

3-15-2024

## A Distributed Simulation System for Space Operation Missions

Yunzhao Liu

*National Key Laboratory of Aerospace Flight Dynamics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China, yzhliu@mail.nwpu.edu.cn*

Mingming Wang

*National Key Laboratory of Aerospace Flight Dynamics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; Research & Development Institute of Northwestern Polytechnical University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China, mwang@nwpu.edu.cn*

Jintao Li

*National Key Laboratory of Aerospace Flight Dynamics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*

Chuankai Liu

*Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# A Distributed Simulation System for Space Operation Missions

## Abstract

**Abstract:** For the ground verification requirements of complex space operation missions such as noncooperative target capture, on-orbit maintenance, and in-space assembly, a distributed simulation system is developed, which mainly consists of a back-end simulation model, a front-end visual demonstration system, and a front-end main controller. In order to realize the multidisciplinary model coupling and interaction among different modeling tools or programming languages, the functional mock-up interface (FMI) standard is introduced for system integration, improving the modularity, generality, and portability of the system. To fully utilize computing resources and improve the simulation efficiency, simulation subsystems and modules are deployed in a distributed manner, and the data distribution service (DDS) communication mechanism is used to achieve efficient and reliable data interaction. A demonstration case of a dual-armed space robot capturing a non-cooperative target shows that the simulation system can simulate the whole process from long-range guidance to close operation in real time, with high fidelity.

## Keywords

simulation system, space operation, functional mock-up interface(FMI), spacecraft, on-orbit service

## Authors

Yunzhao Liu, Mingming Wang, Jintao Li, Chuankai Liu, and Jianjun Luo

## Recommended Citation

Liu Yunzhao, Wang Mingming, Li Jintao, et al. A Distributed Simulation System for Space Operation Missions[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(3): 533-544.

# 空间操作任务的分布式仿真系统

刘云昭<sup>1</sup>, 王明明<sup>1,2\*</sup>, 李劲涛<sup>1</sup>, 刘传凯<sup>3</sup>, 罗建军<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学 航天飞行动力学技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072; 2. 西北工业大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057;  
3. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

**摘要:** 针对非合作目标抓捕、在轨维护、空间装配等复杂空间操作任务的地面验证需求, 构建一套分布式仿真系统, 主要由后台仿真模型、前端视景演示系统和前端主控制器组成。为实现不同建模工具或编程语言之间的多学科模型耦合与交互, 引入FMI(*functional mock-up interface*)标准进行系统集成, 提高了系统的模块化程度、通用性与可移植性。为充分利用计算资源、提高仿真效率, 分布式部署仿真子系统与模块, 利用DDS(*data distribution service*)通信机制实现高效、可靠的数据交互。双臂空间机器人抓捕非合作目标的演示案例表明, 该仿真系统能够高保真模拟从远距离导引到近距离操作的全过程, 满足实时仿真的要求。

**关键词:** 仿真系统; 空间操作; FMI; 航天器; 在轨服务

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)03-0533-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1260

**引用格式:** 刘云昭, 王明明, 李劲涛, 等. 空间操作任务的分布式仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(3): 533-544.

**Reference format:** Liu Yunzhao, Wang Mingming, Li Jintao, et al. A Distributed Simulation System for Space Operation Missions[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(3): 533-544.

## A Distributed Simulation System for Space Operation Missions

Liu Yunzhao<sup>1</sup>, Wang Mingming<sup>1,2\*</sup>, Li Jintao<sup>1</sup>, Liu Chuankai<sup>3</sup>, Luo Jianjun<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory of Aerospace Flight Dynamics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2. Research & Development Institute of Northwestern Polytechnical University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China;  
3. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

**Abstract:** For the ground verification requirements of complex space operation missions such as non-cooperative target capture, on-orbit maintenance, and in-space assembly, a distributed simulation system is developed, which mainly consists of a back-end simulation model, a front-end visual demonstration system, and a front-end main controller. In order to realize the multidisciplinary model coupling and interaction among different modeling tools or programming languages, the *functional mock-up interface (FMI) standard* is introduced for system integration, improving the modularity, generality, and portability of the system. To fully utilize computing resources and improve the simulation efficiency, simulation subsystems and modules are deployed in a distributed manner, and the data distribution service (DDS) communication mechanism is used to achieve efficient and reliable data interaction. A demonstration case of a dual-armed space robot capturing a non-cooperative target shows that the simulation system can simulate the whole process from long-range guidance to close operation in real time, with high fidelity.

**Keywords:** simulation system; space operation; functional mock-up interface(FMI); spacecraft; on-orbit service

收稿日期: 2022-10-20 修回日期: 2022-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(61973256, U2013206)

第一作者: 刘云昭(1995-), 男, 博士生, 研究方向为航天飞行动力学与控制。E-mail: yzhliu@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者: 王明明(1983-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为空间机器人在轨操作。E-mail: mwang@nwpu.edu.cn

## 0 引言

20世纪90年代以来,航天飞机搭载宇航员执行的一系列哈勃望远镜在轨维护任务给世界留下了深刻印象<sup>[1]</sup>。随着空间操作技术水平的不断发展,在轨服务已经由人工操作步入了航天器自主操作的阶段。《2021中国的航天》白皮书<sup>[2]</sup>指出:“未来五年,我国将面向新技术工程化应用,开展航天器在轨服务与维护、空间碎片清除等新技术验证”。在开展工程试验前,地面数字仿真是检验任务设计指标、技术可行性必不可少的环节。为完成非合作目标抓捕、空间装配等涉及复杂空间操作的在轨服务任务,航天器系统设计日益复杂,仿真技术随之愈发受到研究人员的重视。

针对复杂仿真系统的建模与开发工作,相关机构已提供了一些技术和理论支持,如美国国防部提出的HLA(high level architecture)<sup>[3]</sup>以及欧空局提出的SMP(simulation model portability)<sup>[4]</sup>,但其在操作性、实用性、复用性或系统效率等方面有不同程度的欠缺。美国AGI公司开发的STK(satellite tool kit)、NASA与商业公司合作开发的GMAT(general mission analysis tool)虽然为开展航天任务仿真提供了便利工具,但目前均无法支持复杂空间操作过程的分析和实时仿真。围绕航空航天任务仿真系统的设计与开发,国内研究人员也开展了大量工作,文献[5]在Matlab下开发了交会对接数字仿真系统;文献[6]设计了基于DDS(data distribution service)通信机制的空间机器人遥操作实时仿真系统;文献[7]基于Unigine设计了舰载航空视景仿真系统;文献[8]利用Simulink搭建控制模型,利用Qt Quick设计人机交互界面,开发了某型飞翼布局飞行器的容错控制可视化仿真平台。上述仿真系统均面向特定任务或飞行器,在开始新的仿真任务前,往往需对接口和仿真场景进行较大适应性改造。考虑到非合作目标抓捕、在轨装配等空间操作任务流程复杂,涉及学科众多,在搭建系统模型时,各领域研究人员必然会采用大量不同的开发仿真工具。如额外定制各工

