control)

以所建的动力学模型为对象, 实现闭环控制的仿真:机器人末端执行器抓着 ORU在离安装点上方 0.7m的位置作半径为 0.5m的圆周运动.

控制方案有两种:其一使用 Adams/Controls模块, 结合 Matlab进行联合仿真, 能够实现比较复杂的控制规律, 但由于两个软件的数据要互相传递使得仿真的速度非常慢, 调节控制参数的效率非常低;其二使用 Adams/View 中的控制工具箱 Controls Toolkit, 直接在 Adams/View环境下实现控制, 仿真的速度快很多, 能实现常用的控制律, 满足一般的仿真要求.本文采用第二种方法, 建立如式(5)和式(6)的控制规律, 控制框图如图3所示.

Fig. 3 The control block diagram of joint i

期望的关节角和角速度通过 Matlab程序规划好并按一定格式存为 .txt文件, 然后通过 import-test data, 将这些数据以样条的形式导入, 分别命名为 qq_i 和 $q\dot{q}_i$, 则:

$$q_{di} = CUBSPL(\text{time}, 0, qq_i), \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (7)$$

$$\dot{q}_{di} = CUBSPL(\text{time}, 0, q\dot{q}_i), \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (8)$$

可以用类似的方法来实现卫星的姿态控制, 其中期望的姿态角和角速度均为 0.

4 仿真结果 (Simulation results)

规划的路径:正上方 0.7m做半径为 0.5m的圆周运动, 关节速度 $<5^\circ/s$, 关节加速度 $<5^\circ/s^2$, 末端速度 $<32\text{mm/s}$.通过仿真, 得出机器人运动对卫星 X轴方向扰动力为 $-0.08 \sim 0.12\text{N}$, 扰动力矩为 $-0.15 \sim 0.13\text{Nm}$; Y轴方向扰动力为 $-0.1 \sim 0.08$, 扰动力矩为 $-0.06 \sim 0.08\text{Nm}$, Z轴方向扰动力为 $-0.08 \sim 0.13\text{N}$, 扰动力矩为 $-0.05 \sim 0.05\text{Nm}$, 如图 4.图 5和图 6所示.本体的质心沿 X方向位移约为 $-0.004 \sim 0.1\text{m}$; Y方向约为 $-0.05 \sim 0.05\text{m}$; Z方向最大位移约为 $-0.0065 \sim 0.0054\text{m}$.

图 4 机器人运动对卫星质心的扰动力
Fig. 4 The disturbance forces on the satellite mass center produced by the robot motion

图 5 机器人运动对卫星的扰动力矩
Fig. 5 The disturbance torques on the satellite produced by the robot motion

机器人的路径规划、控制算法等,是一种新颖而有效的空间机器人建模和仿真方法。

参考文献 (References)

- [1] Papadopoulos E, Dubowsky S. On the nature of control algorithms for free-flying and free-floating space robotics System[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(6): 750 - 758.
- [2] Vafa Z, Dubowsky S. On the dynamics of space manipulator using the virtual manipulator with application to path planning[J]. The Journal of the Astronautical Science, 1990, 38(4): 441 - 472.
- [3] 梁斌, 刘良栋, 李庚田. 空间机器人的动力学等价机械臂[J]. 自动化学报, 1998, 24(6): 761 - 767.
- [4] Umetani Y, Yoshida K. Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 303 - 314.
- [5] Anton S. EASYRob用户手册 EASY-ROB-Manua[EB/OL]. <http://www.easy-rob.De/index.htm>, 2004-03-10/2004-05-20.
- [6] Shimizu M, Hiraka T, Fujishima K, et al. The Spacedyn - a MATLAB Toolbox for Space and Mobile Robots[EB/OL]. <http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/spacedyn>, 1999-10-7/2004-05-20.
- [7] 李华忠, 洪炳熔. 基于 VR的自由飞行空间机器人自主运动规划仿真系统[J]. 计算机工程与运用, 1999, 35(5): 1 - 4.
- [8] 付京逊, 冈萨雷斯 R C, 李 C S G. 机器人学第四版[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1989. 26 - 29.

作者简介:

徐文福 (1979-), 男, 博士生. 研究领域: 智能机器人, 空间机器人.

强文义 (1938-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 智能控制, 智能机器人, 复杂系统控制与决策, 过程控制.

梁斌 (1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人学, 自动控制理论.

图 6 卫星质心的运动情况

Fig. 6 The motion of the mass center of the satellite

另外, 还可以得出其它的数据, 限于篇幅, 不一一给出其波形图, 只给出其数据范围: 机器人各关节控制力矩在 $-0.125 \sim 0.142 \text{ Nm}$ 之间, 关节角的控制误差小于 0.0134 rad (0.77°), 关节角速度控制误差 $-0.005 \sim 0.002 \text{ rad/s}$; 为保持 FFR 三轴稳定姿态所需的控制力矩在 $-0.21 \sim 0.21 \text{ Nm}$ 之间; 姿态控制误差为 $-0.02 \sim 0.02 \text{ rad}$ (1.15°); 姿态角速度控制误差 $-0.005 \sim 0.008 \text{ rad/s}$.

5 结论 (Conclusion)

本文采用虚拟样机技术建立空间机器人系统的动力学模型, 模拟在真实空间环境下系统的运动学和动力学特性, 得出了反映机器人与卫星本体之间运动学和动力学耦合情况的一些重要结果. 为保持本体姿态稳定和驱动机器人按预定轨迹运动所需的控制力矩等. 该方法建模过程简单、可视性强, 可以方便地用于检验固定基座、自由飘浮、自由飞行空间