

# 自由飞行空间机器人遥操作三维预测 仿真系统研究

王学谦<sup>1</sup>, 梁 斌<sup>1,2</sup>, 李 成<sup>2</sup>, 徐文福<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 深圳 518055; 2. 哈尔滨工业大学空间智能系统研究所, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 三维预测仿真技术是目前解决大时延遥操作的主要方法, 在空间机器人的遥操作中起着至关重要的作用。针对自由飞行空间机器人建立了一套遥操作三维预测仿真系统, 并进行了地面演示验证。首先介绍了空间机器人系统及其遥操作分系统组成, 以及图形预测仿真原理。然后详细介绍了遥操作分系统预测仿真子系统的开发, 该子系统基于面向对象的思想 and MVC(Model-View-Controller)模式进行设计, 采用 Java 语言和 Java3D 图形库进行开发。仿真系统以空间机器人的运动学模型和动力学模型进行驱动, 具有快速、准确的图形碰撞检测功能。最后建立了遥操作地面演示验证系统, 进行了多次遥操作实验。结果表明了预测仿真子系统的有效性。

**关键词:** 三维预测仿真; 碰撞检测; 空间机器人; 地面验证; 遥操作

**中图分类号:** TP391.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1328(2009)01-0402-07

**DOI:** 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.00.072

## 0 引言

空间机器人系统在未来的空间活动中具有越来越重要的作用, 其中在轨服务、卫星维修以及建造大的空间结构方面具有广泛的应用前景。自由飞行空间机器人是目前空间机器人领域的主要研究方向, 它由常规航天器和搭接在本体上的机械臂组成, 携带喷气装置, 可以在空间中自由飞行并进行在轨服务功能。美国、德国、日本等国进行了大量的研究并开展了验证实验。1993 年德国的 ROTEX 机器人是世界上第一个具有地面遥操作能力和空间站宇航员操作能力的空间机器人系统<sup>[1]</sup>; 1997 年日本发射的 ETS-VII 是世界上第一个自由飞行空间机器人系统, 主要进行自主交会对接和空间机器人操作实验<sup>[2]</sup>。许多国家都投入了大量的人力物力, 空间机器人的快速发展, 在不久的将来就可以完成大量的在轨服务工作<sup>[3]</sup>。国内在空间机器人及遥操作方面进行了大量的理论研究, 研制工作已经开始, 不久后将会出现我国自行研制的空间机器人系统。

由于受机构、控制、传感及人工智能等支撑技术的制约, 从 80 年代开始普遍认为, 实现完全自主的空间机器人是短期内难以达到的目标, 因此目前的

研究重点是有人参与的局部自主遥操作系统。空间机器人遥操作存在的主要问题是时延, 三维预测仿真是解决这个问题的主要方法, 国内外进行了大量的研究<sup>[4]</sup>。

针对国际航天大国的发展动态, 国家高技术 863 一直在开展空间机器人关键技术研究, 并取得了丰硕的研究成果<sup>[5]</sup>。本文面向我国第一个空间机器人系统设计了一套实用的遥操作预测仿真子系统, 采用 VRML(Virtual Reality Modeling Language)及 Java3D 高级图形库、面向对象的编程思想和 MVC(Model-View-Controller)的设计模式进行遥操作预测仿真子系统的开发。系统首次采用坐标转换的方法将航天器和机器人的图形仿真有机的结合在一个系统中, 避免了使用两套单独的图形仿真系统存在的一些问题。工程应用表明本系统功能强大、扩展性强, 在空间机器人系统的开发过程及未来应用中具有重要的作用。

## 1 空间机器人系统及其遥操作分系统

### 1.1 空间机器人系统

本文研究的空间机器人系统如图 1 所示, 自由飞行空间机器人 FFSR(Free Flying Space Robot, 简称 FF-

SR)和目标星(Target Satellite,简称 TS)组成,FFSR 由空间机器人基座、6DOF 机械臂和手眼相机等部分组成。系统发射时 FFSR 和 TS 呈对接状态,在演示任务时分离,目标星作为空间机器人的操作对象。该系统在轨完成对空间合作目标的捕获、跟踪、接近和成像观测功能,以及完成对非合作目标的捕获、跟踪与接近功能,最终实现在轨维护、检测和维修功能。