具间的交互接口,则会大幅增加仿真系统的设计成本和整体复杂度,降低系统的运行效率。为高效、便利地开展多领域交叉研究,模型的扩展通用性和可复用性成为仿真领域的一个重要研究课题<sup>[9]</sup>。2008年,Daimler AG联合欧洲的一些工具供应商、工业用户、科研机构,发起、组织了Modelisar项目。该项目推出的FMI(functional mock-up interface)标准解决了不同开发工具所导出模型的联合仿真难题,在仿真模型的封装性、信息存储以及对外接口的规范性方面带来了里程碑性的发展<sup>[10]</sup>,已在航空领域的仿真系统中得到了研究与应用<sup>[9,11-12]</sup>。

除了上述建模开发工作的困难,仿真结果的可靠性同样需要重点关注。航空航天领域内复杂系统固有的不确定性、强耦合性、自适应性以及复杂演化机理,使得精细的仿真模型仍然难以精确描述、预测系统行为。针对该问题,研究人员提出了平行仿真概念,其基本特征是实际系统与仿真系统平行演化,根据实际系统的状态更新仿真系统的模型和参数,从而矫正仿真系统状态,避免误差累积,提高仿真结果的可靠性<sup>[13]</sup>。平行仿真加强了实际系统与仿真系统的联系与互印证性,体现了虚实互动与融合的趋势,已在指挥控制、装备仿真和保障等军用领域得到了研究与应用<sup>[14-15]</sup>。对于未来复杂、高难度的空间操作任务,平行仿真实验亦将成为不可或缺的验证与辅助决策手段。

针对航天器空间操作任务,本文引入FMI标准,实现不同建模工具或编程语言间的多学科模型耦合、交互与集成,以建立后台仿真模型。分布式部署仿真子系统与模块,借助高效可靠的DDS通信机制达到实时仿真的目标。所开发的仿真系统预留与地面测控站连接的通信接口,以便后续开展天地平行仿真实验。

## 1 FMI标准简介

FMI标准的主要目标是满足多学科数字模型的联合仿真与重复使用需求,从而便利研究人员。

如图 1 所示, 不管模型采用何种工具开发, 在 FMI 标准约束下, 经适当封装即可实现系统集成与联合仿真, 并且封装后的模型能够在不同环境下应用, 当需要更改模型算法时无需关注接口实现。

随着计算机仿真行业的不断进步, FMI 标准的兼容性和扩展性取得了长足发展, 经过数次更新迭代已发展至 3.0 版本<sup>[16]</sup>, 并且涌现出很多相关的仿真工具, 工程领域常用的 Simulink, Dymola, AMESim, SimulationX, SCADE 等软件均支持直接导出或导入基于 FMI 标准的 FMU(functional mock-up unit)模型<sup>[17]</sup>。因此, FMI 标准受到了更广泛的关注, 成为很多研究工作的一项支撑技术。

为支持不同环境下的数据协同设计、仿真以及嵌入式开发, FMI 标准对仿真模型的基础功能封装接口进行了定义。符合 FMI 标准的模型称为 FMU, 是由原始开发工具导出的模型二次封装得到的, 本质上是一个数据压缩包, 包含以下文件:

- (1) DLL 文件, 包含 FMI 标准接口函数和模型本体(算法)信息;
- (2) XML 文件(模型描述文件), 包含模型的属性信息和变量信息;
- (3) 其他文件, 图片、文本、视频等辅助性

文件。

DLL、XML 文件是不可缺少的, 将 FMU 模型导入仿真工具后, 需通过解析 DLL、XML 文件获得模型接口的地址信息和模型变量信息, 从而进行仿真。其他文件可选择性添加, 有助于研究人员深入理解模型。

## 2 空间操作任务仿真系统

本文开发的空操作任务仿真系统旨在建立从远距离导引到近距离操作的全过程仿真模式, 覆盖空间操作任务的各关键环节; 以三维可视化和曲线图表组合的形式展示空间操作过程的状态信息, 为用户认知空间操作过程, 开展遥操作决策和采取辅助控制提供支撑; 并为用户管理控制仿真过程提供交互接口。

### 2.1 仿真场景

以非合作目标抓捕任务为例, 如图 2 所示, 服务航天器(一般指空间机器人及其卫星机动平台)的行为大致可分为以下 5 个阶段:

- (1) 远程导引。在地面、天基测控等条件的支持下, 服务航天器获取目标轨道信息, 卫星机动平台进行若干次霍曼或兰伯特变轨机动, 直至服务航天器的星载传感器能够捕获目标。

