

引用格式: 李文皓, 张珩, 冯冠华. 复杂大时延的多主多从共享遥操作方法[J]. 航空学报, 2021, 42(1): 523896. LI W H, ZHANG H, FENG G H. Cooperative teleoperation for multi-master/multi-slave systems with large time-varying delays[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(1): 523896 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2020.23896

复杂大时延的多主多从共享遥操作方法

李文皓^{1,2}, 张珩^{1,2}, 冯冠华^{1,2,*}

1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190
2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049

摘要: 共享遥操作结合了遥操作和多机器人协调技术, 是重要的空间机器人复杂任务拓展和遥操作可靠性提升方式。首先, 在综述现有共享遥操作技术的基础上, 利用遥操作系统的超前预报特性, 提出机器人复杂大时延的共享遥操作方法, 给出了多操作员多机器人(MM/MS)复杂操作系统描述模型, 设计了分时树状分组策略并给出其使用的前提条件。提出了 MM/MS 组间共享遥操作方法、时延信息维护规则、操作请求判断和状态信息维护方法。然后, 给出了相应组内共享遥操作算法。最后, 以多操作员单机器人(MM/SS)共享遥操作为例, 给出了简化规则, 使用以某大型空间机械臂为对象的 MM/SS 遥操作系统进行了数字仿真实验。实验结果表明: 本文方法在 20 s 级不确定时延、操作端的交互时延与遥操作回路时延比为 0~1 等复杂条件下, 均可实施连续稳定的遥操作。

关键词: 空间机器人; 不确定大时延; 多操作员多机器人 (MM/MS); 共享遥操作; 分时树状分组

中图分类号: V476.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-6893(2021)01-523896-15

在实现空间机器人完全自主作业前, 遥操作仍是远程操控空间机器人的最重要方式之一^[1]。共享遥操作被认为是拓展空间复杂任务、提升空间机器人遥操作可靠性的有效手段^[2]。区别于单操作员单机器人 (Single-Master/Single-Slave, SM/SS) 遥操作的“共享模式”(遥操作员的操作指令与现场闭环的操作指令进行共享、分配和融合, 构成遥操作的融合指令), 共享遥操作是指遥操作员与遥操作员之间、遥操作决策者与遥操作决策者之间、远端现场机器人与机器人之间的共享, 是通过多个操作端和多个远端现场的闭环机器人、多个操作员与多个远端现场环境之间的共享^[3-4]。共享遥操作技术提升遥操作可靠性效用的原因有: ① 提供操作端的冗余和备份, 提高大系统运行的可靠性; ② 提供不同地域的远程在线

策划能力, 提高在线任务决策可靠性; ③ 提供遥操作人员间的集同决策和协同操作能力, 提升复杂系统复杂任务和多操作对象的协同操作可靠性。

时延环境是遥操作区别于现场操作的主要特点之一^[5]。在 SM/SS 遥操作中, 时延使操作员对现场情况的掌握以及操作意图在现场的实施滞后, 从而影响操作稳定性。对于共享遥操作, 特别是多操作员多机器人 (Multi-Master/Multi-Slave, MM/MS) 共享遥操作, 时延环境将带来若干新问题^[6-8]。① 复杂操作: MM/MS 共享遥操作中, 任一操作端进行操作时, 对本操作端的操作对象是改变其状态, 而对其他操作端是改变其操作对象所在的操作环境; 而且, 在没有主动交互的条件下, 本操作端几乎无法预报被非本操作端操

收稿日期: 2020-02-26; 修稿日期: 2020-03-09; 录用日期: 2020-04-13; 网络出版时间: 2020-05-06 15:09

网络出版地址: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20210114.html>

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA17030200); 国家重点基础研究发展计划 (2013CB733000); 国家自然科学基金 (11002143); 载人航天领域预先研究项目 (030601.030101)

* 通信作者. E-mail: guanhuafeng_86@163.com

控的对象行为,同时时延影响将延迟操作员对这一类环境变化的感知。② 复杂时延:各操作端处于异地时,时延存在于现场与各个操作端间(即遥操作回路时延,定义为上行时延 τ_u 和下行时延 τ_d 之和,即 $\tau_u + \tau_d$),同时也存在于操作端与操作端间(即共享交互时延,定义为 τ_c),在不确定时延环境下,操作端数量、各操作端的共享交互时延与遥操作回路时延的不同比值(定义时延比为 $R_c = \tau_c / (\tau_u + \tau_d)$)等复杂情况,给共享遥操作中的操作、协调和交互策略的制定与选择带来了挑战。③ 复杂系统:不同机器人对象的操作端设计差异性问题,会加剧共享协调操作策略的制定难度。

1 研究现状

自 20 世纪 90 年代,研究者们逐步完成了从传统的 SM/SS 到共享遥操作系统的研究。Goldberg 等^[9]于 1994 年研制了世界上第一个基于 Web 浏览器的遥操作系统,该系统允许多个在线用户同时查看状态图片信息,但单次仅允许一名用户操作机器人。Taylor 等^[10]于 1994 年以类似的方法建立基于 Web 浏览器的遥操作系统,第一次实现 6 自由度工业机器人的远程操作、抓取和搬运工作台上的物品。上述 2 个系统均受到时延和分时吞吐量的困扰^[11]。Kheddar 等^[12]于 1996 年首次完成了单个操作者通过一个虚拟环境,同时操作 4 个具有不同动力学性质、分布于 4 个位置(包括美国、法国和日本)的机械臂,执行相同的拼图任务,但未考虑时延问题。Xi 等^[13]于 1996 年提出了一种新型的基于事件智能控制方法和 Internet 多机器人协调遥操作建模方法,以解决 MM/MS 遥操作系统中的不确定时延问题。Ohba 等^[14]于 1999 年给出了影响 MM/MS 共享遥操作系统应用性能的几个关键约束,实验中通讯时延造成的从操作手运动的不确定性,他们通过改变从机器人在主操作手端显示时的厚度来弥补,但是牺牲了从操作手可进入的有效区域,使其运动空间受限,操作精度降低。Goldberg 等^[11]于 2000 年首次建立了基于 Internet 的多操作员单机器人(Multi-Master/Single-Slave, MM/SS)共享控制系统,研究了多操作员之间的协调和协作等控制问题。Chong 等^[15]于 2000 年研究了基于

Internet 的 MM/MS 协作技术,考虑了多机器人运动干涉的协调与合作控制问题;同年,他们首次研究了 MM/MS 共享遥操作系统中时延处理问题^[16],通过建立分布于两个实验室(日本的 MEL (Melbourne Robotics Laboratory) 和 TMSL (Toshiba Mechanical System Laboratory))间的双操作员双机器人实验平台,研究多机器人协作控制技术,提出了多种避免多机器人运动冲突的协调控制方法,并通过仿真实验验证了其有效性。在 Xi 等^[13]的工作基础上,Lo 等^[17]于 2004 年提出一种基于事件的分布式控制方法,用于基于 Internet 的实时力反馈异地 MM/MS 遥操作系统,以解决由于时延造成的系统不稳定性等问题,提高实时效率,最终通过位于中国内地、中国香港及美国三地的双操作员双机器人遥操作系统的多次实验,验证了提出方法的有效性及其性能。Siroouspour^[18]于 2005 年提出一种 MM/MS 遥操作多边控制系统框架,该架构包括了所有操作端和操作对象的力和位置信息流,同时引入了一种 μ 综合控制方法,用于保证多机器人之间和多操作员与环境动力学间的动力学交互鲁棒稳定性,最终通过实验验证了其有效性。Khademian 和 Hashtrudi-Zaad^[19]于 2007 年针对双操作员遥操作系统,提出了一种四通道多边共享控制结构,引入一个优势因子,使该控制结构可保证两个操作员和从端及其环境间的交互,调节操作员的控制权重,并给出/验证了多种性能指标,用于分析双操作员遥操作系统的透明性;于 2011 年^[20]针对双操作员遥操作系统,又提出了一种六通道多边共享控制结构,通过一个双操作员单机器人触觉模拟试验平台实现并测试了控制器;于 2013 年^[21]提出了一种鲁棒稳定性分析框架,用于多主多从遥操作系统的无条件稳定性分析,并在基于多边共享控制结构的双操作员遥操作系统上验证了该框架。Passenberg 等^[22]于 2010 年提出一种基于远端环境先验的模型介导 MM/MS 遥操作,在操作端渲染出远端环境的估计模型,替代传统的力/速度信息流的传输,同时理论分析了其鲁棒性和准确性,实验验证了实际效率。Panzirsch 等^[23]于 2015 年给出一个 MM/SS 多边触觉遥操作系统,通过虚拟抓取点的笛卡尔坐标系下的任务分配,简化其执行任务,引入时域无源性方法,

保证时延下系统的稳定性。2017年, Panzirsch等^[24]又提出一种触觉意图增强的控制方法, 每个操作者的力反馈会由于其他操作者的操作意图信息而增强, 通过国际空间站与地面两个地点的异地 MM/MS 遥操作, 验证了提出的协作机制对通信信道具有较强的鲁棒性, 但是操作意图增强方法对不同任务的通用性和适应性有待进一步分析研究。