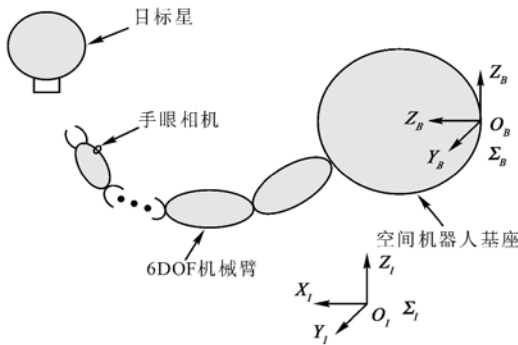


图 1 空间机器人系统组成图  
Fig.1 Compose of space robot system

### 1.2 遥操作分系统

遥操作分系统由预测仿真子系统、主从控制子系统、任务规划子系统、信息处理子系统和地面验证子系统五部分统组成,如图 2 所示。

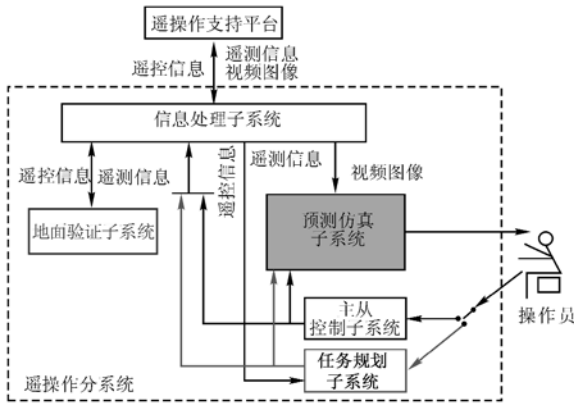


图 2 遥操作分系统组成图  
Fig.2 Compose of teleoperation subsystem

其主要功能是采用多种遥操作控制模式,控制空间机器人的机械手进行遥操作任务,各子系统的功能如下所示。

(1) 预测仿真子系统是用来进行空间机器人状态的预测或离线对遥操作命令进行仿真,同时提供碰撞检测功能。

(2) 主从控制子系统的主要功能是利用手控器实时生成控制命令,双边控制时可感受反馈力。

(3) 任务规划子系统的主要功能是结合遥操作任务和模式,对遥操作任务进行分析、分解与决策,实现多种遥操作模式下的任务规划,生成空间机器人系统运动数据或任务序列。

(4) 信息处理子系统是遥操作系统和测控系统之间的桥梁和接口,主要功能是数据处理、命令安全性检查及网络通信控制。

(5) 地面验证子系统用来对遥操作命令进行验证,空间机器人研制阶段为遥操作系统其它部分提供联调对象。

按自主能力从低到高,该分系统具有以下几种遥操作控制模式:主从模式、遥编程模式、共享模式、自主模式,根据不同的任务选择系统不同的遥操作模式。

本文的研究对象是空间机器人遥操作分系统中的预测仿真子系统部分。遥操作分系统采用了模块化设计方法,各子系统间的耦合性小,使得各部分单独开发然后进行集成。而且在分系统接口不变的情况下可逐渐增加功能,在系统研制的大部分时间都可进行集成实验。

## 2 预测仿真子系统设计

### 2.1 图形预测仿真原理

预测仿真的基本思想是基于系统模型,根据当前状态和控制输入,对系统状态进行预测,并以图形的方式显示给操作员。预测仿真分为两种类型:一种是根据系统当前状态和时间导数,通过泰勒级数进行外推;另一种是,建立系统运行的仿真模型,在模型中融合系统的当前状态、导数,以及控制输入,然后让仿真系统以较实际过程快得多的速度运行。在空间遥操作的大时延环境下,预测仿真中的预测是基于空间机器人几何模型、运动学模型和动力学模型的,其中的动力学仿真根据当前和历史输入,状态反馈数据进行预测仿真。