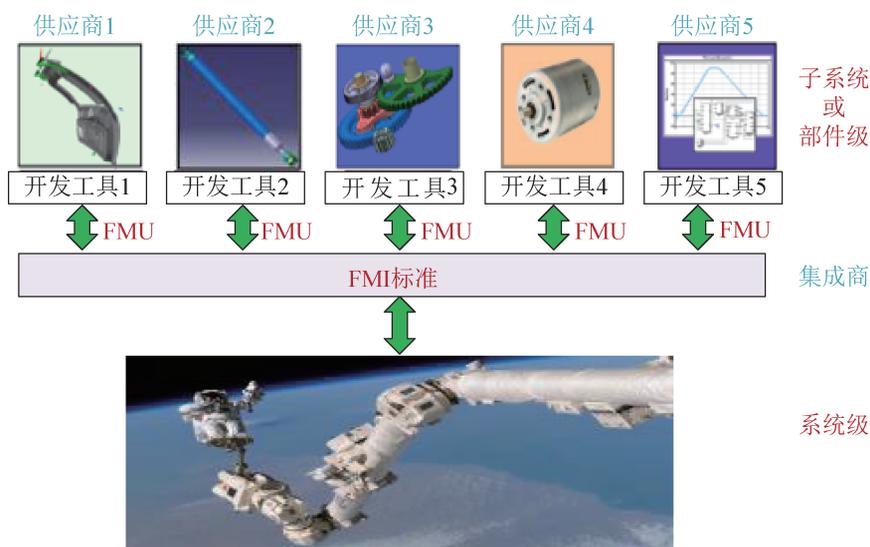


图 1 FMI 集成概念图

Fig. 1 Conceptual diagram of FMI integration

<http://www.china-simulation.com>

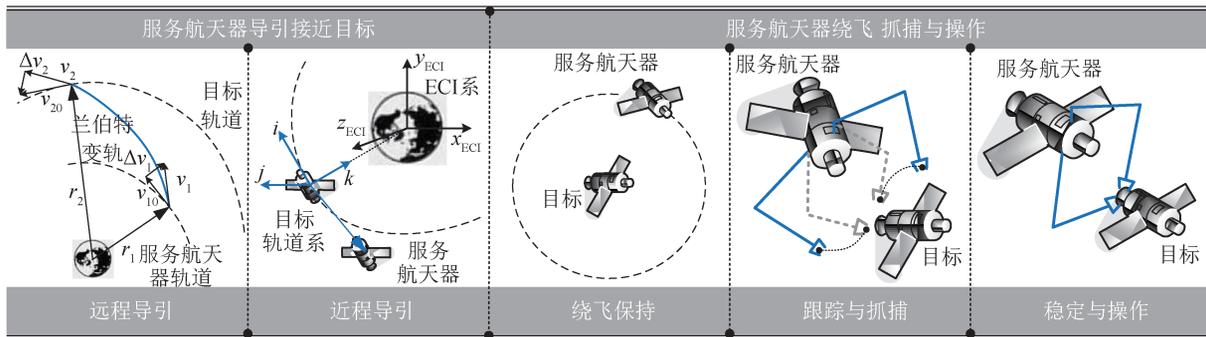


图2 空间非合作目标抓捕任务主要阶段示意图

Fig. 2 Main phases for non-cooperative target capture mission in space

(2) 近程导引。服务航天器依据星载敏感器测量得到的目标运动信息，采用C-W脉冲制导、准平行视线制导等方式进一步自主引导至目标附近。

(3) 绕飞保持。服务航天器在目标附近进行绕飞观测，将轨道调整至与目标轨道一致，瞄准目标并切换为定点保持模式，准备开展抓捕作业。

(4) 跟踪与抓捕。展开空间机器人(机械臂)关节并将其调整至最佳抓捕位姿，然后跟踪目标抓捕点，最小化目标抓捕点与空间机器人末端执行器的相对位置与相对速度。为确保成功跟踪，需设计跟踪控制器，使得末端执行器有足够时间来调节其姿态。

(5) 稳定与操作。末端执行器与目标抓捕点的相对距离减小至0后，末端执行器夹爪闭合。目标被捕获后会改变服务航天器的运动状态，因此需通过施加外力和扭矩，并同时调整机器人关节的内部扭矩，将目标-服务航天器组合体的角速度减小至0。实现组合体姿态稳定后，可控制空间机器人开展舱段对接、燃料加注、模块替换以及装配等进一步的空间操作行为。

目标抓捕前、抓捕后涉及的空间操作可由空间机器人自主执行，也可由地面人员进行辅助决策与控制<sup>[18]</sup>。本文开发的仿真系统能够模拟空间机器人自主操作流程，并为用户提供遥操作体验。

## 2.2 系统总体架构

为实现空间操作任务的系统仿真与可视化分析，本文所开发的仿真系统采用模型-视图-控制

器模式，主要由后台仿真模型(back-end simulation model, BSM)、前端视景演示系统(front-end visual system, FVS)以及前端主控制器(front-end master controller, FMC)三部分组成，如图3所示。为充分利用计算资源、提高仿真效率，FMC与FVS在上位机平台运行，BSM所包含模块在不同平台开发并封装为FMU，在各自平台运行。建立上位机、各仿真平台间的通信机制，构成分布式仿真系统，实现不同平台的联合仿真。

BSM是整个仿真系统的核心，主要包括航天器运动仿真系统与空间态势仿真系统，负责向FVS和FMC发送仿真数据。航天器运动仿真系统由任务规划、运动规划、跟踪控制、动力学等模块构成，共同实现服务航天器运动、操作行为的模拟。

(1) 任务规划模块。对卫星平台、空间机器人以及传感器等载荷的具体任务、工作模式进行总体规划与分析。

(2) 运动规划模块。根据目标运动信息、空间机器人工作模式和测量数据，生成平台机动轨迹与机械臂操作轨迹，支持自主操作与遥操作两种模式。

(3) 跟踪控制模块。根据规划结果控制平台与机械臂的运动过程，从而完成空间操作任务。

(4) 动力学模块。提供卫星平台与空间机器人的高精度动力学模型、多体碰撞动力学模型和捕获目标后的消旋动力学模型，以支撑不同拓扑构型、工作模式下的动力学快速计算。

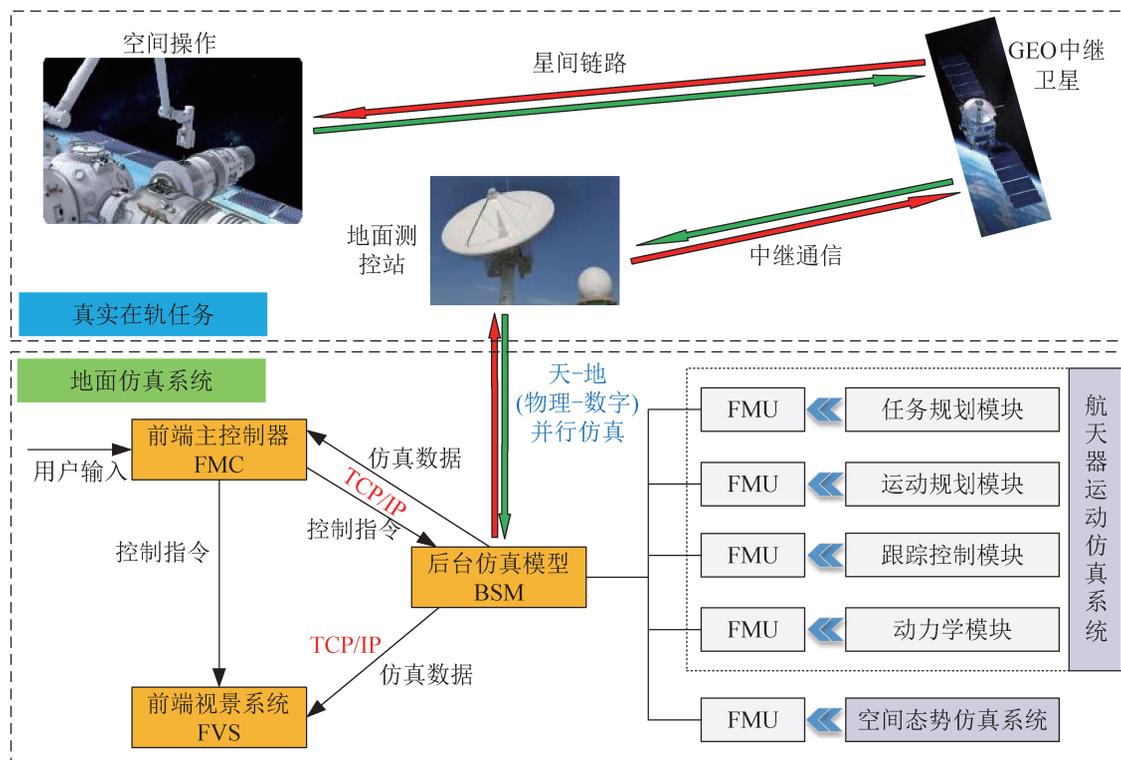


图3 空间操作任务仿真系统架构图  
Fig. 3 Architecture of simulation system for space operation missions

空间态势仿真系统具备空间操作任务的状态衍生分析功能, 包括目标外形及运动状态测量、相对轨迹计算、安全区及其衍生分析等。仿真过程中根据需要实时计算太阳、月球等天体以及目标的位置, 并将结果发送给航天器运动仿真系统和FVS。

BSM搭建过程中, 对于耦合度较高、仿真周期和运行速率接近的模块(如跟踪控制模块与动力学模块), 设计复杂度接近的求解算法, 以提高模型间的粒度匹配性。在仿真平台反复测试并迭代改进求解算法, 最终达到实时仿真的目标。

