

交互式机器人建模与仿真系统*

黄立¹⁺, 姜晓红¹, 熊华², 潘志庚³

¹(浙江大学 计算机学院, 浙江 杭州 310007)

²(杭州实时数码科技有限公司, 浙江 杭州 310012)

³(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

Interactive Robotics Modeling and Simulation System

HUANG Li¹⁺, JIANG Xiao-Hong¹, XIONG Hua², PAN Zhi-Geng³

¹(College of Computer Science, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China)

²(Hangzhou Realtime Digital Media Co., LTD., Hangzhou 310012, China)

³(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

+ Corresponding author: E-mail: Jeff.huangli@gmail.com

Huang L, Jiang XH, Xiong H, Pan ZG. Interactive robotics modeling and simulation system. *Journal of Software*. 2010,21(Suppl.):133-139. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/10014.htm>

Abstract: This paper introduces an interactive robotics modeling and simulation system called iRMSS (Interactive Robotics Modeling and Simulation System). iRMSS is composed of two sub systems. One is the 3D robotics modeling sub-system that facilitates the creation of segment-joint model and physical model for robots. The other is the interactive robotics simulation sub-system based-on Microsoft Robotics Studio that can provide dynamics parameters feedback. So that iRMSS has the advantage of rapid robotics modeling and flexible parameter feedback over the MSRS. An experimental case is showed to verify the system feasibility.

Key words: robotic; interactive; modeling; simulation; MSRS

摘要: 研究并实现交互式机器人建模与仿真系统 iRMSS(interactive robotics modeling & simulation system), 为机器人仿真提供了精确实时的实验平台. iRMSS 包含两个子系统: 一是 3D 机器人建模子系统 iRMS (interactive robotics modeling sub-system), 完成机器人连杆和物理模型建模; 二是基于 MSRS(microsoft robotics studio)的交互式仿真子系统 iRSS(interactive robotics simulation sub-system), 完成实时的机器人动力学仿真并获取仿真动力学参数. iRMSS 充分发挥 MSRS 集成一体化、精确度高、通用性强的优势, 同时解决 MSRS 在机器人建模和物理参数获取两方面存在的问题, 实验结果证实了 iRMSS 系统的可行性.

关键词: 机器人; 交互式; 建模; 仿真; MSRS

机器人通常是多连杆、多自由度组成的复杂结构^[1]. 在实验和开发过程中对机器人系统进行仿真可以模拟机器人的连杆和物理结构, 控制其运动并获得关键数据以供分析, 从而有效降低机器人研发时间和成本.

根据实现方式不同, 机器人建模与仿真研究目前主要存在 3 类方法. 一是基于动力学软件和 MATLAB 的联合仿真. 联合仿真通常用动力学软件完成动力学分析, 并使用 MATLAB 设计控制系统来完成仿真^[2,3]. 这种方法

* Supported by the Key Science and Technology Program of Zhejiang Province of China under Grant No.2008C11105 (浙江省重大科技专项); the Innovation Fund for Technology Based Firms of China under Grant No.09C26213303965 (科技型中小企业技术创新基金)

Received 2010-05-01; Accepted 2010-11-09

可获取精确的机械动力学分析数据,但当机械结构复杂并且子系统间交互数据较大时难以保证实时性.二是自建机器人仿真平台^[4-7].自建仿真平台可根据需求建立仿真系统,但需同时支持建模、仿真、控制和绘制等而增加了开发成本.三是集成一体化的机器人系统,包括 OpenHRP^[8],OpenRAVE^[9]和 Microsoft Robotics Studio (MSRS)^[10]等,其优势在于将仿真、控制和绘制等有机结合,用户可专注于机器人仿真本身从而提高仿真效率.