图形预测仿真的流程为:首先在本地计算机建立远端机器人及环境的仿真模型;然后操作者根据仿真模型的反应进行连续操作,而不必等遥端传回状态信息和视频图像;最后生成的遥操作命令经过安全检查和碰撞检测后连续发送给遥端的机器人执行。由于操作员与仿真图形之间基本不存在时延,实际的机器人在几秒的时延后跟随仿真图形的动作而动作,这样就消除了时间延迟的影响。空间环境的不同使得模型参数发生了变化,所以必须对模型

进行校正来保证和真实情况接近。同时仿真过程中还会产生积累误差,当接收到空间机器人的信息,对仿真过程的状态进行校正,以消除仿真的累积误差。

## 2.2 预测仿真子系统详细设计

采用面向对象语言 Java 和高级三维图形库 Java3D 进行开发<sup>[6]</sup>,系统具有跨平台性。同时系统采用模块化的设计方法,将系统按功能划分为相应的模块。各个模块之间的耦合度低,层次分明,符合设计模式“高聚合,低耦合”的要求,便于系统的开发和扩展。预测仿真子系统组成如图 3 所示<sup>[7]</sup>。为了便于整个遥操作分系统的开发,按模块化的思想对各子系统进行单独设计。

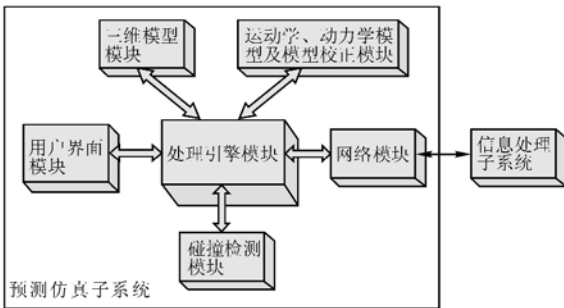


图 3 预测仿真子系统组成图

Fig. 3 Compose of predictive simulation sub-subsystem

预测仿真子系统包括:① 用户界面模块、② 三维模型模块、③ 运动学、动力学及模型校正模块、④ 碰撞检测模块、⑤ 网络模块、⑥ 处理引擎模块。处理引擎模块是各模块互相连接的桥梁,负责各种对象的生成、管理和调度。用户界面模块负责与操作者进行交互,提供人性化、友好的人机界面,进行状态数据的显示;碰撞时发出视觉刺激信息并提供发生碰撞的位置信息;同时利用手控器实时控制机器人的运动。三维模型模块提供空间机器人及空间环境的三维模型,包括机器人、地球、轨道和星空的模型。运动学、动力学模型及模型校正模块是本系统的核心模块,用于实时响应操作命令,对空间机器人的运行状态进行预测,以驱动图形显示。碰撞检测模块负责进行碰撞的检测,并在有危险发生时发出报警信号。网络模块负责与信息处理子系统和动力学模型工作站的信息交换。

预测仿真子系统开发采用面向对象的编程思想,建立了卫星、机械臂、相机、地球、太阳、星空的类与真实对象对应。自由飞行空间机器人由常规航天器(一般为卫星)和搭载其上的机械臂组成,相应的

由机器人类 Robot 和卫星类 Satellite 组合成空间机器人类 SpaceRobot。面向对象的思想使得系统通过少量的修改便可以进行卫星、机器人和空间机器人的仿真,具有较强的扩展性。

### 2.2.1 用户界面模块

系统采用了 MVC 模式,视图层和模型层进行了有效的分离。可保证用户界面自由配置。

MVC(Model-View-Controller)应用程序由模式、视图、控制器三个部分组成。模型维护数据并提供数据访问方法,视图绘制模型的部分数据或所有数据的可视图,控制器来处理事件。完全将程序进行分离是非常困难的,也是没有必要的。本系统应用的是简化版本模型-视图(MV)模式,控制层被包含在视图层中。其中模型层管理应用程序的数据,由各种对象组成的虚拟世界。可通过用户界面的输入、网络数据驱动和定时器驱动三种方式来改变模型状态,当模型数据状态改变后,它将通知视图。视图表现模型的数据,包括三维图形显示和状态数据的显示。它响应用户输入,指示模型相应地更新其数据。在得到模式数据改变的通知后,它获得新的模型状态并更新数据。三维图形显示由 Java3D 自动实现,而状态数据显示的更改需要设计实现<sup>[8]</sup>。