FMC即任务管理系统, 直接面向用户, 负责加载、配置、启动、控制仿真过程, 处理用户指令, 调度BSM和FVS运行。FMC界面如图4所示, 包括模型信息、通信状态监测、态势监测、指令窗口、状态窗口、参数空间等区域。通过工具栏的各选项卡, 用户可以更改仿真速度、主动/手控(遥操作)模式、FVS视角等设置。态势监测区

以曲线和数据表形式向用户反馈服务航天器运行轨道、相对目标位置变化等基本状态信息。

FVS接收FMC的指令和BSM的数据, 核心任务是以三维仿真场景和二维曲线图表等形式高保真呈现空间操作过程的相关状态信息, 主要包括目标外形与位姿、目标翻滚轨迹、服务航天器绕飞路线与悬停位置、抓捕点位与抓捕轨迹、抓捕接管和碰撞过程的扰动分析结果等。在此基础上, FVS能够展示空间态势仿真系统的状态预测结果, 评估后续操作的合理性、安全性和抗扰性, 以使用户基于预测和评估结果对飞行与操作阶段转换、抓捕实施等关键过程进行辅助决策。

如图3所示, 本文所开发的仿真系统可通过网络通信模块与地面测控站连接, 接收在轨航天器的运行数据作为仿真条件, 从而开展天地平行仿真实验。该仿真系统还具备访问物理实验平台实时数据的接口, 以便进行硬件在环仿真。

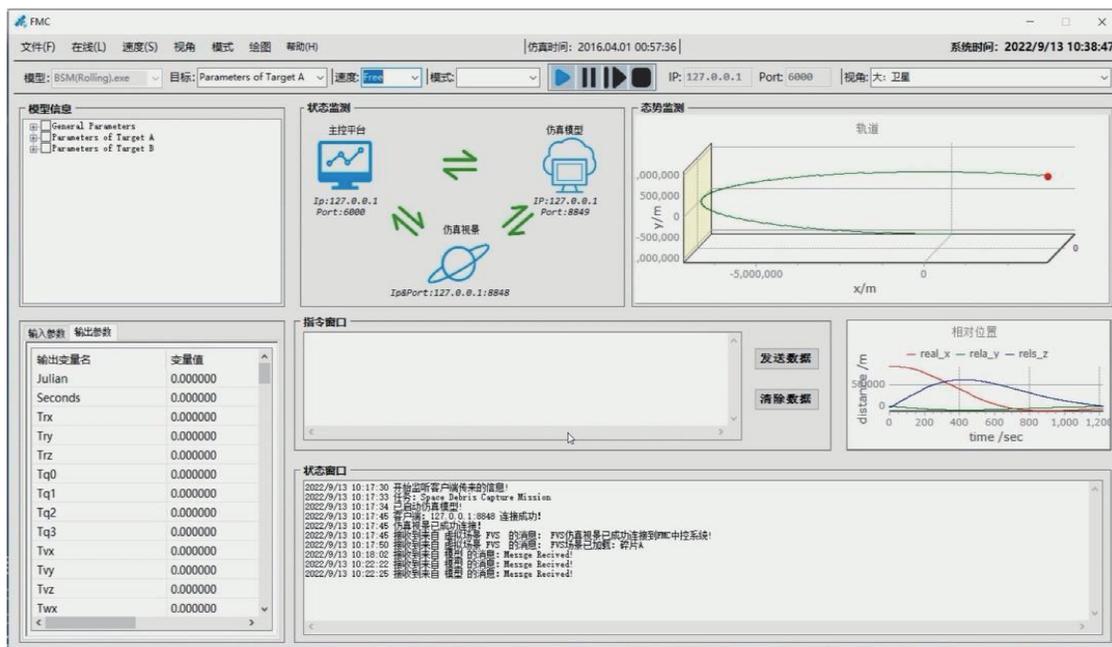


图 4 前端主控制器用户界面

Fig. 4 User interface of front-end main controller

## 2.3 开发环境

本文仿真系统所涉及的开发环境如图 5 所示。BSM 在 Simulink/Matlab/Python/Stateflow/C/C++ 等环境下基于 FMI 标准开发，各功能实现均采用模块化设计思想。Simulink 用于构建 BSM 的主体框架；Matlab/Python 主要用于处理参数化设置与传递；Stateflow 提供控制逻辑工具，通过有限状态机管理仿真系统的内部模式，相关算法、功能均以 FMU 的形式在仿真平台上运行，各 FMU 的顶层调度算法基于 C/C++ 编写。FVS 采用 Unity 3D 实现，任务要素的三维模型基于 CAD/Solidworks 等软件开发。FMC 的人机交互界面基于 C/C# 语言设计。

## 2.4 模型接口与通信机制

围绕空间操作任务，目前已开发了多种类型的载荷，如机械臂、夹爪、网、系绳等，需设计通用接口来定制各类 3D 模型，以便通过配置映射文件展示各种航天器结构及其操作机制。根据 FMI 标准，在 XML 文件中定义航天器 3D 模型、操作机制与 FMU 输出间的关系，形成模型通用接口<sup>[19]</sup>，以进一步建立通信机制。

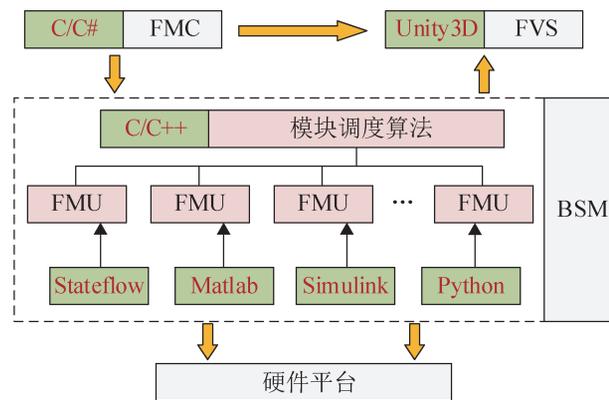


图 5 开发环境示意图

Fig. 5 Development environments

为实现实时分布式仿真，在 TCP/IP 协议的基础上引入 DDS 标准，建立不同仿真平台间的通信机制。DDS 中间件是一个软件层，位于操作系统与应用程序之间，支持多种编程语言及底层协议。DDS 通信可实现多对多单向数据交换，其核心是以数据为中心的发布-订阅模型 DCPS (data-centric publish-subscribe)，由 Domain、Topic、DataWriter、DataReader、Publisher、Subscriber 等实体组成。Publisher、Subscriber 为发布、接收数据的应用程序，DataReader、Publisher 为相应的缓存区。

Domain 代表一个通信平面, 由 Domain ID 唯一标识, 只有同一 Domain 内的实体才可通信。Subscriber、Publisher 通过 Topic 进行匹配, Topic 是明确的标识符, 将 Domain ID、数据类型和一组服务质量(quality of service, QoS)策略相关联。