国内西北工业大学的黄攀峰教授团队^[3,7,25]于2016年提出了一种面向空间遥操作的非对称双人共享控制方法, 建立了时延影响下的非对称双主单从共享控制系统模型, 仿真和实验表明非对称双人共享控制具有较好的透明性和抗时延影响特性; 于2017年提出了一种无力-力矩和加速度传感器双臂遥操作系统的预测控制方法, 在控制结构中建立了位置预测器和力预测器, 用于估计随机时延下的远端位置状态、接触力和动力学不确定项, 并提出了一种自适应模糊控制策略, 估计和抑制不确定项以保证系统位置的同步误差收敛到零, 估计力接近实际值, 最终借助半物理平台进行了试验验证; 于2018年提出了一种双臂协同遥操作共享控制方法, 方法结合四通道控制结构和共享控制, 通过主从端控制器中优势因子的引入与调节, 改变主端的控制权重, 主端可感受协作端的操作意图, 提高了操作精度和效率。哈尔滨工业大学的刘宏教授团队^[26-28]于2008年建立了卫星在轨自维护系统的地面遥操作平台, 远端为一个四自由度机器人和灵巧手的臂/手系统, 采用3D图形预测仿真技术和虚拟夹具法, 在大时延及变时延(约7s)条件下, 实现了武汉遥操作哈尔滨的自维护机器人臂/手系统, 成功地完成了打开太阳能帆板的典型卫星在轨维护任务; 于2018年建立了由双臂、双手、头部等构成的机器人航天员系统, 可实现机器人航天员的自主柔顺操作、航天员在轨或地面遥操作等控制, 进行了验证性演示和模拟维修试验, 并在天宫二号空间实验室部署了单臂手系统, 完成了多种人机协同在轨遥操作试验。哈尔滨工业大学的赵杰教授团队^[29-30]于2005年提出了“虚拟向导”概念, 解决了MM/MS遥操作任务执行过程中操作员操作意图不可预测的问题; 于2011年建立了基于虚拟环境的MM/MS协作遥操作系统, 研究了分

布式虚拟环境的一致性控制问题, 解决了遥操作系统一致性控制中的时钟同步、滞后时间、状态修复等问题。

从现有的国内外研究情况来看, 复杂大时延下的共享遥操作的理论和实验研究尚属于初步开展阶段, 研究成果还未形成系统性结论。考虑到空间复杂任务和复杂系统的应用, 未来遥操作必然由单对单向群体性发展。不同地、不同时、不同对象以及可扩展的群体操作特点, 要求随地(意味着不同时延)随时(意味着操作端不同数量)条件下的协同共享操作, 对复杂群体操作的协调、调度、动态构造规则提出了强烈需求。随着研究的深入, 在MM/MS共享遥操作技术中, 分布式的操作端如何准确获知其他操作端的操作意图是难以逾越的问题, 对共享操作端的控制和操作规则制定带来了难度, 多回路中不确定时延的复杂情况, 会使操作端间的共享数据交互准则更难设计, 为克服时延, 一个协调和判定分布式的各操作端操作有效性的中间服务节点可能必不可少。不确定大时延影响消减、主从端的跟踪性和透明性等均是(共享)遥操作系统设计时必须考虑的问题, 解决有限带宽与地面操作员对空间复杂动态环境认知需求之间的矛盾等仍是(共享)遥操作的研究热点, 目前的共享遥操作方法研究中, 尚未有效利用遥操作端的特有优势(相比于现场操作端, 遥操作端为克服时延会具备特有的超前预报技术), 而该特征有可能成为解决共享遥操作问题的钥匙。此外, 目前多数研究还是基于2个左右操作对象的共享遥操作, 或者多个遥操作节点操作同一个对象, 更大规模的操作对象集群、更多操作端的接入情况还有待进一步研究和突破。本文利用遥操作系统的超前预报特性, 提出一种机器人复杂大时延的共享遥操作方法。

2 系统描述

2.1 系统描述及分时树状分组策略

共享遥操作的机器人系统中, 处于不同地区的操作员协作遥控远端的一个或多个机器人来共同完成一项任务。多个操作端和多个操作对象连接到同一个通讯系统中, 在各遥操作端的超前预报技术的辅助下, 每个操作员通过操作端控制操

作对象,共同完成远端的复杂遥操作任务,操作端之间均存在复杂大时延和数据共享,且时延值可能不同;在不同的时间段,针对不同的遥操作任务,系统需主动在线管理和协调所有操作端和操作对象的操控关系,定义这样的系统为MM/MS共享遥操作系统,如图1所示。

具体地,处于地点 $i(i = 1, 2, \dots, m)$ 的地面操作端 $C_i(s)$ 和操作员 i 组成广义控制器 i ,同时,建立主动式中间服务节点,用于协调和判定各操作端的有效操作,提高各操作端间的共享数据交互功效,即中间服务节点主动管理和仲裁各操作端的操作状态,维护各操作对象的预报/实测状态信息;中间服务节点和所有操作端构成了地面遥操作系统群,操作端与操作端间、操作端与中间服务节点间均存在数据共享交互。现场控制器 $G_{c_j}(s)(j = 1, 2, \dots, n)$ 、空间机器人 $G_j(s)$ 和作业环境 j 共同构成广义被控对象 j 。

针对MM/MS共享遥操作系统的不同地、不同时、不同对象以及可扩展的群体操作特点,同时考虑其不确定大时延下的复杂群体操作协调、调度和动态构造等要求,由广义控制器分配空间遥操作任务,根据任务规划时段将任务划分为若干个子任务 $\omega(\omega = 1, 2, \dots)$,基于操作端与操作对象所需操控关系等,将系统群中的所有操作

端及操作对象进行分组,以便管理和协调异地的各操作端操作。针对每个时间段下的子任务 ω ,将所有操作端和操作对象划分为 $N(N \geq 1, \text{整数})$ 组,每个组内操作端和操作对象是所需的操控对应关系,本文分别定义这些组为SM/SS组(包含一个操作端及其对应操作的一个对象)、MM/SS组(包含多个操作端及其对应操作的一个对象)和单操作员多机器人(Single-Master/Multi-Slave, SM/MS)组(包含一个操作端及其对应操作的多个对象),如图2所示。

图2所示的分时树状分组策略:①分时,用于解决随时加入/退出操作的问题,使得在某一时间段,操作端的结构分布得以固化;②树状,即操作端的结构分布树,具体对应的是系统的分组及其对应关系信息矩阵 ζ ;③分组,将多对单、单对单、多对多、单对多的复杂结构转换为,总体多对多,组间均为单对单,同时组内含多对单、单对单、单对多的双层结构。通过分时树状分组,将不同地、不同时、不同对象以及可扩展的群体操作的复杂问题进行了条理化描述,以方便进一步对组间共享策略和组内共享操作进行研究。

分组及其对应关系信息矩阵 ζ 存储于中间服务节点,假设系统未划分前的分组信息矩阵为

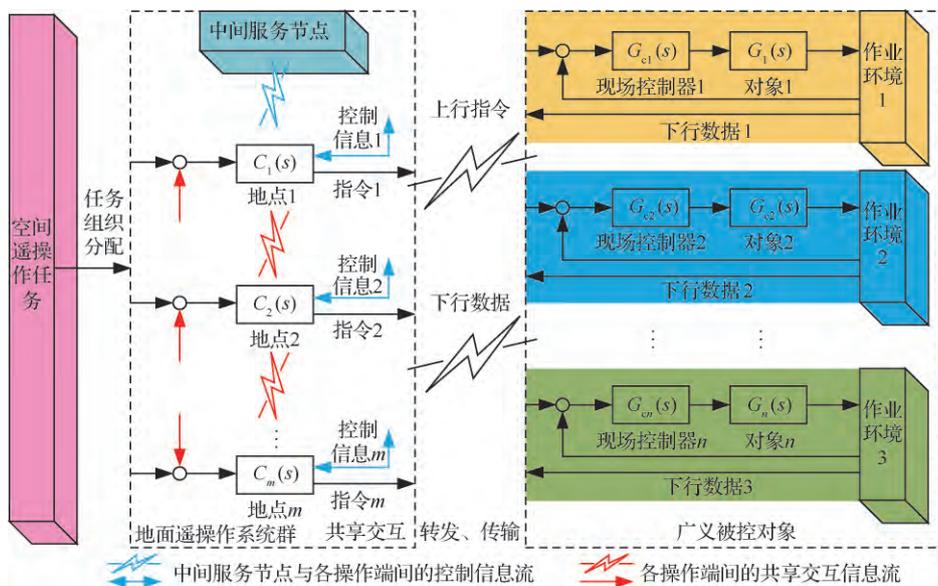


图1 MM/MS共享遥操作系统

Fig. 1 MM/MS cooperative teleoperation systems

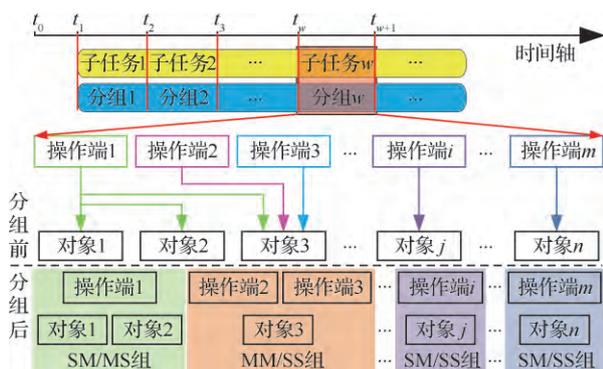


图2 MM/MS共享遥操作系统分时树状分组示意图

Fig. 2 Diagram of timesharing tree-like grouping for MM/MS cooperative teleoperation systems

$$\zeta = \zeta_m^m = [c_1, c_2, \dots, c_m, g_1, g_2, \dots, g_n] \quad (1)$$

式中: $c_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 和 $g_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 分别为操作端 i 和操作对象 j 。将系统内的 m 个操作端和 n 个操作对象划分为 N 个组, 包括 N_1 个 SM/SS 组 ζ_s^s 、 N_2 个 SM/MS 组 ζ_s^m 和 N_3 个 MM/SS 组 ζ_m^s , 且 $\sum_{i=1}^3 N_i = N (N_i \geq 1, \text{为整数})$ 。分组策略为

$$\begin{cases} \zeta_s^s = [c_i^{ss}, g_j^{ss}] \\ \zeta_s^m = [c_i^{sm}, g_{j_1}^{sm}, g_{j_2}^{sm}, \dots, g_{j_l}^{sm}] & 2 \leq l \leq n \\ \zeta_m^s = [c_{i_1}^{ms}, c_{i_2}^{ms}, \dots, c_{i_h}^{ms}, g_j^{ms}] & 2 \leq h \leq m \end{cases} \quad (2)$$