本系统可提供遥操作功能、机器人调试功能、动画演示功能,采用 JInternalFrame 作为基类进行界面的设计,优点是可以灵活的改变界面中包含的内容。图形界面共包括七个面板:WorldWindow 显示三维图形;TeleOpwindow 为遥操作控制面板,完成遥操作功能;StateWindow 为状态显示面板,用来显示轨道数据、机械臂状态数据等;AdjustWindow 为调整面板,可方便的调整机械臂的关节角;ControlWindow 为控制面板,包括宏观视图和微观视图的切换、系统功能的选择、仿真启动、停止以及仿真节拍的切换,它的交互对象为动力学模型工作站。Console 为程序的输出窗口。

遥操作面板可以输入任务级指令、子任务级指令,以及带参数的指令。指令数据可分为关节数据和机械臂末端位置姿态数据两种方式。同时可在四种遥操作模式之间进行平稳切换,保证遥操作任务的快速完成。

### 2.2.2 三维模型模块

预测仿真子系统需要逼真的仿真图形,所以要求几何模型的建立要精确。本系统中空间机器人模型采用 Java3D 和 3DMax 共同建模的方式,具体方法

参见文献[9]。本文具体介绍空间环境的建模及坐标链接关系。对于空间环境的建模在 Java3D 中完成,包括地球、轨道、太阳和星星。通过对一个高精度圆球进行贴图来建立地球的几何模型。轨道是通过轨道六根数来确定轨道的位置和形状,然后通过 LineArray 类来实现。因为太阳到地球或者是空间机器人的距离近似无穷远,没有必要完全按照太阳的实际参数进行创建。可以按照比例关系创建一个红色的球体,它的位置和方位由一个三维矢量确定,太阳光通过同一矢量创建方向光源来实现。太空中的星星是通过提取星表中的数据建立,首先需要建立和地心惯性坐标系对应的太空赤道坐标系,将星表中的数据提取为赤径和赤纬数据,利用 PointArray 类进行绘制。根据需要的星星数量可以选取不同的星表,满足不同的需要。

通过上面的步骤建立了空间机器人几何模型和太空环境的模型,为预测仿真提供了基础。为了进行正确的仿真,需要对各个模型建立正确的坐标关系。首先建立了地心惯性坐标系  $\sum_o$  和 FFSR 的轨道坐标系  $\sum_c$ 。地心惯性坐标系中  $O_o y_o$  在赤道面内,  $O_o z_o$  指向春分点;轴垂直于赤道面,与地球的自转角速度矢量一致;  $O_o y_o$  轴与  $O_o x_o$  轴和  $O_o z_o$  轴垂直,且  $O_o x_o y_o z_o$  构成直角坐标系。由于机械手运动过程会造成系统的质心发生变化,还需要建立一个 FFSR 的本体坐标系  $\sum_b$ ,与本体固连。其它坐标系的关系如图 4 所示。

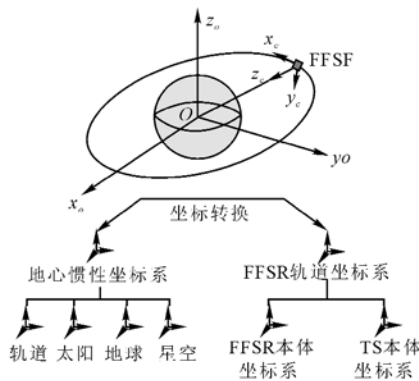


图 4 预测仿真子系统的坐标关系图

Fig.4 Coordinate relationship of the subsystem

一般来说应选择地心惯性与 Java3D 的坐标系重合,但是机器人在地心惯性坐标系内的坐标  $10^9$  米级,而机械手操作为毫米级,会造成 Java3D 中图