QoS 策略是一种网络安全机制, 用以监管数据流传输, 解决网络延迟和阻塞等问题。QoS 可理解为 Publisher 与 Subscriber 间的“合约”, 收发双方的 QoS 策略相互兼容才能建立通信, 如图 6 所示。更具体地, QoS 通过定义一系列配置参数来满足实时仿真对于传输效率、带宽、线程和容错操作等方面的特定要求。DDS 根据 QoS 策略管理和优化在网络中传输的数据流, 控制数据在应用间分配的方式、时间等许多方面。为每个 DDS 实体或通信节点配置 QoS 策略是 DDS 的重要特征。通过定义灵活的 QoS 策略, 能够实现分布式系统高效、可靠的数据交互。

### 2.5 联合仿真调度

本文所开发系统的分布式联合仿真框架如图 7 所示, FMU 的模型本体与求解算法, 即 DLL 文件

部署于不同仿真平台; 图 7 中的 FMU 接口主要涉及 XML 文件中的接口地址信息和模型变量信息, 上位机依据 FMU 接口的地址信息与不同仿真平台建立 DDS 通信, 客户端与服务器即为 2.4 节所述 Publisher、Subscriber 等实体。仿真运行时, 模型求解在原始开发仿真软件中进行, 主控软件承担固定节点上模型数据交换的调度分配工作, 需启用单独的进程, 其他仿真软件也需启用独立进程来进行模型解算, 不同软件之间不存在运行干扰。

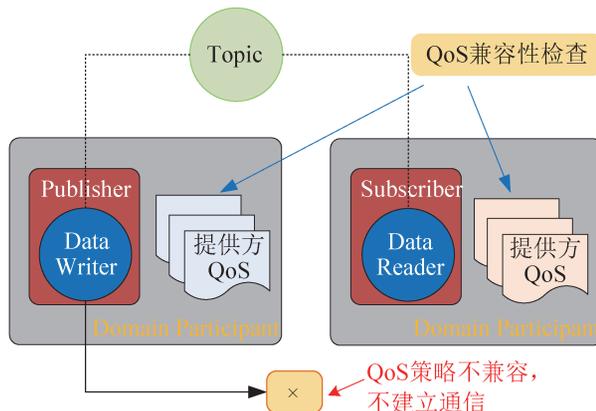


图 6 QoS 通信监管策略  
Fig. 6 QoS communication supervision strategy

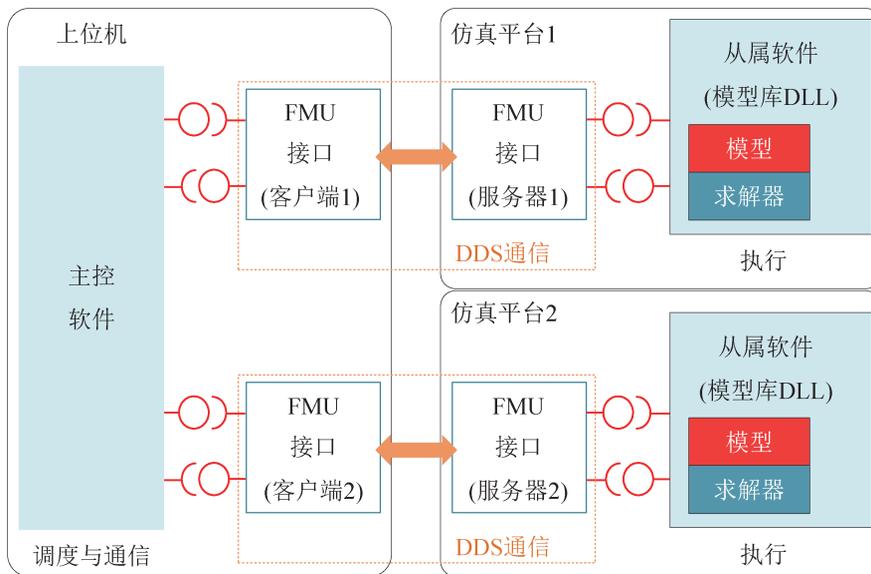


图 7 基于 FMU 的分布式联合仿真框架  
Fig. 7 Distributed co-simulation framework based on FMU

航天器空间操作任务仿真涉及的 FMU 模块众多, 为提高仿真效率和模型间粒度匹配性, 将耦合度较高、仿真周期和运行速率接近的模块(如跟踪控制模块与动力学模块)分配至同一仿真节点。针对具体的仿真节点, 分析其下不同 FMU 模型间的输入-输出关系与优先级, 描述为拓扑结构并进行简化处理, 综合考虑模块间的环路关系, 形成该节点下的调度算法。

在主控软件层面, 根据空间操作任务的整体流程统筹调度各仿真节点, 控制仿真过程的启动、结束、计时、任务拆分、线程资源分配、数据通信。考虑到航天器的基本功能模块相对固定, 采用静态调度机制, 即在仿真运行前分配仿真任务的计算节点与时间点, 以降低通信接口的设计难度, 提高仿真过程的可靠性与实时性。将上位机作为主控节点, 采用集中式调度机制, 形成客户端/服务器主从式仿真架构。

## 2.6 外部设备

为实现地面遥操作模拟, 可经由 FMC 为本文所开发仿真系统接入不同外部设备, 如图 8 所示的力反馈操纵杆“Touch X”(3D Systems 公司)与 3D 鼠标“SpaceMouse”(3Dconnexion 公司)。“Touch X”由一个六连杆组成, 具备六自由度输入与三自由度输出, 能够将用户的操控信息发送给计算机, 并根据实际需要解析为姿态、位置、速度等状态, 然后接收计算机发送的力反馈信息并更新其舵机力矩, 为用户提供真实、连续的触觉感受。“SpaceMouse”主体为一根摇杆, 主控板上有多个按键, 用户可根据需要设定按键功能。与“Touch X”类似, “SpaceMouse”能够将用户操控信号发送给计算机并根据需求解析为不同状态信息。用户可根据 FVS 反馈的信息(如机械臂与目标的相对位置)实时操控所接入的外设, 以切身体验遥操作。



图 8 “Touch X”与“SpaceMouse”  
Fig. 8 “Touch X” and “SpaceMouse”

## 3 空间抓捕任务演示案例

本节通过一个空间抓捕任务演示案例来展示、验证本文所开发仿真系统的功能, 利用七自由度冗余双臂机器人对废旧卫星、失效航天器和空间碎片等非合作目标进行在轨抵近抓捕, 仿真覆盖导引、抓捕以及接管控制全过程。

### 3.1 仿真模型 FMU 导出

针对该空间抓捕演示案例, BSM 模型的总体结构如图 9 所示, 基于 Simulink 实现 BSM 的核心功能模块。导出模型的 FMU 前, 首先在 Simulink 环境下设置起始时间, 并选择固定步长的求解器, 运行该模型校验底层算法。仿真结果的正确性得到验证后, 利用 Simulink 自带的“Export Model to Standalone FMU”功能快速导出模型的独立 FMU, 包含模型描述文件(XML)与库文件(DLL), 进而可通过上位机的主控软件部署至不同仿真平台(如图 7 所示), 导入支持 FMI 标准的不同仿真工具中运行。