本文研究并实现交互式机器人建模与仿真系统 iRMSS,其中包括:机器人交互式建模子系统 iRMS,支持机器人几何模型导入、连杆模型和物理模型建模、完整仿真模型导出;基于 MSRS 的机器人交互式仿真子系统 iRSS,支持机器人完整仿真模型和运动规划数据导入、交互式仿真、三维仿真结果实时绘制以及机器人参数反馈.与其他方法相比,本文系统只需用户输入机器人几何模型,即可快速完成连杆模型和物理模型建模以及交互三维仿真等功能.

本文第 1 节简述机器人仿真系统相关工作.第 2 节介绍 iRMSS 系统架构.第 3 节讨论交互式建模子系统 iRMS.第 4 节讨论交互式仿真子系统 iRSS.第 5 节给出相关仿真实验结果.第 6 节总结本文并计划进一步研究工作.

1 iRMSS 系统体系架构

MSRS 有集成一体化、精确度高、通用性强等优点,但它需要编写复杂的代码来完成机器人建模并且不提供获取仿真物理参数接口,而反馈参数对于改进实物机器人是必要的.针对这些问题,本文开发 iRMSS,包括交互式建模子系统和交互式仿真子系统,提供“对象建模、物理仿真、控制仿真、真实感绘制”等功能,可实现机器人实时 3D 仿真和物理参数获取,为建立机器人的实物模型提供可靠的分析数据和实验结果.

基于 iRMSS 体系结构,完整的机器人建模与仿真流程如下并如图 1 所示.

(1) 在交互式建模子系统中导入机器人几何模型,输入物理模型参数,以完成机器人连杆模型和物理模型建模,导出机器人完整仿真模型.

(2) 将机器人完整仿真模型和机器人运动规划数据导入交互式仿真子系统,系统根据控制参数驱动单个关节或全部关节运动来完成交互式仿真.用户可获取实时的三维仿真结果以及各种动力学参数.

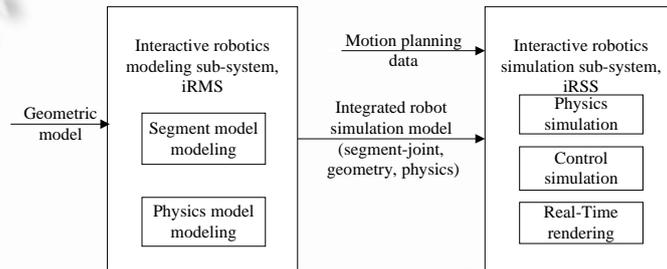


Fig.1 Architecture of the iRMSS

图 1 iRMSS 系统体系结构

2 交互式建模子系统 iRMS

机器人模型通常由复杂的关节连杆结构和几何结构组成.在物理仿真过程中,通过设定连杆和关节自由度并驱动关节马达进行仿真,iRMS 通过操作几何模型可快速无缝地完成关节和连杆定义以及物理模型建模.

交互式建模子系统操作过程为:导入机器人几何模型,选择一个几何部件并添加为机器人连杆,设定对应该关节连杆参数和物理参数.完成所有关节和连杆定义后系统计算碰撞检测形状,否则可继续插入或修改关节连杆.最后将编辑完毕的完整仿真模型输出到 SGM 文件.建模子系统处理流程如图 2 所示.

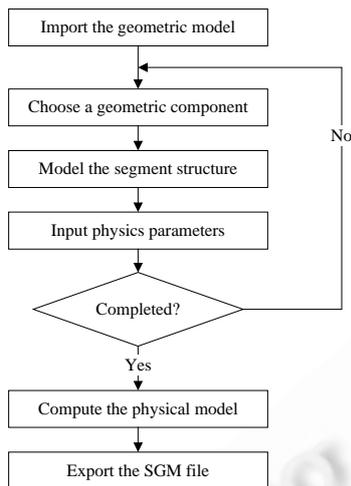


Fig.2 Procedure of the iRMS

图 2 交互式建模子系统系统处理流程

2.1 关节连杆结构定义

机器人几何模型通常由几何部件(如 obj 模型文件中的 object 块)组成,图 3(a)显示了一段机械臂的几何模型.导入几何模型后,可设定树状结构表示的关节连杆结构,其过程为:选择一个父连杆节点并插入新的连杆节点作为子节点,然后系统提供关节点位置和旋转轴接口,用户通过接口选择或自行输入确定连杆关节信息.定义完毕的关节连杆模型如图 3(b)所示,其中最后一段为空连杆.