式中: 操作端和操作对象的分量有相同的上角标 ss (sm 或 ms), 用于表示他们的操作对应关系。分组后, 分组及其对应关系信息矩阵 ζ 由式(1)更新为

$$\zeta = [\underbrace{\zeta_s^s}_{N_1 \uparrow}, \dots, \underbrace{\zeta_s^m}_{N_2 \uparrow}, \dots, \underbrace{\zeta_m^s}_{N_3 \uparrow}] \quad (3)$$

如图2所示, t_0 为系统的基准时刻, 以时间段 $t_w \sim t_{w+1}$ 的子任务 w 为例, 针对子任务 w , 需要操作端1远程操控对象1、2和3, 操作端2和3远程操控对象3, 操作端 i 远程操控对象 j , 且操作端 m 远程操控对象 n 。中间服务节点将操作端1和对象1、2划分为一个 SM/MS 组; 将操作端2、3和对象3划分一个 MM/SS 组; 类似地, 将操作端 i 和对象 j 、操作端 m 和对象 n 均划分为 SM/SS 组。特别指出, 考虑到操作端1远程操控对象3时, 操作端2和3也需远程操控对象3, 因此, 此时仅将对象3划分到 MM/SS 组。

2.2 时延环境描述

在子任务 w 期间, 各操作端之间存在单向传

输时延 T_c , 各操作端与各操作对象间也存在单向交互时延, 包括上行时延 T_u 和下行时延 T_d ; 同时, 中间服务节点与各操作端之间也存在单向传输时延, 包括操作端到中间服务节点的时延 T'_u 和中间服务节点到操作端的时延 T'_d 。定义系统的时延信息矩阵为

$$T = [T_c, T_u, T'_u] \quad (4)$$

$$T_d = \begin{bmatrix} T_d^1 \\ T_d^2 \\ \vdots \\ T_d^i \\ \vdots \\ T_d^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1^d & \tau_1^d & \dots & \tau_1^d & \dots & \tau_1^d \\ \tau_2^d & \tau_2^d & \dots & \tau_2^d & \dots & \tau_2^d \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tau_i^d & \tau_i^d & \dots & \tau_i^d & \dots & \tau_i^d \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tau_m^d & \tau_m^d & \dots & \tau_m^d & \dots & \tau_m^d \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T'_d = [\tau^1, \tau^2, \dots, \tau^i, \dots, \tau^m]^T \quad (6)$$

式中: $\tau_i^d (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ 为操作端 i 操控空间对象 j 的下行时延; $\tau^i (i = 1, 2, \dots, m)$ 为中间服务节点到操作端 i 的传输时延, 且

$$T_c = \begin{bmatrix} T_c^1 \\ T_c^2 \\ \vdots \\ T_c^i \\ \vdots \\ T_c^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \tau_1^2 & \dots & \tau_1^i & \dots & \tau_1^m \\ \tau_2^1 & 0 & \dots & \tau_2^i & \dots & \tau_2^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tau_i^1 & \tau_i^2 & \dots & 0 & \dots & \tau_i^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tau_m^1 & \tau_m^2 & \dots & \tau_m^i & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$T_u = \begin{bmatrix} T_u^1 \\ T_u^2 \\ \vdots \\ T_u^i \\ \vdots \\ T_u^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1^u & \tau_1^u & \dots & \tau_1^u & \dots & \tau_1^u \\ \tau_2^u & \tau_2^u & \dots & \tau_2^u & \dots & \tau_2^u \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tau_i^u & \tau_i^u & \dots & \tau_i^u & \dots & \tau_i^u \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tau_m^u & \tau_m^u & \dots & \tau_m^u & \dots & \tau_m^u \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$T'_u = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_m]^T \quad (9)$$

式中: $\tau_i^k (i, k = 1, 2, \dots, m)$ 为操作端 i 到操作端 k 之间的共享交互时延; $\tau_i^j (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ 为操作端 i 操控空间对象 j 的上行时延; $\tau_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 为操作端 i 到中间服务节点的传输时延。

3 方法的假设条件

3.1 复杂大时延下的超前预报特性分析

超前预报是保证遥操作系统透明性的一种具

体化方法,其特性包含两方面:① 预报特性,借助等价动力学模型,任务操作过程中提供给操作员的预报运动状态,预报误差需有界,即 $\|Y - \hat{Y}\| \leq e_{\text{limit}}$,其中 Y 为真实对象的输出, \hat{Y} 为预测模型(等价动力学模型)的预测输出, e_{limit} 为误差限;② 超前特性,保证预报误差有界的同时,预报迭代需足够快,所需时间需远小于系统对序列指令的响应时长,二者共同构成超前预报特性。

当共享交互时延明显小于遥操作回路时延时,即 $(\tau_u + \tau_d) \geq \tau_c$,任何非操作中的操作端在远端实测状态到达前,均能提前接收到由操作中的操作端发出的即将执行的操作指令(即提前获取操作意图),因此共享操作端可根据该指令预报或加速向前预报,补偿交互时延的影响。

当共享交互时延与遥操作回路时延相当时,即 $(\tau_u + \tau_d) \approx \tau_c$,此时不能保证实测状态到达前,收到当前操作端发来的操作指令,但是由于遥操作指令能够提前预知,通过有效的上行时延影响应对机制或者加速向前预报等方式,可一定程度上降低时延影响。

当共享交互时延明显大于或远大于遥操作回路时延时,即 $(\tau_u + \tau_d) \leq \tau_c$,此时如果继续采用共享遥操作,将以操作连续性为代价,共享操作将会退化为半离线化的操作-等待-操作,严重影响遥操作的时效性,极大地降低遥操作对空间任务的适应性。

3.2 共享遥操作的前提条件

在子任务 w 期间,为充分发挥超前预报性能,复杂大时延的共享遥操作需具备如下前提条件。

1) 时间同步。共享操作端间、各操作端与对象间、各操作端与中间服务节点间有相同的时标基准,以此为基础建立时标轴。

2) 时延估计。定时测定并更新各操作端与远端对象、中间服务节点的回路时延值,各操作端与其他操作端间的共享交互时延值。

3) 各操作端具备加速仿真和模拟能力。各操作端具备在时标驱动下,不同模式切换中的加速仿真和模拟能力。

4) 时标信息的充分性。时间同步或基准时标可通过在各操作端的上行指令和各操作对象的

下行数据中填充时标来实现,至少包括:上行指令的期望执行时标 t_e 、上行指令发送时标 t_s 、上行指令对应的接收时标 t_r 、对应序号上行指令的执行时标 t_E 及其完成并稳定时标 t'_E 。

5) 操作端能力需求。每个组内各操作端至少有组内对象的预报模型和其他组对象的状态监测模型,至少能对组内的对象进行操作,可不具备干预其他组对象的操作能力。

6) 跟踪性和透明性。系统集群中的单个遥操作系统具有较好的主从端跟踪性和透明性。

4 组间共享遥操作方法

在子任务 w 期间,按照 2.1 节所述方法对系统内所有操作端和操作对象分时树状分组,由式(3)可知,分组后可能包括多个 SM/SS 组、SM/MS 组或 MM/SS 组,组与组间、组内的操作端与操作端间均存在操作数据共享交互,因此需要分别针对组间及组内给出相应共享遥操作方法。本节将给出组间共享遥操作方法。

组间共享遥操作通过中间服务节点实现,中间服务节点不断处理来自各组的遥操作请求,及时发送允许遥操作的权限信息,同时实时维护并更新组的状态信息。因此,中间服务节点本地针对每个组 $i(i = 1, 2, \dots, N)$ 设置用于存储操作端操控请求序列的遥操作请求集合 δ_i 和用于存储操作对象的状态信息集合 σ_i ,状态信息包括:操作对象的预报状态信息和实测状态信息、操作端及其操作对象的操控状态(操作中/未操作)。

在子任务 w 开始前,以任意操作对象的时钟作为系统的基准时刻 t_0 ,对各组间、组内、各组与中间服务节点间进行时间同步,并持续地保持时间同步。

如图 3 所示,介入组 $i(i = 1, 2, \dots, N)$ 的操作前,向中间服务节点发送操作申请,由中间服务节点确定为有效操作申请后,更新中间服务节点处的遥操作请求集合 δ_i ,同时该组接收来自中间服务节点的状态信息数据,组内对应的操作端完成在线环境模型重载,并根据重载的环境模型和预期的操作任务,生成相应的带有期望执行时刻的操作指令序列 $c_i(t_e)$,发送至组 i 的对象;发出指令序列的同时,启动预报模型,对本指令序列下的对象运动状态进行加速预报,将预报的带有对