形显示的失真。在仿真系统采用了坐标转换的方法,将 FFSR 的轨道坐标系与 Java3D 的坐标系重合,其它坐标系以此坐标系作为基准。轨道、太阳、地球和星空的坐标系都建立在地心惯性坐标系中,FFSR 本体坐标系和 TS 本体坐标系建立在 FFSR 轨道坐标系中,这个方法可以减小计算机运算误差,大大提高了仿真的精确度。地球的姿态通过星历计算得到春分点处的经度,按照仿真周期实时更新。太阳相对于地心惯性坐标系的位置矢量也由星历计算得到,同时将方向光源与太阳固连并设置相同的方向,可进行有关太阳的仿真。

### 2.2.3 运动学、动力学及模型校正模块

运动学、动力学及模型校正模块是整个仿真子系统的核心模块,运动学和动力学模型用来进行仿真驱动,当模型与真实系统误差超过限制时需要模型进行校正。几何模型的作用是对系统预测仿真过程进行直观的三维显示,而对于几何模型如何运动则是依靠系统的运动学和动力学进行驱动的。

自由飞行空间机器人基座有三种控制模式:位置姿态均受控、位置不受控姿态受控(自由飞行模式)、位置姿态均不受控(自由漂浮模式),下面分析了空间机器人三种控制模式下的运动学模型。空间机器人的一般运动方程的矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} v_e \\ \omega_e \end{bmatrix} = J_b \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + J_m \dot{\Theta} \quad (1)$$

其中,  $v_e$  和  $\omega_e$  分别为机械臂末端线速度和角速度,  $v_0$  和  $\omega_0$  分别为基座的线速度和角速度,  $J_b$  为与基座运动相关的雅可比矩阵,而  $J_m$  为与机械臂运动相关的雅可比矩阵,  $\Theta$  为机械臂的关节角向量。

(1) 当基座位置姿态均受控时,  $v_0$ 、 $\omega_0 \approx 0$ , 运动方程表示为:

$$\begin{bmatrix} v_e \\ \omega_e \end{bmatrix} = J_m \dot{\Theta} \quad (2)$$

上式中,  $J_m$  与地面固定基座机器人的雅可比矩阵相同。

(2) 对于自由飞行模式,系统的线动量守恒,并假定系统的初始线动量为 0,并且由于基座姿态受控,基座的姿态角很小,即  $\omega_0 \approx 0$ , 系统的运动方程表示为:

$$\begin{bmatrix} v_e \\ \omega_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M} J_{bc} J_{Tw} + J_{nw} \\ J_{mw} \end{bmatrix} \dot{\Theta} \quad (3)$$

(3) 对于自由漂浮模式,基座位置和姿态均不

受控,系统的线动量和角动量守恒,并假定系统的初始线动量和角动量为 0,系统的运动方程表示为:

$$\begin{bmatrix} v_e \\ \omega_e \end{bmatrix} = J_b \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + J_m \dot{\Theta} = \begin{bmatrix} J_{g,v} \\ J_{g,\omega} \end{bmatrix} \dot{\Theta} \quad (4)$$

其中,  $J_g$  为空间机器人的广义雅可比矩阵,它是基座姿态、机械臂关节角,以及各刚体质量、惯量的函数。

系统的动力学建模采用拉格朗日方程,表示为:

$$H \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{q}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_b \\ \tau_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_b^T \\ J_m^T \end{bmatrix} F_e \quad (5)$$

其中,  $F_b$  和  $F_e$  分别为基座和机械臂末端执行器上的外作用力/力矩,  $\tau_m$  为机械臂各关节外力矩。  $c_b \in R^{6 \times 1}$ ,  $c_m \in R^{n \times 1}$  分别表示为与基座和机械臂相关的非线性项。  $J_b^T$  为基座的力雅可比矩阵,  $J_m^T$  为操作臂的力雅可比矩阵,  $H$  为广义惯性矩阵。

预测仿真子系统根据运动学模型和动力学模型对系统的输入命令进行实时仿真,并将结果通过图形界面进行显示。运动学和动力学仿真结果中的机械臂的六个关节角、手爪的角度、基座的位置和姿态在三维界面进行显示。