交互式建模子系统将一个子连杆与连接其自身和父连杆的一个关节绑定,称为一个连杆节点,对应树状结构节点.这种方式和 iRSS 中连杆设定的方式一致.交互式建模子系统通过连杆节点类实现连杆节点,记录单个连杆信息.同时用连杆节点树类保存连杆的树状结构并提供绘制模型、插入和查找节点等操作接口.

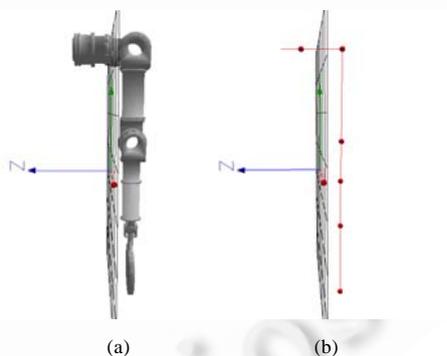


Fig.3 The Geometric model and segment-joint model of a robotic arm

图 3 机械臂的几何模型和关节连杆模型

2.2 关节连杆结构校验

为保证连杆结构模型正确合理,本文利用正运动学原理验证关节连杆的准确性.对于连杆结构中的任意连杆 S_n ,设其由几何对象 (V,T) (V 为网格点, T 为三角面片索引)组成,其运动受到自身与父连杆之间关节的旋转影响.给定关节全局平移矩阵 Mt_n 及其旋转矩阵 Mr_n ,则 S_n 的局部变换矩阵 Mrt_n 为

$$Mrt_n = Mt_n \times Mr_n \times Mt_n^{-1}.$$

S_n 的位置和朝向同样受其父连杆影响,所以其全局变换矩阵 Mrt'_n 为

$$Mrt'_n = Mrt'_{n-1} \times Mrt'_n.$$

连杆校验算法用广度优先的方法从根节点开始更新 Mrt'_i, S_n 上任意点 p 的最终位置 v' 为 $v' = Mrt'_n \times v$.

图 4(a)~图 4(c)显示了校验第 3 个关节的结果并证明了第 3 个关节及其连杆的定义是正确的.通过连杆校验,可确定连杆和关节的定义是否正确,从而提高建模的准确性.

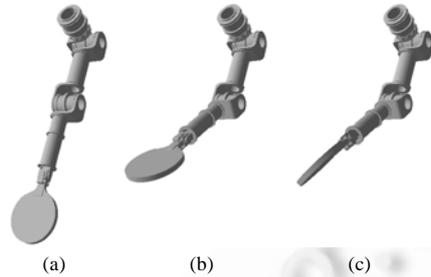


Fig.4 Results of segment-joint verification

图 4 机械臂模型校验过程

2.3 物理建模

机器人物理模型包含连杆的质量、质心和惯性张量等物理参数及其对应几何的碰撞检测形状.在建模子系统中用户交互输入物理参数,而碰撞检测形状由系统根据选择的几何部件自动计算得到.本文提出基于几何的连杆节点碰撞检测形状设定算法并以胶囊体为例进行阐述.

胶囊体碰撞检测形状参数包括胶囊体半径、高度、方向及中心点位置.对任意几何部件,计算其包围盒最大点 $P_{\max}(X_{\max}, Y_{\max}, Z_{\max})$ 和最小点 $P_{\min}(X_{\min}, Y_{\min}, Z_{\min})$.令 $L_x = X_{\max} - X_{\min}, L_{\max} = \max\{L_x, L_y, L_z\}, L_{\min} = \min\{L_x, L_y, L_z\}$,则胶囊体的方向和 L_{\max} 方向一致,胶囊体中心点位置 P_n 为包围盒中心,半径 $R_n = L_{\min}/2$,高度 $L_n = L_{\max} - L_{\min}$.在仿真过程中,碰撞检测形状与动力学求解无关.