应时刻(开始时刻为指令的发出时刻 t_s , 结束时刻为指令完成并稳定的时刻 t'_E)的预报状态信息数据发送至中间服务节点处的状态信息集合 σ_i 。组 i 产生的操作指令为

$$c_i(t_e) = [c_i, t_i] \quad (10)$$

式中: t_e 为该指令的期望执行时间; c_i 为指令内容; t_i 为该指令的时标矩阵。且

$$t_i = [t_e, t_s, t_r, t_E, t'_E] \quad (11)$$

式中: t_s 为指令的实际发送时刻; t_r 为该指令的接收时刻; t_E 为该指令的实际执行时刻; t'_E 为该完成并稳定的时刻。 t_r 、 t_E 和 t'_E 由组 i 的操作对象接收时赋值。期望执行时间 t_e 设定方法为

$$t_e = t_0 + \Delta t_i^o + \tau_T \quad (12)$$

式中: $t_0 + \Delta t_i^o (i = 1, 2, \dots, m)$ 为指令预计发送时刻; τ_T 为组 i 的操作端本地设定的时延阈值, 且 $\tau_T \geq \tau_i^{oj}$ (对上行时延 τ_i^{oj} 进行预先估计, 例如可使用文献[31]的方法估计时延)。

中间服务节点接收到被操作对象的现场实测状态信息数据时, 将预报状态信息数据替换为同时刻的实测状态信息数据, 组 i 以新模型加速预报至 t'_E , 用最新预报数据替换先前的预报状态信息数据, 重复该过程。当本指令序列执行完成并稳定, 且实测状态数据接收完成后, 如果还需继续操作, 则重复上述过程。如果结束操作, 则发送申请将中间服务节点的组 i 的操控状态置为未操作。

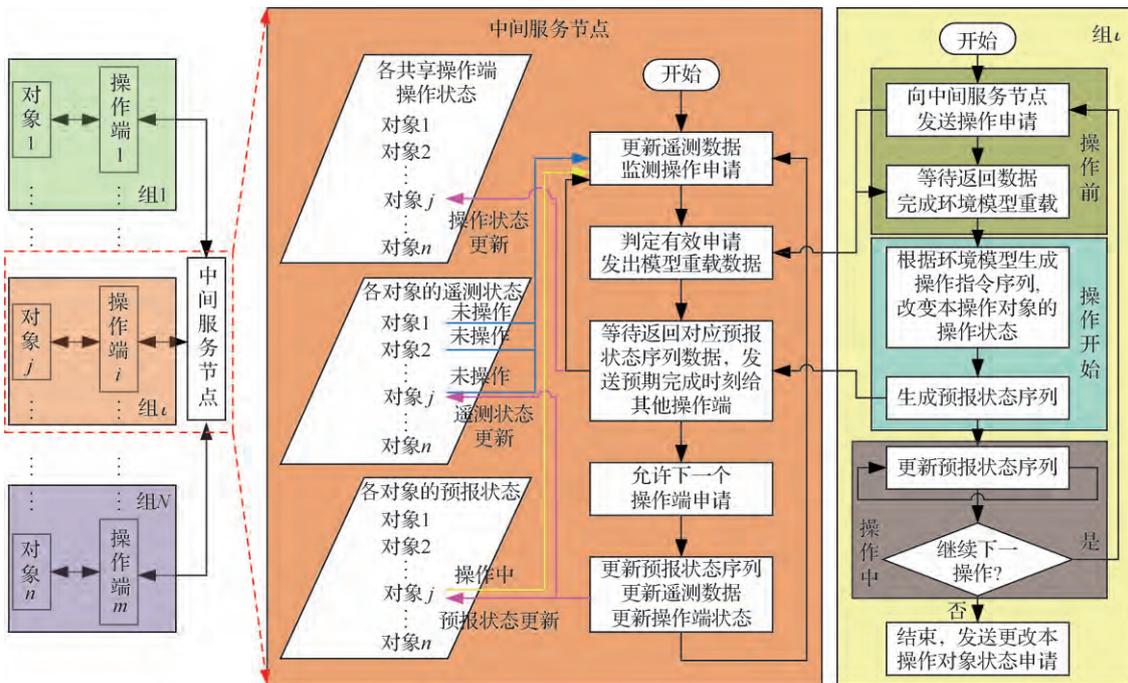


图3 MM/MS异地共享遥操作架构及流程示意图

Fig. 3 Architecture and procedure of MM/MS cooperative teleoperation at different locations

4.1 时延信息维护规则

定时检测并更新中间服务节点与各操作端之间的单向传输时延 T_d^i , 即式(6)。基于基准时刻 t_0 , 定时地由中间服务节点向系统的 m 个操作端分别发送带有时间戳即发出时刻 $t_0 + \Delta t_0^o (o = 1, 2, \dots, m)$ 的检测报文, 在任意操作端接收到检测报文时, 对检测报文设置时间戳即接收时刻 $t_0 + \Delta t_0^o + \Delta t^i (i = o = 1, 2, \dots, m)$, 并将该检测报文

返回中间服务节点。基于时间戳, 中间服务节点可获取最新的单向传输时延值, 用于更新 T_d^i 各分量 τ^i , 更新规则为

$$\tau^i = \begin{cases} \tau^i & \tau^i \geq \Delta t^i \\ \Delta t^i & \tau^i < \Delta t^i \end{cases} \quad (13)$$

此外, 定时检测并更新操作端 i 本地存储的单向传输时延。如式(4)所示, 获取时延信息矩阵 T 后, 操作端 $i (i = 1, 2, \dots, m)$ 本地存储单向传输时延信息矩阵 T_i , 即

$$T_i = [T_c^i, T_u^i, \tau_i] = [\tau_i^1, \tau_i^2, \dots, 0, \tau_i^{i+1}, \dots, \tau_i^m, \tau_i^{u_1}, \tau_i^{u_2}, \dots, \tau_i^{u_n}, \tau_i] \quad (14)$$

同理,定时更新 T_i 时,由操作端 i 定时向其他 $m-1$ 个操作端及 n 个操作对象分别发送带有时间戳即发出时刻 $t_0 + \Delta t_0^k (k \neq i, k = 1, 2, \dots, m)$ 及 $t_0 + \Delta t_0^j (j = 1, 2, \dots, n)$ 的检测报文,在任意操作端及操作对象接收到检测报文时,对检测报文设置时间戳,即接收时刻 $t_0 + \Delta t_0^k + \Delta t_i^k$ 及 $t_0 + \Delta t_0^j + \Delta t_i^j$,并将该检测报文返回操作端 i 。基于时间戳,操作端 i 可获取最新的单向传输时延值,用于更新 T_i 各分量 τ_i^k 和 τ_i^j ,更新规则为

$$\tau_i^k = \begin{cases} \tau_i^k & \tau_i^k \geq \Delta t_i^k \\ \Delta t_i^k & \tau_i^k < \Delta t_i^k \end{cases} \quad (15)$$

$$\tau_i^j = \begin{cases} \tau_i^j & \tau_i^j \geq \Delta \tau_i^j \\ \Delta \tau_i^j & \tau_i^j < \Delta \tau_i^j \end{cases} \quad (16)$$

4.2 操作请求判断和状态信息维护方法

基于分组策略式(2)和分组信息式(3),定义系统的操作端及其操作对象操控状态信息 ζ 为

$$\zeta = [\underbrace{\zeta_s^1, \dots, \zeta_s^m}_{N_1 \uparrow}, \underbrace{\zeta_s^{m+1}, \dots, \zeta_s^{m+n}}_{N_2 \uparrow}, \underbrace{\zeta_m^1, \dots, \zeta_m^n}_{N_3 \uparrow}] \quad (17)$$

式中: $\sum_{i=1}^3 N_i = N (N_i \geq 1, \text{为整数})$, 遥操作系统初始时 $\zeta = \mathbf{0}_{1 \times N}$; ζ_s^i 为 SM/SS 组的操控状态信息矩阵; ζ_m^i 为 SM/MS 组的操控状态信息矩阵; ζ_m^i 为 MM/SS 组的操控状态信息矩阵,且

$$\begin{cases} \zeta_s^i = [o_{i,1}^{ss}, v_{i,1}^{ss}] \\ \zeta_m^l = [o_{i,1}^{sm}, v_{i,1}^{sm}, \dots, v_{i,l}^{sm}] & 2 \leq l \leq n \\ \zeta_m^h = [o_{i,1}^{ms}, \dots, o_{i,h}^{ms}, v_{i,h}^{ms}] & 2 \leq h \leq m \end{cases} \quad (18)$$

式中:

$$o_{i,r}^r, v_{i,r}^r = \begin{cases} 1 & \text{(被) 操作中} \\ 0 & \text{未(被) 操作} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $o_{i,r}^r, v_{i,r}^r (r = ss, sm \text{ 或 } ms)$ 表示具备对应操作关系的操作端和操作对象状态值应同时取值。