模型校正模块采用的方法是对运动学模型和动力学模型的参数进行辨识,然后对模型进行校正。本研究所对空间机器人运动学模型参数辨识进行了大量的研究工作,具体内容参见[10],动力学参数辨识工作正在开展中。

### 2.2.4 碰撞检测模块

碰撞检测是机器人运动仿真系统中的重要组成部分,快速有效的碰撞检测功能将是仿真系统成功的关键。碰撞检测的范围为机械臂连杆间的碰撞、连杆与机器人本体的碰撞以及连杆与目标物体的碰撞,当发生碰撞时通过颜色变为红色进行报警。

本系统采用两种方式进行碰撞检测:分别为 Java3D 提供碰撞检测类和单独编写碰撞检测类。Java3D 提供了两种方式的碰撞检测类,USE\_BOUNDS 方式虽保证实时性但精确性太差,而 USE\_GEOMETRY 方式有很高的精确性,但实时性太差。本系统采用的是基于有向包围盒 OBB (Oriented Bounding Box) 的碰撞检测方法。其基本思想是用体积略大而几何特性简单的包围盒来近似的描述复杂的几何对象,进而构造树状层次结构可以越来越逼近对象的几何模型,直到几乎完全获得对象的几何特性,从而只需对包围盒重叠的部分进行进一步的相交测试。OBB 最大特点是它的方向的任意性,这使得它可以根据被包

围对象的形状特点尽可能紧密地包围对象,但同时也使得它的相交测试变得复杂。针对空间机器人的特点,编写了基于方向包围盒的碰撞检测类来实现仿真环境下各运动部分之间的碰撞检测。

### 2.2.5 网络模块

对于网络数据的接收采用 UDP 协议,其优点是不需建立连接,接收到网络数据后立即进行模型驱动。而对于遥控命令由于需要保证准确性,故采用 TCP 协议进行传送。

为了提高系统的扩展性,建立 TelecontrolProtocol、TelemetryProtocol 类分别对遥控数据和遥测数据进行封装。

为了减小数据帧的长度,数据采用二进制和当量表示的方式。首先将数据按照协议和当量转换为字节数组,接收端在根据数据协议和相应的当量将数据提取出来。比如机械臂的关节角为浮点型数据,需要四个字节表示,但采用当量方式只需要两个字节便可以表示。关节角数据的精度为  $0.01^\circ$ ,范围为  $350^\circ$ 。由于  $2^{16} = 65536$  且当量为  $0.01^\circ$ ,所以两个字节可以包含的关节角的范围。

### 2.2.6 引擎模块

引擎模块是预测仿真子系统仿真系统的核心,用来组织模型数据和建立逻辑关系。它提供了整个虚拟世界的模型,外界通过它来获得各对象的控制权。

## 3 实验研究

### 3.1 演示验证实验系统组成

遥操作分系统各子系统的耦合性较小,在主从控制子系统和任务规划子系统只开发基本功能情况下便可与预测仿真子系统进行集成应用。主从控制采用 Joystick 作为手控器输入<sup>[11]</sup>,实现 Joystick 包的 JoystickListener 接口获得输入数据。采样时间间隔为 100ms,利用按键的组合实现单关节运动和末端运动。信息处理子系统由合作单位研制,进行网络连接管理和信息转发。

在空间机器人目标捕获地面实验系统的基础上<sup>[12]</sup>,实验室开发了遥操作地面验证子系统。该系统基于“动力学仿真”和“运动学等效”相结合的思想,利用工业机器人模拟空间机器人的末端与目标之间的相对运动。该系统离线状态下可以为其它子系统的联调提供操作对象,保证整个遥操作分系统的顺利完成;在线状态下对发送的所有遥操作命令进行实时验证,保证遥操作任务的顺利完成。

### 3.2 遥操作演示验证实验

#### 3.2.1 实验条件

目标抓捕中空间机器人飞行基座处于自由飞行模式(基座姿态受控),FFSR 姿态控制精度为  $\pm 0.5^\circ$ ,姿态稳定度  $\pm 0.05^\circ/\text{s}$ 。实验中设置了两个特殊位置,即捕获准备位置和标称停泊位置。