3 交互式仿真子系统 iRSS

将机器人完整仿真模型导入交互式仿真子系统后,在 iRSS 系统的可视化仿真环境下可观测物理和几何绘制结果.对于动力学仿真,导入对应的机器人运动规划数据文件或者输入运动控制数据,并选择期望驱动关节,iRSS 将根据用户选择驱动关节马达以完成机器人的三维物理仿真,绘制引擎同时绘制仿真结果.并由系统将关节角速度等动力学参数以曲线图的形式反馈给用户.交互式仿真子系统系统处理流程如图 5 所示.

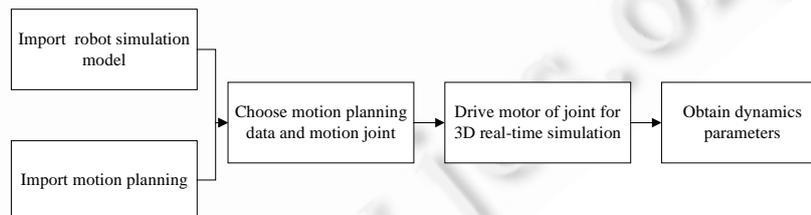


Fig.5 Simulation flow chart of the iRSS

图 5 交互式仿真子系统系统处理流程

3.1 仿真系统服务

iRSS 基于 MSRS 的服务概念实现,其所有模块都以服务的方式进行创建和封装并通过服务之间的通信来完成交互.因此,服务可被重用快速创建新的仿真系统.iRSS 中最重要的 3 个服务是机器人模型服务、仿真引擎服务和仿真环境服务.其中机器人模型服务描述机器人完全仿真模型;仿真引擎提供物理仿真和 3D 绘制功

能;仿真环境服务为用户提供和仿真过程及结果进行交互的接口.每个服务包含 7 部分核心部件,机器人模型服务结构如图 6 所示.

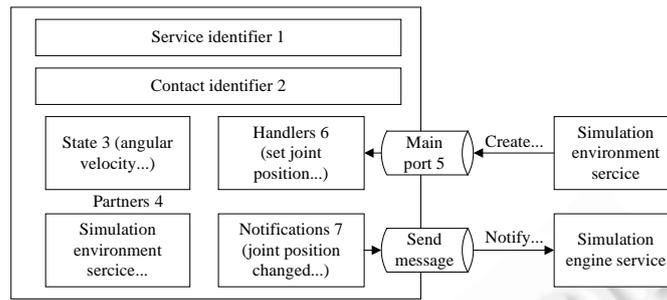


Fig.6 Structure of the robot model service

图 6 机器人模型服务结构

3.2 仿真系统服务交互

仿真系统提供三种交互方式用于完成大量服务之间的通信,即直接交互方式、直接通信方式和订阅通信方式.直接交互方式是一个服务直接调用其他服务来完成交互;直接通信方式是一个服务直接向另一个服务的主端口发送消息来完成通信;而订阅通信方式是通过系统提供的订阅管理者(subscription manager)订阅、分发消息来完成通信,可用于构建具有较多并发分布式服务的仿真应用.

仿真环境服务首先创建机器人模型服务并订阅仿真引擎服务来完成 iRSS 初始化.开始仿真循环后,仿真引擎服务利用物理引擎和绘制引擎完成实时物理仿真和绘制.当机械臂模型状态改变时,仿真引擎服务获取这些改变,并需通知仿真环境服务.该过程首先由仿真引擎服务发送状态改变的消息给订阅管理者,管理者获得消息后立即将状态改变的事件通知发送给仿真环境服务,仿真环境服务根据事件通知调用相关服务操作进行处理,如反馈关节速度曲线.仿真环境服务也可接受用户控制,并将控制消息发送给仿真引擎服务进行仿真,如改变关节电机转速.服务间的交互过程如图 7 所示.