### 3.2 任务流程与调度

为对各阶段任务进行自主规划与管理, 基于 Stateflow 设计有限状态机逻辑<sup>[20]</sup>, 如图 10 所示。在 2.1 节仿真场景的基础上设计各阶段、模式间的自主转移机制, 形成抓捕任务的决策调度方案。各阶段、模式间的转移由 BSM 根据接收到的指令、仿真时间或当前任务执行的效果评估决定。

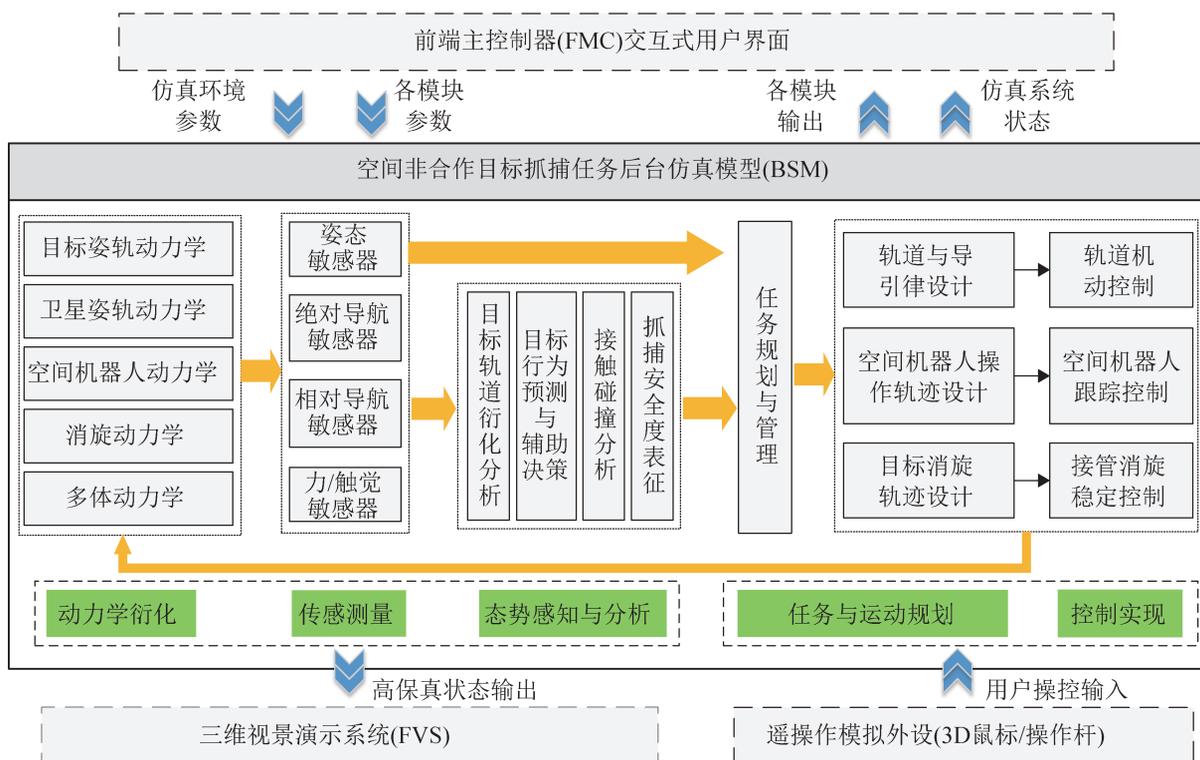


图9 空间抓捕任务的BSM模型总体结构图

Fig. 9 Overall structure of BSM model for space capture mission

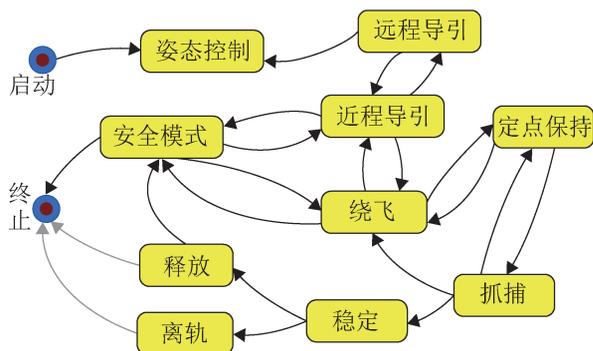


图10 基于Stateflow有限状态机的任务调度

Fig. 10 Mission scheduling based on Stateflow finite-state machine

启动空间抓捕案例演示后, 服务航天器调整姿态, 等待接收任务指令。接收到非合作目标抓捕任务后, 服务航天器先后经过远程导引、近程导引、绕飞等阶段, 将(相对目标的)位姿调整为期望状态。接收到进一步的抓捕指令后, 服务航天器执行机械臂展开、双臂协同决策、目标跟踪等一系列子任务, 实现机械臂末端执行器与目标抓捕点的相对位姿、速度匹配, 然后闭合末端执行

器的夹爪。夹爪闭合后, 服务航天器与目标形成闭环系统, 基于多体动力学模型规划目标的消旋轨迹并利用抓捕矩阵合理设计双臂运动, 从而实现对目标的消旋与稳定操控, 其后可进一步执行释放操作或离轨机动。在整个仿真过程中, 若发生危险情形(如即将碰撞), 服务航天器将进入安全模式并等待后续指令。

### 3.3 仿真结果

FVS 直观展示了服务航天器自主抓捕非合作目标的过程。通过切换视角, 可实现对自主抓捕过程的多视角观察与评估。如图 11 所示, 中央为全景视角, 左上方为地球轨道远视角, 右上方为机械臂近景视角。此外, FVS 可提供与 BSM 运行密切相关的状态信息, 如仿真历元、服务航天器与目标间的相对状态、机械臂状态等。图 12 为用户在手控模式下借助力反馈操纵杆“Touch X”与 3D 鼠标“SpaceMouse”进行遥操作模拟。