当机械手末端坐标系与捕获手柄坐标系重合(或者两者的相对位置、姿态偏差)在某一阈值范围内时,即认为目标抓捕成功。限于篇幅,在此仅给出了典型的主从遥操作实验的结果<sup>[13]</sup>。

#### 3.2.2 遥操作实验结果

利用该平台,分别从广州(华南理工大学计算机与科学学院)和西安(西北工业大学航天学院)进行了多次遥操作实验,以验证所研制的预测仿真子系统的有效性。

操作者在三维图形仿真系统中操作仿真模型,如图 5 所示,其中线框模型为预测机器人,实体模型为反馈机器人。操作者利用手控器连续操作预测机器人进行目标的抓捕,控制命令经过网络传送给地面验证子系统,命令经过缓冲后连续执行,实验结果如图 6 所示。为了提高系统的安全性,当末端和目标的距离小于安全距离时,接近速度逐渐降低为零。

实验结果为手爪可以安全的将目标抓住,操作可以连续进行,相对于依赖反馈视频的直接主从遥操作大大的提高了效率。

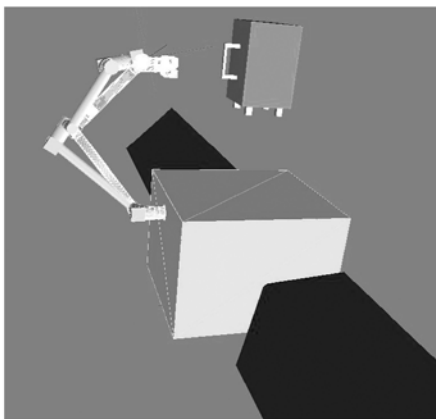


图 5 主从模式遥操作实验图形预测仿真图

Fig.5 Graphic prediction of master-slave experiment

## 4 结论

根据我国空间机器人在轨试验系统遥操作分系统的需要,本文研究和建立遥操作分系统中的预测仿真子系统,并开展了空间机器人遥操作地面演示

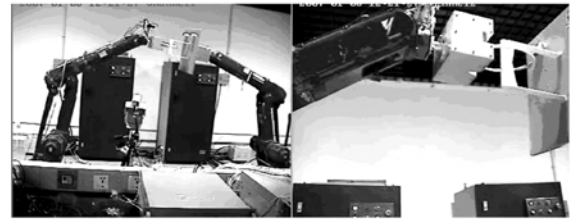


图 6 主从模式地面验证实验结果

Fig.6 Results of master-slave mode experiment

验证实验,保证了子系统的实用性和工程性。本文的研究有如下特点:

- (1) 建立了针对自由飞行空间机器人的遥操作三维预测仿真系统,成果已进行了应用;
- (2) 进行了遥操作地面演示验证实验,体现了该项研究的工程可实现性;
- (3) 建立的预测仿真子系统,将实际的轨道、姿态信息和机械臂运动信息进行了有机的集成;
- (4) 按模型数据建立了机器人模型和空间环境模型,保证了仿真的逼真性;
- (5) 实现了快速的碰撞检测方法,保证了仿真的实时性。

该子系统在空间机器人系统的研制过程中得到了成功的应用。目前尚不具备虚拟向导和动力学参数辨识功能,需在后续的工作中进行补充,完善空间机器人遥操作分系统的预测仿真子系统。