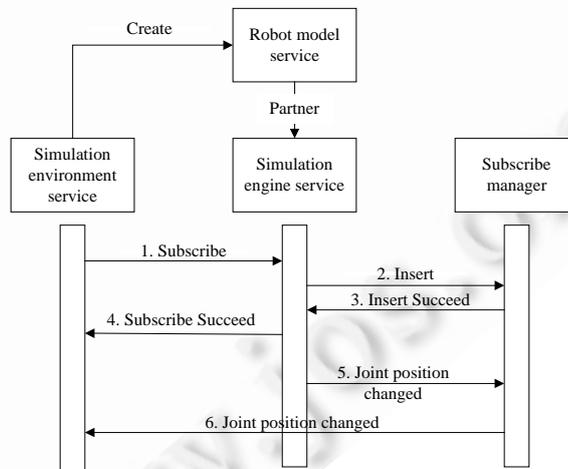


Fig.7 Interaction course of system services

图 7 仿真系统服务交互过程

4 仿真实验及结果

为检验系统的仿真效果,本文以图 1 所示的机械臂模型的仿真为例对 iRMSS 进行测试和分析.首先交互式模型定义子系统导入几何模型并定义其连杆模型和物理模型,导出对应的 SGM 文件、校验连杆结构模型并确

定 SGM 文件的正确性后,在交互式仿真子系统中导入 SGM 文件即可观测机器人 3D 模型.在选择要求驱动的关节及其对应的运动规划数据之后,交互式仿真子系统进行实时精确的物理仿真并绘制结果.图 8(a)~图 8(e)显示驱动模型的第 3 个关节运动到 1.5 弧度的过程,该驱动过程采用图 9 所示的运动规划数据.

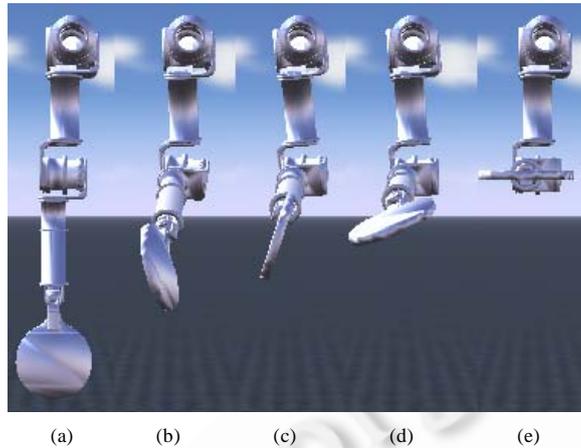


Fig.8 Simulation results of driving the third joint of a robot arm with 7 segments

图 8 驱动包含 7 段连杆的机械臂模型第 3 个关节的仿真过程

用户可根据需要选择在交互式仿真子系统的曲线绘制区输出对应的角速度曲线或线速度曲线并由交互式仿真子系统将结果保存到指定文件中.图 10(a)和图 10(b)分别显示了驱动第 3 个关节后交互式仿真子系统输出的第 4 段连杆在世界坐标系下的角速度曲线和速度曲线.