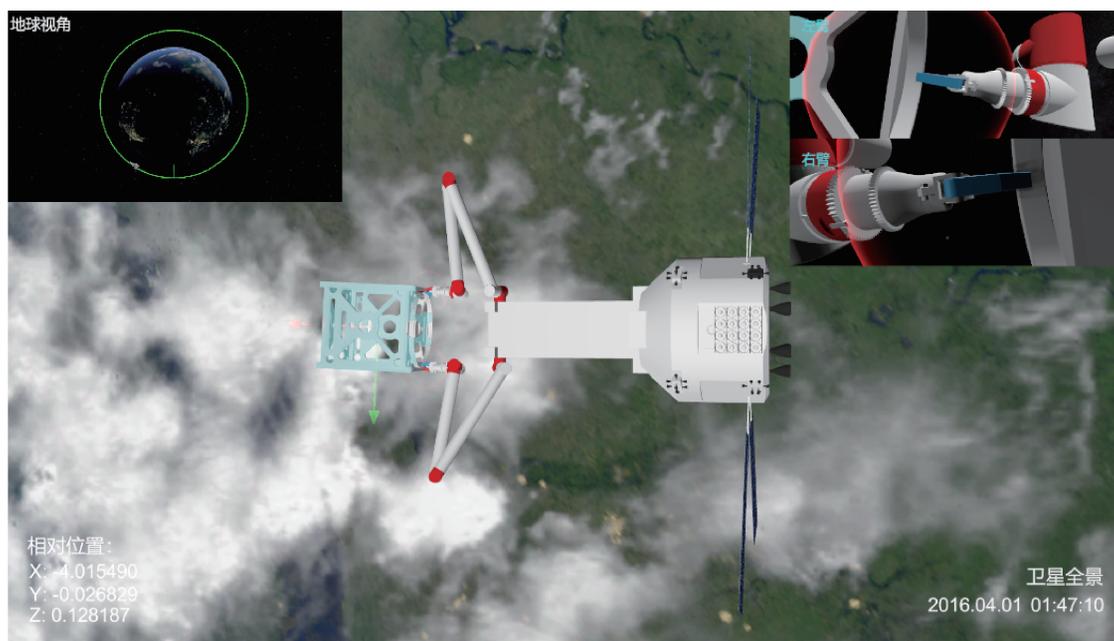


图 11 自主抓捕任务的全景视角  
Fig. 11 Overall view of autonomous capture mission

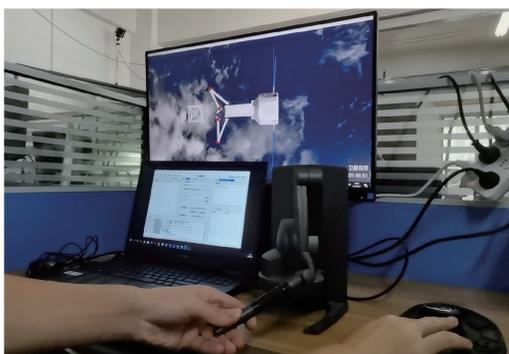


图 12 用户在手控模式下进行遥操作模拟  
Fig. 12 Tele-operation simulation in hand control mode

服务航天器自主作业过程中, 相对目标的位置(服务航天器质心在目标轨道坐标系下的描述)变化曲线如图 13~14 所示。从远程导引开始(服务航天器距目标约 100 km)至完成目标抓捕共经历约 6 430 s。远程导引段采用兰伯特变轨, 约 3 600 s 时开始近程导引段(服务航天器距目标约 3 km), 在 4 次脉冲推力(图 14 中  $r_z$  曲线的 4 个黑色方块标记处)作用下抵近目标。约 6 400 s 时开始展开机械臂, 执行抓捕动作, 抓捕过程中空间机器人左、

右臂的 7 个关节角变化曲线如图 15~16 所示。图 17 为该演示案例运行 5 次的平均计算耗时测试结果, 仿真步长设置为 10 ms, 可以看出, 每个仿真步长计算耗时的平均值约为 0.5 ms, 峰值约为 5.5 ms, 未超过仿真步长, 满足实时仿真平台的标准。通过在 FMC 调节仿真速度, 可以进行超实时仿真。

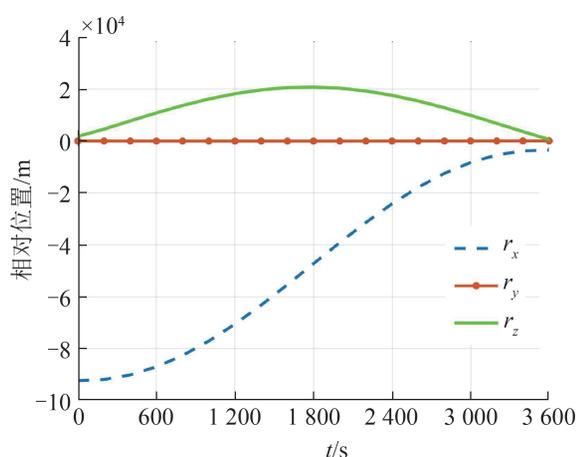


图 13 远程导引过程双星相对位置  
Fig. 13 Relative position during long-range guidance process

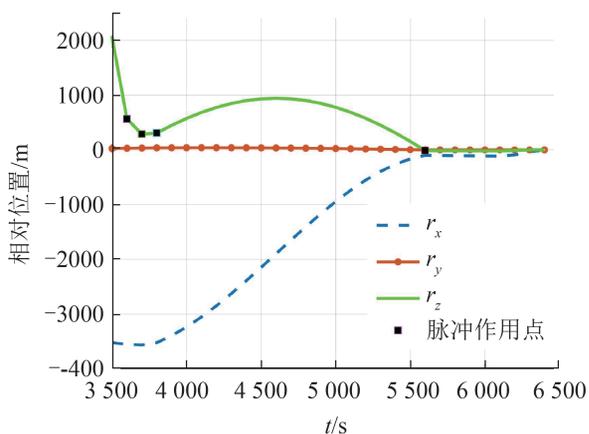


图 14 近程导引过程双星相对位置  
Fig. 14 Relative position during short-range guidance process

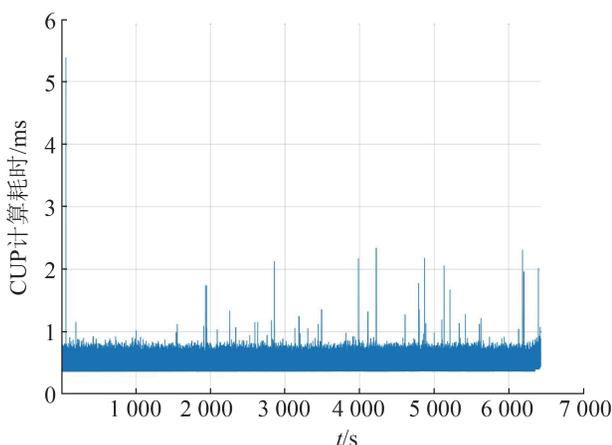


图 17 时间性能测试结果图  
Fig. 17 Time performance test results

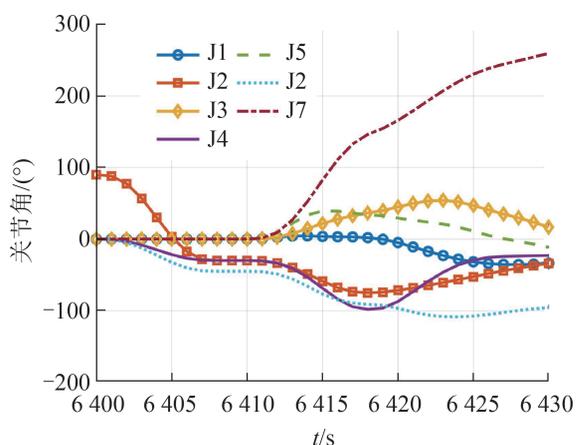


图 15 抓捕过程中机器人左臂的关节角  
Fig. 15 Joint angle of robot's left arm during capture process