以组 i 为例,其 δ_i 中的所有请求按照中间服务节点接收到的时刻顺序形成序列,从 δ_i 中获取具有最早接收时刻的请求,根据当前时刻的操控状态信息式(17),判断组中各对象状态,确定请求的对象处于未操作的状态后,发送允许遥操作的权限信息给对应的操作端,将对应的 $o_{i,r}^r, v_{i,r}^r$ 按式(19)进行取值,即更新式(17),同时向该操作端发送其他所有组的对象状态信息,构建其他各对

象的在线状态。

5 组内共享遥操作方法

SM/SS 组或 SM/MS 组均只包含一个操作端,因此在整个子任务执行过程中,任意时间段的操作均是单个操作端操作单个对象,因此 SM/SS 组和 SM/MS 组内不存在共享操作。

MM/SS 组需指定组内的主操作端,其余操作端为辅助/观测操作端(观测操作端不参与操作对象的操控)。主操作端的遥操作请求直接向中间服务节点发送,而辅操作端的遥操作请求需首先发送至主操作端,再由主操作端发送至中间服务节点。

5.1 MM/SS 组内操作端类型划分

考虑组内主操作员(如专家)所在位置及各操作端的设备性能等因素,假设 MM/SS 组有 $z (z \leq m)$ 个操作端,指定操作端 $p (p = 1, 2, \dots, z)$ 为主操作端,划分操作端 $q (q \neq p, q = 1, 2, \dots, z)$ 为辅助操作端或观测操作端,划分方法为

$$C_q(s) = \begin{cases} C_q^{as}(s) & \tau_p^q < \tau_T \\ C_q^{ob}(s) & \tau_p^q \geq \tau_T \end{cases} \quad (20)$$

式中: $C_q(s)$ 为除主操作端外的任意操作端; $C_q^{as}(s)$ 或 $C_q^{ob}(s)$ 为指操作端 q 为辅助操作端或观测操作端。主操作端本地存储的时延阈值 τ_T 设定方法改变为

$$\tau_T = k_p \tau_p^{u_1} \quad (21)$$

式中: $\tau_p^{u_1}$ 为主操作端 p 到组内操作对象的上行时延; k_p 为阈值系数,该值的大小根据遥操作任务的期望共享操控的操作端数量及操作紧迫性等因素设定,设定范围

$$1 < k_p \leq 1 + \max\{\tau_p^1, \tau_p^2, \dots, \tau_p^y\} / \tau_p^{u_1} \quad (22)$$

式中: $\max\{\cdot\}$ 为所有主操作端到辅助操作端单向传输时延的最大值; τ_p^y 为主操作端 p 到辅助操作端 $y (y \neq p; y \leq z)$ 的单向传输时延。

5.2 MM/SS 组内操作指令期望执行时刻设置

组内操作端 $i (i = 1, 2, \dots, z)$ 产生的操作指令 $c_i(t_e)$,其期望执行时刻 t_e 由于操作端类型的不同而不同,设置方法由式改(12)变为

$$t_e = \begin{cases} t_0 + \Delta t_i^o + \tau_T & C_i^{ma}(s) \\ t_0 + \Delta t_j^i + \Delta t_p + \tau_T & C_i^{as}(s) \end{cases} \quad (23)$$

式中: $C_i^{ma}(s)$ 或 $C_i^{as}(s)$ 为指操作端 i 为主操作端或辅助操作端; $t_0 + \Delta t_i^o (i = 1, 2, \dots, z)$ 为主操作端向操作对象的指令预计发送时刻; $t_0 + \Delta t_j^i (j \neq i, j = 1, 2, \dots, z)$ 为辅助操作端向主操作端的指令预计发送时刻; Δt_p 为主操作端对该指令的处理时间。 $t_0 + \Delta t_i^o$ 和 $t_0 + \Delta t_j^i$ 均由操作端处的指令发送队列长度及单个操作指令的处理速度决定。

5.3 MM/SS 组内操作指令融合

当多个操作端同时操作,且辅助操作端产生并传输至主操作端的操作指令与主操作端自身产生的操作指令具有相交的期望执行时段时,在主操作端处,对多条具有相交期望执行时段的操作指令进行融合处理,将处理后的单条操作指令及其期望执行时刻分别传输至操作对象和其余 $z-1$ 操作端。对于相交时段中的每个时刻 t_c ,操作指令融合处理:

$$\bar{c}_{t_c} = \frac{\omega^{ma} c_{t_c}^{ma} + \sum_{f=1}^g \omega_f^{as} c_{t_c}^{as}}{\omega^{ma} + \sum_{f=1}^g \omega_f^{as}} \quad (24)$$

式中: \bar{c}_{t_c} 为多条具有相同期望执行时刻 t_c 的指令处理后的单条指令内容,其期望执行时刻不变,仍为 t_c ; $c_{t_c}^{ma}$ 为主操作端产生的期望执行时刻为 t_c 的操作指令内容; ω^{ma} 为主操作端的指令权重; $c_{t_c}^{as}$ 为辅助操作端 $f (f = 1, 2, \dots, g; g \leq z-1)$ 产生的期望执行时刻为 t_c 的操作指令内容; ω_f^{as} 为辅助操作端 f 的指令权重。

6 MM/SS 系统共享遥操作方法

针对 MM/MS 共享遥操作系统,引入了用于管理和仲裁各操作端的主动式中间服务节点,同时针对系统中的 MM/SS 组,指定了管理组内各操作端的主操作端,相当程度上,对于 MM/SS 组主操作端可以完全替代中间服务节点的功能。因此,当共享遥操作系统由 MM/MS 系统变为 MM/SS 系统时,中间服务节点可退化到主操作端处,由主操作端替代完成中间服务节点的功能。

在持续地保持时间同步前提下,按照 4.1 节所述的时延信息维护规则,实时检测并更新每个操作端本地的与其他操作端和操作对象之间的单向时延值,在中间服务节点完成的功能均由主操

作端替代完成,主操作端不断处理来自各操作端的遥操作请求,及时发送允许遥操作的权限信息,同时实时维护并更新状态信息。此外,主操作端本地存储操作端及对象的操控状态信息 ζ 由式(17)简化为式(25),操作状态值取值方法按照式(26)。

$$\zeta = \zeta_m^s = [o_1, o_2, \dots, o_m, v] \quad (25)$$

$$o_i, v = \begin{cases} 1 & \text{(被) 操作中} \\ 0 & \text{未(被) 操作} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $o_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 和 v 表示具备对应操作关系的操作端和操作对象状态值应同时取值。

指定系统内的任一操作端 $p (p = 1, 2, \dots, m)$ 为主操作端,划分除主操作端外的操作端 $q (q \neq p, q = 1, 2, \dots, m)$ 为辅助操作端或观测操作端,划分方法参照式(20),主操作端本地存储的时延阈值 τ_T 设定方法参照式(21),设定范围由式(22)变更为

$$1 < k_p \leq 1 + \max\{\tau_p^1, \tau_p^2, \dots, \tau_p^r\} / \tau_p^{u_1} \quad (27)$$

式中: $\tau_p^x (x \neq p; x \leq m)$ 为主操作端 p 到辅助操作端 x 的单向传输时延。

对于操作端 $i (i = 1, 2, \dots, m)$ 产生的操作指令 $c_i(t_c)$,其期望执行时刻 t_c 仍按照式(23)设置,操作指令融合参照式(24)。

7 不确定大时延下共享遥操作实验

图 4 为以某大型空间机械臂地面装置为对象的 MM/SS 共享遥操作系统,由 3 个同构操作端(操作端 1、2 和 3)和一个大型空间 6 关节 7 自由度机械臂组成。通过时延模拟器,模拟生成每次任务实验中的共享交互时延和遥操作回路时延,采用设定数据存储池和无线网路间数据多次转发等方法,保证时延维持在一个恒值并伴有随机波动,以更好地体现实际工况下的不确定时延环境。共设计了两类实验,所有实验中遥操作指令的发送频率为 50 ms,各操作端的操作指令发送数据量大于 8 000 条;实验中的预报方法使用文献[32]的空间机器人在轨状态预报方法。单次任务设计如下,划分整个任务为 3 个子任务 1、2 和 3,分 3 个时段完成,子任务 1 开始时指定操作端 1 为主操作端,操作端 2 和 3 为辅助操作端;然后依次过渡到子任务 2 和 3,同时更换主操作端为操

作端 2 和 3, 另外两个操作端为辅助操作端, 3 个操作端具有不同的时延环境, 由 3 位操作员协同操作机械臂执行一次完整任务, 以验证提出的方法的有效性。首先, 设计了第 1 类实验, 包括实验组 1~5, 3 个操作端互为同地/异地共享遥操作状态, 所有操作端均使用 MM/SS 同地/异地共享遥操作策略, 时延比 R_τ 的设定范围为 0~1, 实验条件及结果如表 1 所示。表中: 对于每个实验组的各次实验, c_1 、 c_2 和 c_3 分别表示操作端 1、2 和 3; \bar{R}_τ 为实测平均时延比; \bar{E} 为操作端的平均关节角预测误差; \bar{E}_{ma} 为各时段的平均关节角预测误差;

E_p 为关节角预测误差的峰值; \bar{t}_p 为误差峰值恢复平稳的平均耗时。



图 4 某大型空间机械臂地面试验的 MM/SS 共享遥操作系统实例

Fig. 4 MM/SS cooperative teleoperation systems for ground test of large space manipulator

表 1 第 1 类实验条件及结果

Table 1 Conditions and results of experiments (Type 1)