### 参考文献:

- [ 1 ] Hirzinger G, Landzettel K. Telerobotics with large time delays the ROTEX experience[J]. Proc. of IEEE/RSJ/GI Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Munich, Germany, 1994: 571 - 578.
- [ 2 ] OdaM. Space robot technology experiments on NASDA's ETS - VII satellite[J]. Advanced Robotics, 1999, 13(3): 335 - 336.
- [ 3 ] Landzettel K, et al. Robotic on-orbit servicing-DLR's experience and perspective[J]. Proc. Of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 2006: 4587 - 4594.
- [ 4 ] Thomas B, Sheridan. Space teleoperation through time delay: review and prognosis[J]. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1993, 9(5):592 - 606.
- [ 5 ] 李成, 梁斌. 空间机器人遥操作[J]. 宇航学报, 2001, 22(1): 95 - 98. [LI Cheng, LIANG Bin. Teleoperation of space robotics [J]. Journal of Astronautics, 2001, 22(1):95 - 98(in Chinese).]
- [ 6 ] 李凯里. 机械臂虚拟控制中的Java3D设计技术[J]. 系统仿真学报, 2006, S1:123 - 125. [LI Kai-li. Java3D design technique for virtual control of robot[J]. Journal of System Simulation, 2006, S1: 123 - 125(in Chinese).]
- [ 7 ] 唐凯, 康凤举, 等. 一种空间战场视景仿真系统的开发[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11):2435 - 2437. [TANG Kai, KANG

- Feng-ju, et al. Development of space battlefield visual simulation system[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(11):2435 - 2437(in Chinese). ]
- [ 8 ] 陈超, 朱一凡, 等. 基于框图建模的表现模型研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(3):944 - 946. [CHEN Chao, ZHU Yi-fan, et al. Research on the presentation model in block modeling[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(3):944 - 946(in Chinese). ]
- [ 9 ] 杨小平, 王学谦. 面向 Java3D 的 CAD 模型简化与转换[J]. 计算机仿真, 2007, 24(8):201 - 204. [ YANG Xiao-ping, WANG Xue-qian. CAD model's simulation and conversion for Java3d[J]. Journal of Computer Simulation, 2007, 24(8):201 - 204(in Chinese). ]
- [10] 刘宇, 梁斌, 等. 基于运动学标定的空间机器人位姿精度的研究[J]. 机械设计, 2007, 24(4):8 - 12. [LIU Yu, LIANG Bin, et al. Research on positional posture accuracy of spatial robot based on kinematics demarcation [J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(4):8 - 12(in Chinese). ]
- [11] 刘国栋, 连广宇, 孙增圻. 空间遥操作机器人力反馈实验系统的研究与实现[J]. 机器人, 2001, 23(5):411 - 415. [LIU Guodong, LIAN Guang-yu, SUN Zeng-qi. Experiment system for space teleoperated robot[J]. Journal of Robot, 2001, 23(5):411 - 415(in Chinese). ]
- [12] Xu W F, Liang B, Xu Y S, et al. A ground experiment system of free-floating space robot for capturing space target[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2007, 48(2): 187 - 208.
- [13] Ou Ma. On the validation of SPDM task verification facility[J]. Journal of Robotic System, 2004, 21(5): 219 - 235.

作者简介:王学谦(1980-),男,博士研究生,研究方向为空间机器人,遥操作,虚拟现实。

通信地址:北京市海淀区上地东路一号院鹏寰国际大厦 302C (100085)

电话:(010)58858773

E-mail:xqwang@robotsat.com

## Study on Three Dimensional Predictive Simulation System of Teleoperation for Free Flying Space Robot

WANG Xue-qian<sup>1</sup>, LIANG Bin<sup>1,2</sup>, LI Cheng<sup>2</sup>, XU Wen-fu<sup>2</sup>

(1. Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China;

2. Institute of Space Intelligent System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The 3D predictive simulation technology is an essential method to solve large time delay problem, which is very important for the teleoperation of space robot. A three dimensional predictive simulation system for free-flying space robot is developed, and the system has been verified on ground. Firstly, the space robot system is introduced. And the teleoperation subsystem, the key device to control the space robot, was designed. Then, the predictive simulation sub-subsystem, which is an important part of the teleoperation subsystem, was developed. The sub-subsystem software was programmed based on the oriented object idea and MVC (Model-View-Controller) pattern, using the language of Java and Java3D. The simulation is driven by the kinematics model and dynamics model, and has a fast, accurate function of collision detection. Lastly, a ground teleoperation demonstration and verification system was set up, and many experiments were done on the system. The experiments verified the effectiveness of the work in the paper.

**Key words:** Three dimensional predictive simulation; Collision detection; Space robot; Ground verification; teleoperation