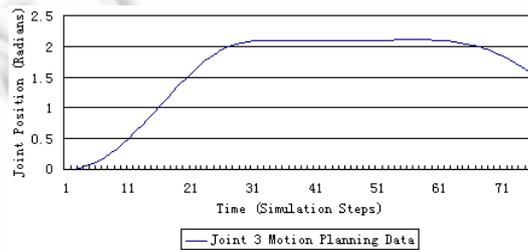


Fig.9 Motion planning data for the third joint

图 9 第 3 关节运动规划数据

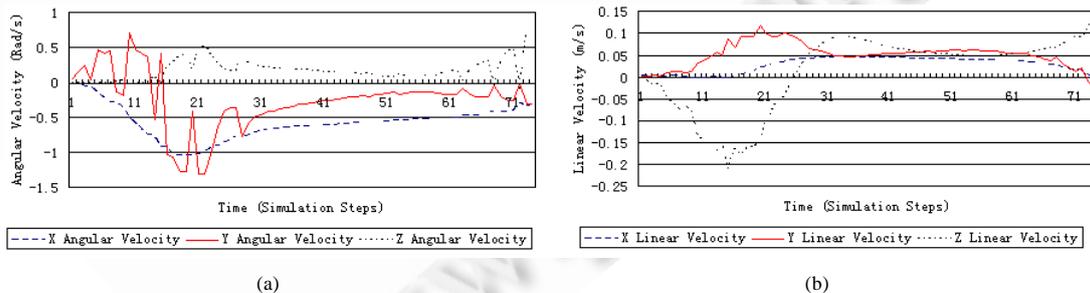


Fig.10 Linear and Angular velocity curve of the fourth segment

图 10 第 4 连杆线速度和角速度曲线

5 总结与下一步工作

本文研究并实现交互式机器人建模与仿真系统 iRMSS,其交互式模型定义子系统 iRMS 可根据机器人几何

模型方便、快速、准确地完成机器人关节连杆模型、物理模型的定义以及关节连杆结构的校验,解决了 MSRS 系统需要编写复杂代码来定义机器人模型的问题;其交互式仿真子系统 iRSS 基于 MSRS,可实时、精确地完成机器人三维动力学仿真并获取动力学参数,同时将大量环境对象、机器人模型等封装为服务以支持重用。下一阶段我们将致力于在以下方面改进 iRMSS。第一,从 PhysX 物理引擎直接获取更多的物理参数,如力和力矩;第二,面向复杂机器人模型仿真,在 MSRS 外部对驱动器和传感器进行建模并封装为服务以丰富 MSRS 的驱动器和传感器种类。

References:

- [1] 蔡自兴.机器人学.北京:清华大学出版社,2000.
- [2] 龚建球,刘守斌.基于 Adams 和 Matlab 的自平衡机器人仿真.机电工程,2008,25(2):8-10.
- [3] 谢海斌,张代兵,沈林成.基于 MATLAB/SIMULINK 与 FLUENT 的协同仿真方法研究.系统仿真学报,2007,19(8):86-90.
- [4] 樊雅萍,黄生学,温佩芝,吴晓军.基于 OpenGL 的机器人虚拟漫游系统开发.系统仿真学报,2005,17(10):36-38.
- [5] 田华英,吴秋轩,曹广益.基于 Java 3D 的自重构机器人仿真平台的构建.计算机仿真,2006,23(11):271-274.
- [6] 郭姣,蒋海青.利用 AutoCAD 与 MATLAB 进行机器人仿真系统的开发.计算机仿真,2003,20(9):121-123.
- [7] 熊国辉.基于 OPENGL 技术 6R 机器人的仿真[硕士学位论文].北京:北京邮电大学,2006.
- [8] Hirukawa H, Kanehiro F, Kajita S. OpenHRP: Open architecture humanoid robotics platform. In: Jarvis RA, Zelinsky A, eds. Robotics Research. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 99-112.
- [9] Diankov R, Kuffner J. OpenRAVE: A planning architecture for autonomous robotics. Technical Report, Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2008. http://www.programmivision.com/papers/diankov08_openrave_tr.pdf
- [10] Sara Morgan. Programming microsoft® robotics studio. Washington: MicroSoft Press, 2008.



黄立(1984—),男,浙江湖州人,硕士生,主要研究领域为虚拟现实,物理仿真。



熊华(1978—),男,博士,主要研究领域为虚拟现实,计算机图形学,机器视觉。



姜晓红(1966—),女,博士,副教授,主要研究领域为分布式系统,虚拟环境,图像处理。



潘志庚(1965—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为虚拟现实,多媒体技术。