序号	操作端号	\bar{R}_τ	τ_u 波动/s	τ_d 波动/s	τ_c/s			τ_c 波动/s	$\bar{E}/(10^{-3}(^\circ))$	$\bar{E}_{ma}/(10^{-3}(^\circ))$			$E_p/(10^{-3}(^\circ))$	\bar{t}_p/s
					c_1	c_2	c_3			c_1	c_2	c_3		
实验组 1	1(c_1)	0	2.75(2)	6(2)		0	0	0.2	2.77	2.79	2.81	2.71	24.4	
	2(c_2)	0	2.75(2)	6(2)	0		0	0.2	2.66	2.66	2.66	2.66	24.2	
	3(c_3)	0	2.75(2)	6(2)	0	0		0.2	3.72	3.91	3.13	4.13	2326.1	
实验组 2	1(c_1)	0	6(2)	11(2)		0	0	0.2	2.59	2.58	2.59	2.60	24.7	
	2(c_2)	0	6(2)	11(2)	0		0	0.2	2.70	2.71	2.65	2.74	23.6	
	3(c_3)	0	6(2)	11(2)	0	0		0.2	5.51	5.48	5.50	5.56	763.2	
实验组 3	1(c_1)	1:6	6(2)	11(2)		3	3	0.5	2.58	2.63	2.66	2.65	22.5	
	2(c_2)	1:6	6(2)	11(2)	3		0	0.5	3.13	3.15	3.11	3.13	23.1	
	3(c_3)	1:6	6(2)	11(2)	3	0		0.5	1.29	1.33	1.31	1.23	311.8	
实验组 4	1(c_1)	1:6	2.75(2)	6(2)		3	6	0.5	2.99	2.90	3.01	3.06	24.6	
	2(c_2)	1:3	6(2)	11(2)	3		10	0.5	2.61	2.61	2.53	2.69	22.5	
	3(c_3)	5:9	11(2)	15.5(2)	6	10		0.5	2.73	2.77	2.82	2.60	240.4	
实验组 5	1(c_1)	5:9	6(2)	11(2)		10	15	0.5	-7.63	-7.45	-7.70	-7.74	794.6	5.36
	2(c_2)	5:6	6(2)	11(2)	10		20	0.5	-2.35	-2.41	-2.21	-2.43	1555.6	6.71
	3(c_3)	10:9	6(2)	11(2)	15	20		0.5	2.72	2.79	2.85	2.52	362.5	10.4

限于篇幅, 仅给出实验组 5 某次实验(20 s 不确定大时延条件, 不确定时延模拟图如图 5 所示)的操作端 1 的关节角度和各操作端的关节角预测误差, 分别如图 6 和图 7 所示, 任务由 t_0 时刻开始, 共执行了约 700 s, $t_0 \sim t_2$ 时段 1、 $t_2 \sim t_4$ 时段 2 和 $t_4 \sim t_6$ 时段 3 分别执行子任务 1、2 和 3, 子任务 1、2 和 3 的主操作端分别为操作端 1、2 和 3。图 6 中, t_2 和 t_4 时刻为子任务间的过渡时刻, 也是主操作端的切换时刻; t_0 、 t_1 、 t_3 和 t_5 时刻均为新的指令序列的启动时刻。

为对比不采用共享遥操作方法时的操作效果, 设计了第 2 类实验, 包括实验组 6~7, 任务时段划分与主操作端切换顺序与第 1 类实验相同,

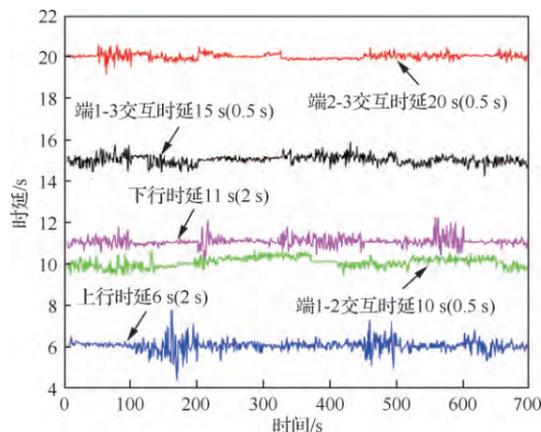


图 5 实验组 5 某次实验的不确定时延模拟

Fig. 5 Simulated time-varying delay of experiment in Group 5

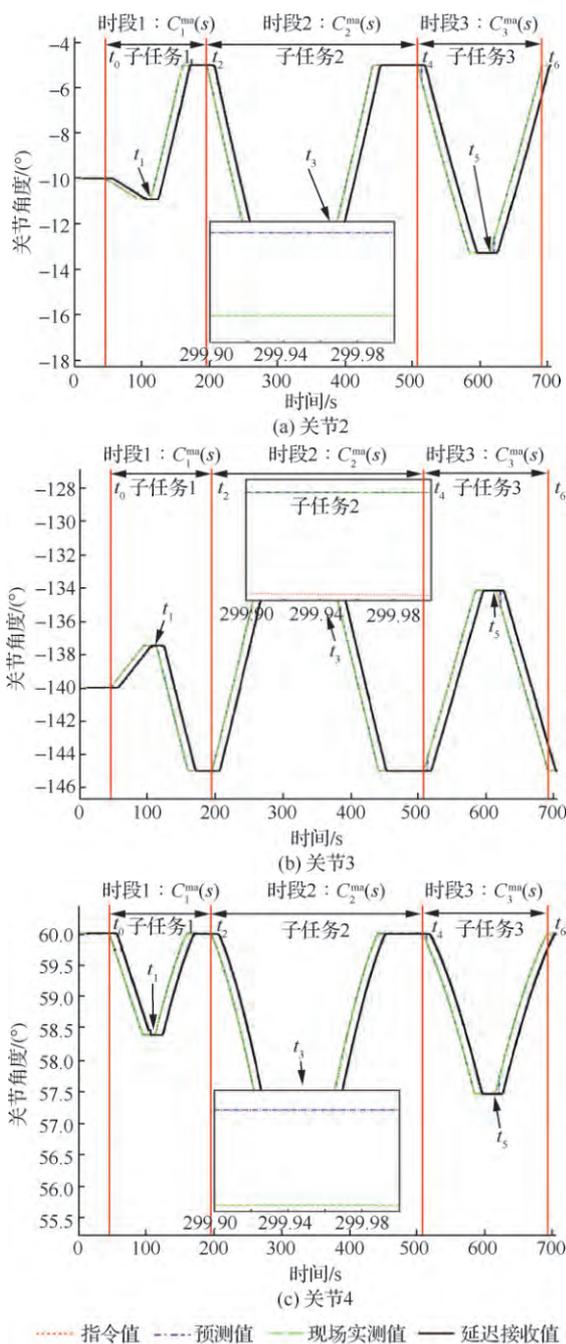


图6 实验组5某次实验的操作端1的关节角度

Fig. 6 Joint angle of operator 1 of experiment in Group 5

实验组6和实验组7设置相同的实验条件,如表2所示。其中,实验组6中仅操作端1和操作端2使用共享遥操作方法,操作端3不使用;实验组7中仅操作端1和操作端3使用共享遥操作方法,操作端2不使用。仅给出实验组6和7下某次实验的各操作端的关节角预测误差,分别如图8和图9所示。

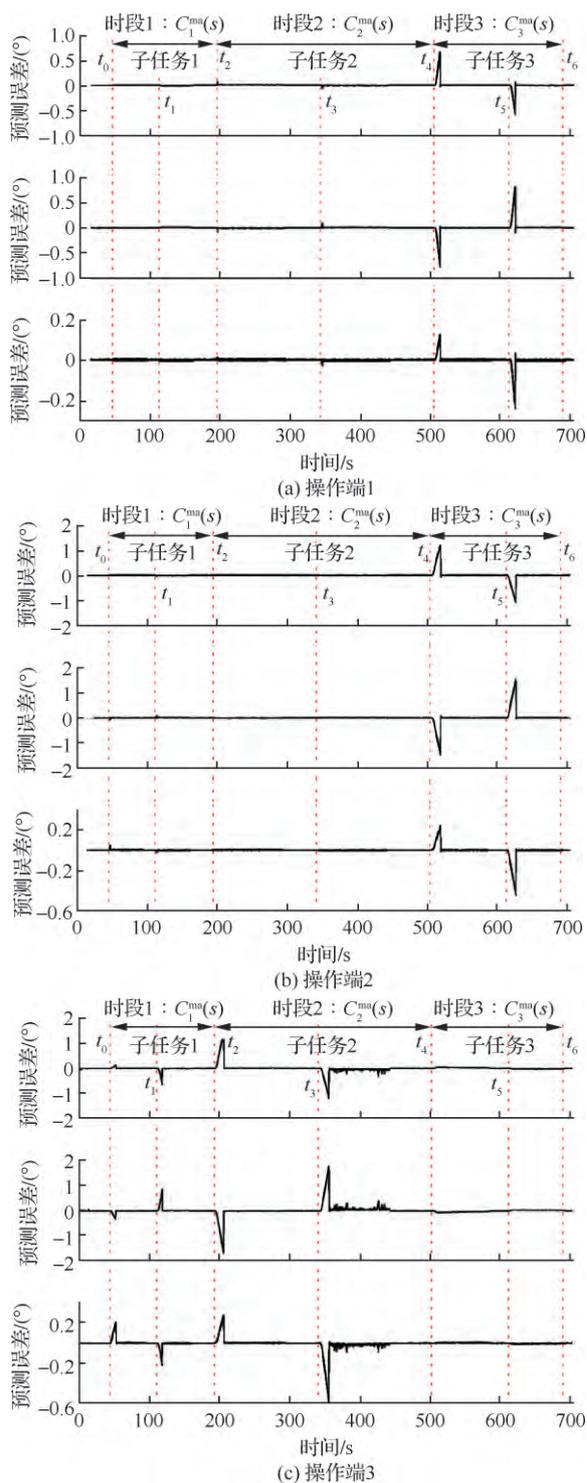


图7 实验组5某次实验的各操作端的预测误差

Fig. 7 Operator predication errors of experiment in Group 5

第1类和第2类实验的结果表明:

1) 采用提出的共享遥操作方法,在20s级不确定大时延环境下,时延比 R_t 由0~1,主操作端

时段、主辅全时段平均预测误差均在 10^{-3} ($^{\circ}$) 量级,影响不明显,说明均可实施连续稳定的遥操作。

2) 当系统中存在不使用共享方法的操作端时,有两个现象:① 任意子任务由该操作端作为主操作端实施操作,均会影响辅助操作端的共享状态数据处理,如图 8 的时段 2 和图 9 的时段 3,且有可能影响下个时段的共享遥操作,如图 9(a)

表 2 第 2 类实验条件

Table 2 Experimental conditions (Type 2)

时延环境	上行/s	下行/s	时延/s		
			操作端 1	操作端 2	操作端 3
操作端 1	2.75	6	3	6	
操作端 2	6	11	3		10
操作端 3	11	15.5	6	10	
时延波动	2	2	0.5	0.5	0.5

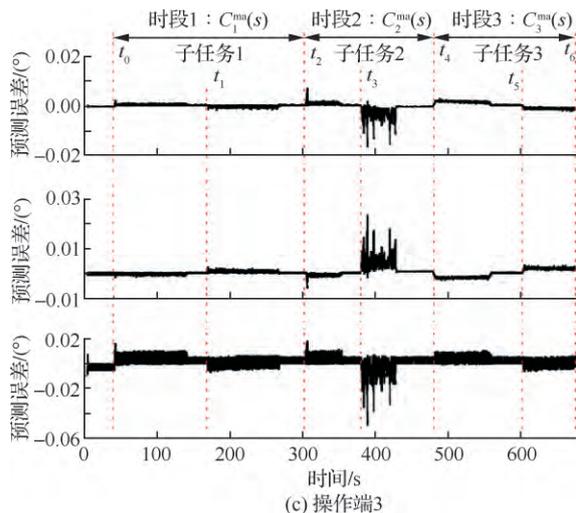
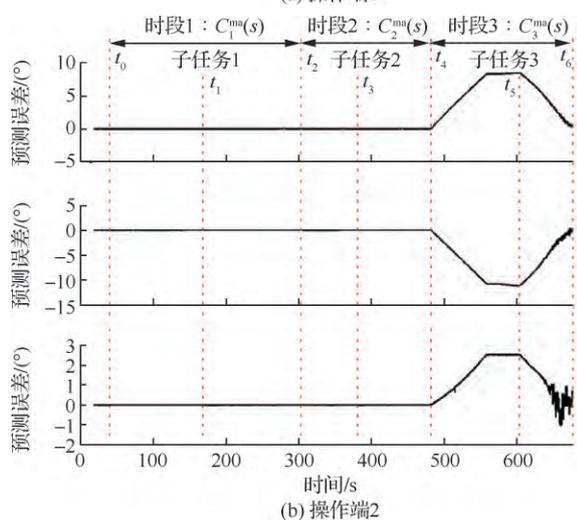
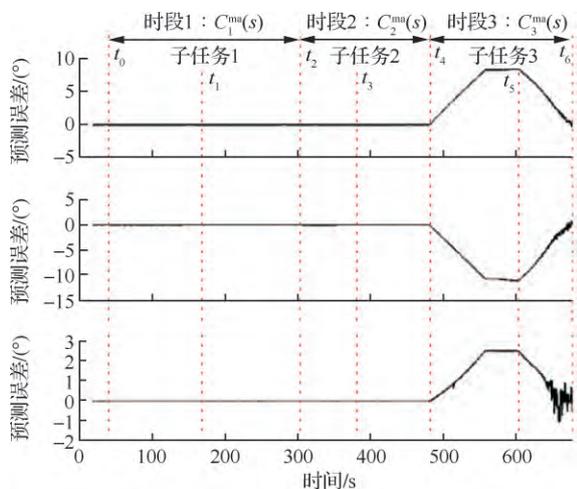
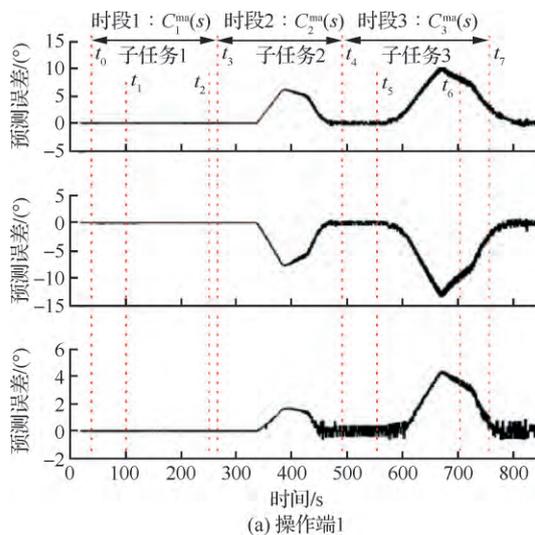


图 8 实验组 6 某次实验各操作端的预测误差(操作端 3 不使用共享遥操作方法)

Fig. 8 Operator prediction errors of experiment in Group 6 (Operator 3 does not use the cooperative teleoperation method)

的时段 3;② 使用共享方法的操作端,不会影响不使用共享方法的操作端,如图 8(c)和图 9(b)。

3) 当交互时延 τ_c 大于回路时延 ($\tau_u + \tau_d$) 时,即使系统中的所有操作端均使用共享遥操作方法,切换主操作端时(如图 7(a)和图 7(b)的 t_4 时刻,图 7(c)的 t_2 时刻)或启动新的指令序列时(如图 7(a)和图 7(b)的 t_5 时刻,图 7(c)的 t_0 、 t_1 和 t_3 时刻),会延迟其他操作端接收共享数据,导致预测误差累积,且误差平均累积时间与时延比 R_r 正相关,但不会影响系统的连续遥操作,如表 1 中实验组 5 的 t_p 。



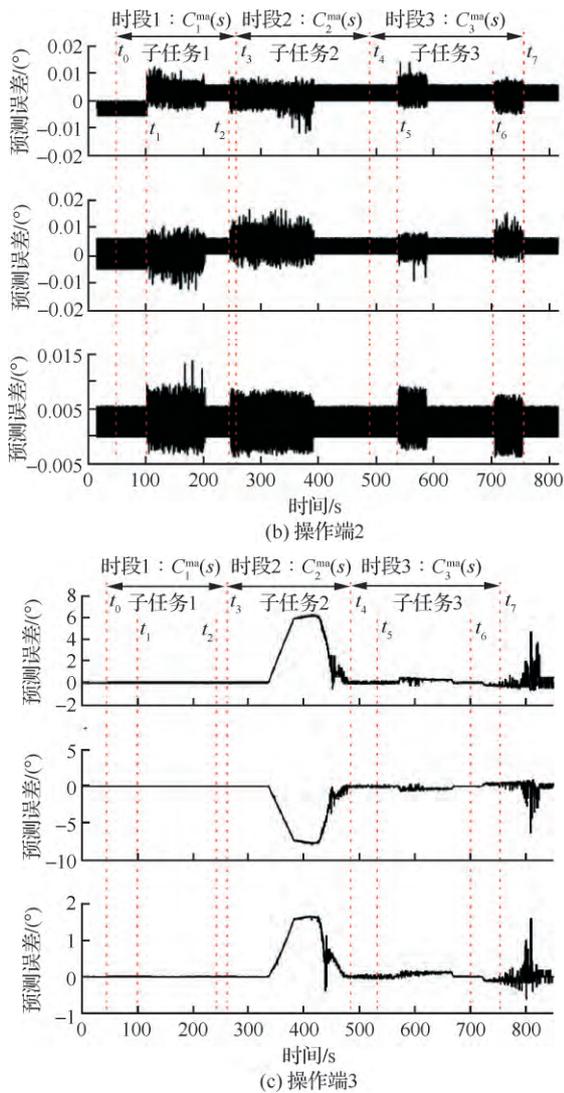


图9 实验组7某次实验的各操作端的预测误差(操作端2不使用共享遥操作方法)

Fig. 9 Operator prediction errors of experiment in Group 7 (Operator 2 does not use the cooperative teleoperation method)

8 结论

1) 利用遥操作系统的超前预报特性,提出了一种面向空间对象的复杂大时延的共享遥操作方法,通过数字仿真实验表明,本论文给出的分时树状分组策略、前提条件、组间信息/状态维护规则及组内操作融合算法,可有效应对复杂时延环境下的共享遥操作。

2) 本文方法要求所有操作端均遵守共享操作规则,当交互时延与遥操作回路时延比 $R_t > 1$

时,会使共享遥操作端出现短时的预测误差积累,但对平均预测误差影响不明显。

3) 本文方法的实施需保证,共享遥操作集群中单个遥操作系统具有较好的跟踪性和透明性,或者满足本文描述的“超前预报特性”前提。参加集群操作的对象各异,对应的遥操作系统也不尽相同,因此需保证时标信息充分(时间同步),但是并非所有的遥操作系统都会要求使用该条件;此外,其他时延估计方法、状态预报技术等,其精确度和快速性对系统群的稳定性和透明性等带来的影响,有可能在群体协调中放大,目前在这些方面的研究有待加强。