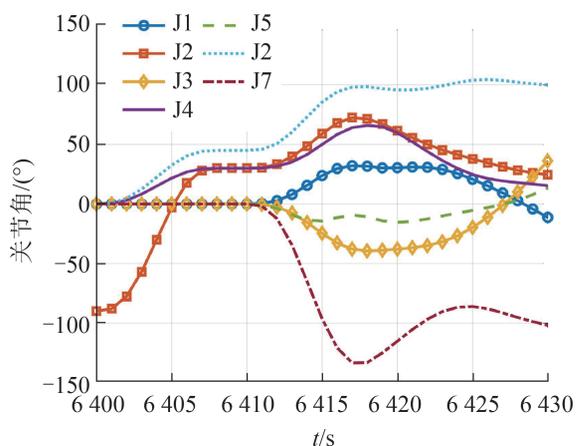


图 16 抓捕过程中机器人右臂的关节角  
Fig. 16 Joint angle of robot's right arm during capture process

## 4 结论

本文面向非合作目标抓捕、空间装配、在轨维护等航天工程任务的发展需求, 开发了一套航天器空间操作的分布式仿真系统。该系统基于 FMI 标准集成, 模块化程度高, 通用性、复用性、可移植性较强。通过分布式部署各功能模块并借助 DDS 通信机制, 充分利用了计算资源, 获得了较高的运行效率。空间抓捕演示案例表明, 该仿真系统能够全面、实时、高保真地模拟空间操作全过程, 为空间操作任务的设计与实施提供参考。未来将进一步搭建物理实验平台, 开展数字仿真系统与物理模拟系统、真实在轨系统的平行实验, 为空间操作任务提供可靠的验证平台。

## 参考文献:

- [1] Li Weijie, Cheng Dayi, Liu Xigang, et al. On-orbit Service (OOS) of Spacecraft: A Review of Engineering Developments[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2019, 108: 32-120.
- [2] 中华人民共和国国务院新闻办公室. «2021中国的航天»白皮书[EB/OL]. (2022-01-28) [2022-09-03]. [http://www.scio.gov.cn/gxzt/dtzt/2022/2021zgdhtbps/zw/202208/t20220802\\_292254.html](http://www.scio.gov.cn/gxzt/dtzt/2022/2021zgdhtbps/zw/202208/t20220802_292254.html).
- [3] Dahmann J S, Fujimoto R M, Weatherly R M. The DoD High Level Architecture[C]//Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. Washington, DC, USA: [s.n.], 1998: 797-804.
- [4] Nemeth S, Demarest P. Research and Development in

- Application of the Simulation Model Portability Standard [C]//SpaceOps 2010 Conference. Huntsville, Alabama: [s. n.], 2010: 2268.
- [5] 安昊, 屈桢深, 王常虹. 基于Matlab的交会对接全数字仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(6): 1227-1234.  
An Hao, Qu Zhenshen, Wang Changhong. Rendezvous and Docking Digital Simulation System Based on Matlab [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1227-1234.
- [6] Wang Mingming, Ulrich Walter, Luo Jianjun, et al. A DDS Based Real-time Simulation Architecture for Space Robotic Tele-operation[C]//64th International Astronautical Congress 2013. [S.l.]: [s.n.], 2013: 7912-7921.
- [7] 王远明, 卢宽, 贾倩, 等. 基于Unigine的舰载航空视景仿真技术研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(9): 2087-2092.  
Wang Yuanming, Lu Kuan, Jia Qian, et al. Research on Techniques of Shipboard Aviation Scene Simulation Based on Unigine[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(9): 2087-2092.
- [8] 张绍杰, 孟庆开. 飞翼布局飞行器容错控制可视化仿真平台开发[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(10): 3732-3738.  
Zhang Shaojie, Meng Qingkai. Design of Fault Tolerant Control Visual Simulation System for Flying Wing Aircrafts[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(10): 3732-3738.
- [9] 樊卿. 基于FMI的飞行器联合仿真技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.  
Fan Qing. Research of Aircraft Co-simulation Technology Based on FMI[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [10] Neema H, Gohl J, Lattmann Z, et al. Model-based Integration Platform for FMI Co-simulation and Heterogeneous Simulations of Cyber-physical Systems [C]//Proceedings of the 10th International Modelica Conference. Linköping: Linköping University Electronic Press, 2014: 235-245.
- [11] 王鸿亮, 廉东本, 徐久强. 基于FMI的分布式联合仿真技术研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(4): 256-261.  
Wang Hongliang, Lian Dongben, Xu Jiuqiang. Research on Distributed Co-simulation Based on FMI[J]. Computer Simulation, 2017, 34(4): 256-261.
- [12] 李伟林, 王雨峰, 赵宏卫, 等. 基于FMI的多电飞机用电设备多物理域建模[C]//第十七届中国CAE工程分析技术年会论文集. 海口: 中国力学学会产学研工作委会, 中国航空学会结构与强度分会, 中国塑料加工工业协会注塑制品专业委员会, 陕西省国防科技工业信息化协会, 2021: 219-224.
- [13] 段伟. 平行仿真的内涵、发展与应用[J]. 指挥与控制学报, 2019, 5(2): 82-86.  
Duan Wei. Parallel Simulation: Motivation, Concept and Application[J]. Journal of Command and Control, 2019, 5(2): 82-86.
- [14] 葛承堃, 朱元昌, 邸彦强, 等. 装备平行仿真技术的基础理论问题[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(5): 1169-1177.  
Ge Chenglong, Zhu Yuanchang, Di Yanqiang, et al. Basic Theoretical Issues of Equipment Parallel Simulation Technology[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(5): 1169-1177.
- [15] 孙宇祥, 周献中, 唐博建, 等. 智能指挥与控制系统发展路径与未来展望[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(11): 60-66.  
Sun Yuxiang, Zhou Xianzhong, Tang Bojian, et al. Research on Development Path and Future Prospect of Intelligent Command and Control System[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(11): 60-66.
- [16] Andreas Junghanns, Cláudio Gomes, Christian Schulze, et al. The Functional Mock-up Interface 3.0 - New Features Enabling New Applications[C]//Proceedings of 14th Modelica Conference 2021. Linköping: Linköping University Electronic Press, 2021: 17-26.
- [17] Broman D, Brooks C, Greenberg L, et al. Determinate Composition of FMUs for Co-simulation[C]//2013 Proceedings of the International Conference on Embedded Software (EMSOFT). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1-12.
- [18] 程瑞洲, 黄攀峰, 刘正雄, 等. 一种面向在轨服务的空间遥操作人机交互方法[J]. 宇航学报, 2021, 42(9): 1187-1196.  
Cheng Ruizhou, Huang Panfeng, Liu Zhengxiong, et al. A Human-Robot Interaction Method of On-orbit Service-Oriented Space Teleoperation[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(9): 1187-1196.
- [19] Yuan J, Yuan J P, Wang M M, et al. Digital Simulation Platform for Space Operations Mission Verification[C]//68th International Astronautical Congress. Adelaide, Australia: [s.n.], 2017: 730-735.
- [20] 杨胜, 王鑫哲, 李蒙. 基于有限状态机的交会对接飞行任务规划方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(9): 1741-1746.  
Yang Sheng, Wang Xinzhe, Li Meng. RVD Flight Mission Planning and Scheduling Method Based on Finite State Machine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(9): 1741-1746.