参考文献

- [1] LIU G Y, GENG X D, LIU L Z, et al. Haptic based teleoperation with master-slave motion mapping and haptic rendering for space exploration[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(3): 723-736.
- [2] 李文皓, 张珩, 马欢, 等. 大时延环境下空间机器人的可靠遥操作策略[J]. 机械工程学报, 2017, 53(11): 90-96. LI W H, ZHANG H, MA H, et al. Space robot reliable teleoperation strategy under large time delay[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(11): 90-96 (in Chinese).
- [3] 黄攀峰, 鹿振宇, 党小鹏, 等. 一种基于共享控制的双臂协同遥操作控制方法[J]. 宇航学报, 2018, 39(1): 104-110. HUANG P F, LU Z Y, DANG X P, et al. A shared control architecture for dual-arm cooperating teleoperation[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(1): 104-110 (in Chinese).
- [4] FENG G H, LI W H, ZHANG H. Evaluation method for multi-operator and multi-robot teleoperation systems[C] // 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 436-441.
- [5] 吴广鑫. 空间机器人遥操作系统及局部自主技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 1-2. WU G X. Research on space robot teleoperation system and local autonomous technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 1-2 (in Chinese).
- [6] 李琳辉. 大时延主从遥操作系统的双向控制与共享控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005: 1-12. LI L H. Study on bilateral control and shared control scheme for master-slave teleoperation system with large time delay[D]. Changchun: Jilin University, 2005: 1-12 (in Chinese).

- [7] 鹿振宇, 黄攀峰, 戴沛. 面向空间遥操作的非对称双人共享控制及其性能分析[J]. 航空学报, 2016, 37(2): 648-661.
LU Z Y, HUANG P F, DAI P. Asymmetric dual-user shared control method and its performance analysis for space teleoperation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(2): 648-661 (in Chinese).
- [8] 李滋堤, 孙富春, 刘华平, 等. 基于人工势场的空间遥操作共享控制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(10): 1728-1732, 1737.
LI Z D, SUN F C, LIU H P, et al. Shared control for space teleoperation using artificial potential field[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(10): 1728-1732, 1737 (in Chinese).
- [9] GOLDBERG K, GENTNER S, SUTTER C, et al. The mercury project: A feasibility study for Internet robots [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2000, 7(1): 35-40.
- [10] TAYLOR K, DALTON B, TREVELYAN J. Web-based telerobotics[J]. Robotica, 1999, 17(1): 49-57.
- [11] GOLDBERG K, CHEN B, SOLOMON R, et al. Collaborative teleoperation via the internet[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2000: 2019-2024.
- [12] KHEDDAR A, TZAFESTAS C, COIFFET P, et al. Parallel multi-robots long distance teleoperation[C]// 1997 8th International Conference on Advanced Robotics, 1997: 1007-1012.
- [13] XI N, TARN T J, BEJCZY A K. Intelligent planning and control for multirobot coordination: An event-based approach[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(3): 439-452.
- [14] OHBA K, KAWABATA S I, CHONG N Y, et al. Remote collaboration through time delay in multiple teleoperation[C]// Proceedings 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 1999: 1866-1871.
- [15] CHONG N Y, KOTOKU T, OHBA K, et al. Remote coordinated controls in multiple telerobot cooperation[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2000: 3138-3143.
- [16] CHONG N Y, KOTOKU T, OHBA K, et al. Use of coordinated online graphics simulator in collaborative multi-robot teleoperation with time delay[C]// Proceedings 9th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. Piscataway: IEEE Press, 2000: 167-172.
- [17] LO W T, LIU Y, ELHAJJ I H, et al. Cooperative teleoperation of a multirobot system with force reflection via internet[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2004, 9(4): 661-70.
- [18] SIROUSPOUR S. Modeling and control of cooperative teleoperation systems[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(6): 1220-1225.
- [19] KHADEMIAN B, HASHTRUDI-ZAAD K. A four-channel multilateral shared control architecture for dual-user teleoperation systems[C]// 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2007: 2660-2666.
- [20] KHADEMIAN B, HASHTRUDI-ZAAD K. Dual-user teleoperation systems: New multilateral shared control architecture and kinesthetic performance measures [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 17(5): 895-906.
- [21] KHADEMIAN B, HASHTRUDI-ZAAD K. A framework for unconditional stability analysis of multimaster/multislave teleoperation systems[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29(3): 684-694.
- [22] PASSENBERG C, PEER A, BUSS M. Model-mediated teleoperation for multi-operator multi-robot systems[C]// 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2010: 4263-4268.
- [23] PANZIRSCH M, BALACHANDRAN R, ARTIGAS J. Cartesian task allocation for cooperative, multilateral teleoperation under time delay[C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2015: 312-317.
- [24] PANZIRSCH M, BALACHANDRAN R, ARTIGAS J, et al. Haptic intention augmentation for cooperative teleoperation[C]// 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2017: 5335-5341.
- [25] LU Z Y, HUANG P F, LIU Z X. Predictive approach for sensorless bimanual teleoperation under random time delays with adaptive fuzzy control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(3): 2439-2448.
- [26] 蒋再勇, 刘宏, 谢宗武, 等. 3D图形预测仿真及虚拟夹具的大时延遥操作技术[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(1): 78-81.
JIANG Z N, LIU H, XIE Z W, et al. Teleoperation with large time delay based on 3D graphic predictive simulation and virtual fixture[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(1): 78-81 (in Chinese).
- [27] 刘宏, 李志奇, 刘伊威, 等. 天宫二号机械手关键技术及在轨试验[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(12): 1313-1320.
LIU H, LI Z Q, LIU Y W, et al. Key technologies of TianGong-2 robotic hand and its on-orbit experiments[J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(12): 1313-1320

- (in Chinese).
- [28] 李志奇, 刘伊威, 于程隆, 等. 机器人航天员精细操作方法及在轨验证[J]. 载人航天, 2019, 25(5): 606-612.
LI Z Q, LIU Y W, YU C L, et al. Elaborate operation method for robot astronaut and its on-orbit verification [J]. Manned Spaceflight, 2019, 25(5): 606-612 (in Chinese).
- [29] 赵杰, 高胜, 闫继宏, 等. 基于虚拟向导的多操作者多机器人遥操作系统[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(1): 5-9.
ZHAO J, GAO S, YAN J H, et al. Multi-operator and multi-robot teleoperation system based on virtual guide [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(1): 5-9 (in Chinese).
- [30] 马良, 闫继宏, 赵杰, 等. 基于虚拟环境的多操作者多机器人协作遥操作系统[J]. 机器人, 2011, 33(2): 169-173.
MA L, YAN J H, ZHAO J, et al. Virtual environment-based multi-operator multi-robot cooperative teleoperation system[J]. Robot, 2011, 33(2): 169-173 (in Chinese).
- [31] CHEN H F, HUANG P F, LIU Z X, et al. Time delay prediction for space telerobot system with a modified sparse multivariate linear regression method[J]. Acta Astronautica, 2020, 166: 330-341.
- [32] 马欢. 空间机器人在轨状态预报[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016: 143-165.
MA H. State prediction of on-orbit space robot[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 143-165 (in Chinese).

(责任编辑: 李世秋, 李丹)

Cooperative teleoperation for multi-master/multi-slave systems with large time-varying delays

LI Wenhao^{1,2}, ZHANG Heng^{1,2}, FENG Guanhua^{1,2, *}

1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Combining teleoperation and multi-robot coordination, cooperative teleoperation is an important means to expand complex space robot tasks and improve reliability for space robot teleoperation. Based on a review of cooperative teleoperation technology, this paper first proposes the cooperative teleoperation method for robots with large time-varying delays, drawing on the advanced prediction characteristics of teleoperation systems. A description model of complex Multi-Master/Multi-Slave (MM/MS) teleoperation systems is provided, together with a tree-like timesharing grouping strategy of all operators and objects with its five prerequisites presented. The cooperative teleoperation method among groups for MM/MS systems, the maintenance rules for time delays, the maintenance method for operation request judgment and operation state, and further, the corresponding cooperative teleoperation algorithm within groups for MM/MS systems are proposed respectively. Simplified rules are provided for the representative Multi-Master/Single-Slave (MM/SS) systems, and digital simulation experiments carried out based on the MM/SS teleoperation systems for ground tests of a large space manipulator. Results show that under the 20 s level large time-varying delay, continuous and stable teleoperation can be achieved when the ratio of interaction delay among operators to the teleoperation loop delay is from 0 to 1.

Keywords: space robots; large time-varying delay; Multi-Master/Multi-Slave (MM/MS); cooperative teleoperation; time-sharing tree-like grouping

Received: 2020-02-26; Revised: 2020-03-09; Accepted: 2020-04-13; Published online: 2020-05-06 15:09

URL: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20210114.html>

Foundation items: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA17030200); Key Project of Chinese National Programs for Fundamental Research and Development (2013CB733000); National Natural Science Foundation of China (11002143); Advanced Research Program of China's Manned Spaceflight (030601, 030101)

* Corresponding author. E-mail: guanhua_feng_86@163.com