

DOI : 10.3901/JME.2017.11.090

大时延环境下空间机器人的可靠遥操作策略*

李文皓 张珩 马欢 肖歆昕

(中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘要 : 在分析大时延环境下遥操作特点的基础上,从使用可靠性角度提出一种可靠遥操作的多层策略集。将各可靠遥操作策略分解在数据层、算法层、操作层、策略层以及系统层并分别展开说明,涵盖了大时延环境下的数据交互、空间机器人关节指令序列的嵌套位置/速度规划、操作员与遥操作系统交互、遥操作任务运行流程与应急和遥操作系统监测/在线维护等方面的策略。此外,对可靠遥操作中尚待解决的动作反演、操作引导和共享遥操作技术进行了分析和展望。开展了某不确定大时延环境下的空间机器人遥操作试验,试验的数据分析结果说明不同层次的遥操作可靠性策略均十分必要,以操作员为对象的可靠性提升策略和设计方法是可靠遥操作技术发展的重要方向。

关键词 : 大时延遥操作 ; 空间机器人 ; 可靠性策略 ;

中图分类号 : V19

Space Robot Reliable Teleoperation Strategy under Large Time Delay

LI Wenhao ZHANG Heng MA Huan XIAO Xinxin

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract : Teleoperation characteristics under large delay environment are analyzed. A multi-strategy set for reliable teleoperation is proposed based on use reliability. The reliable teleoperation strategy is decomposed into data layer, algorithm layer, operational layer, tactics layer and system layer, including the description from data exchange under large time delay, the nested position / speed plan for space robot joints instructions sequence, the interaction between operator and tele-operate system, teleoperation mission running processes, emergency methods and teleoperation system monitoring / online maintenance. Some unresolved techniques for reliable teleoperation such as operator action inversion, operating guide and share teleoperation are analyzed and discussed. Experimental studies of space robot teleoperation under uncertain large time delay are carried out. Results show that different levels of teleoperation reliability strategies are necessary. The reliability strategy and design method for the operator will be important direction of teleoperation technology development.

Key words : large delay teleoperation ; space robot ; reliability strategies

0 前言

随着人类对太空探索的进步,对空间资源的利用不断扩展,各类不断丰富的空间任务对空间机构的要求也日趋复杂。空间机器人及其遥操作技术作为航天工程和机器人科学的有机结合产物,集合了人的决策智能和机器的精确作业的特点,可执行人类不宜触及的危险或长时间的空间任务,显著拓展航天工程中的任务范围,增强人类对空间环境的驾驭能力,目前已经在航天飞机、国际空间站等大型

空间活动中发挥着重要作用。世界上发达国家航天技术发展的历程表明,空间机器人及遥操作技术已成为在轨服务的重要手段,各航天大国均在大力发展该技术^[1-2]。

可靠性指标一直是在轨机构的关键指标,针对空间机构的可靠性设计方法已有大量的研究结果。近年来,除了对机构本身的可靠性设计研究外,科研人员也开始重视机构的操作、操控和使用的可靠性。针对空间机器人,除了以路径最短、反作用力最小等为指标的路径规划方法外,性能退化下的控制方法、故障模式下的规划方法等研究也相继开展。

遥操作作为空间机器人操作的重要方式,其可靠性方法也被研究人员关注,相关的研究成果目前

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划, 2013CB733000)。20160729 收到初稿, 20170314 收到修改稿

在虚拟预报、避障规划、碰撞检测、引导操作等方面均有提及，但尚无体系化论述。本文针对大时延环境下空间机器人遥操作的可靠性提升问题，提出一种多层可靠遥操作策略集。

1 大时延与可靠遥操作

1.1 不确定大时延环境及其遥操作的主要方法

不确定大时延环境是遥操作区别于现场操作的主要特点。时延由于距离和中间节点的转发、处理等传输环节产生，例如通过地面对空间机器人操作时，回路时延会达到数秒。时延使控制指令和远端状态反馈均不能实时到达，降低远程操控的稳定性。时延的大小由于通讯环节的波动和长期在轨的使用存在时变性波动和漂移，使得大时延影响难以被常规控制方法有效抑制^[3]。状态预报技术是实现连续实时遥操作的关键技术之一，通过准确的预报远端对象的运行状态，操作人员可以依据预报状态进行去时延化的连续操作。状态预报一般通过预报模型进行，为了使预报模型更准确，通常还需配合模型修正方法使用^[4]。

1.2 可靠遥操作

一般的，构成遥操作回路包括操作员、遥操作系统、传输系统和远方被操作对象组成，一个典型的结合修正和模型预报的遥操作回路如图1所示。

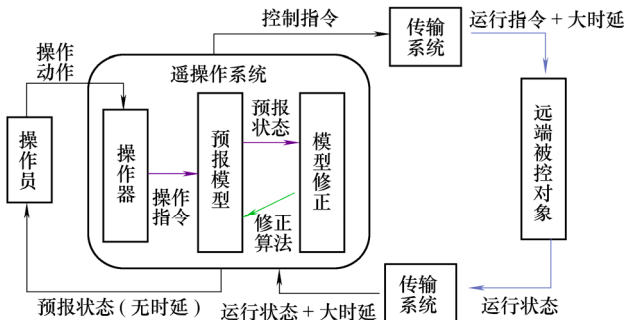


图1 典型的结合修正和模型预报的遥操作回路示意图

相比于现场操作，遥操作回路的关键特点在于时延影响，因此操作员在进行连续操作时，面对着是遥操作系统经过预报模型重建的虚拟对象(或者是对象的虚拟状态)，而预报模型与现场的被控对象的预报误差和模型误差通过模型修正算法进行在线/离线的修正。对于不含时延的现场操作系统，其硬件可靠性、软件可靠性、流程可靠性、数据可靠性等评价以及相应的提升方法已有大量文献和专著阐述，相关的内容不再赘述，本文着重讨论在不确定大时延环境下，与遥操作特性相关的可靠性提升策略和方法。

根据各可靠性提升方法在遥操作过程中发挥作用的环节不同，可以将其分解在数据层、算法层、操作层、策略层以及系统层，如图2所示。数据层针对遥操作中交互的数据进行可靠性处理；算法层针对操作指令到控制指令转换进行可靠性处理；操作层针对操作员的操作动作到操作指令间解算进行可靠性处理；策略层针对遥操作任务制订到执行操作前的流程进行可靠性处理；系统层针对遥操作系统集成及其在运行中的可靠性处理。图2的策略集中，层与层之间既交叉耦合，也互相支撑，比如数据层中部分数据的有效性判定需要通过算法层中的位置/速度/加速度的分析获取，同时其处理后有效判定的信息又会影响连续操作中的规划；操作层中的嵌套规划算法既可以作为可靠性操作的引导机制，也可以由操作员操作的结果所改变；策略层中的应急操作和系统级的共享遥操作策略可能对于遥操作的各层级策略的配合和交融产生明显改变。

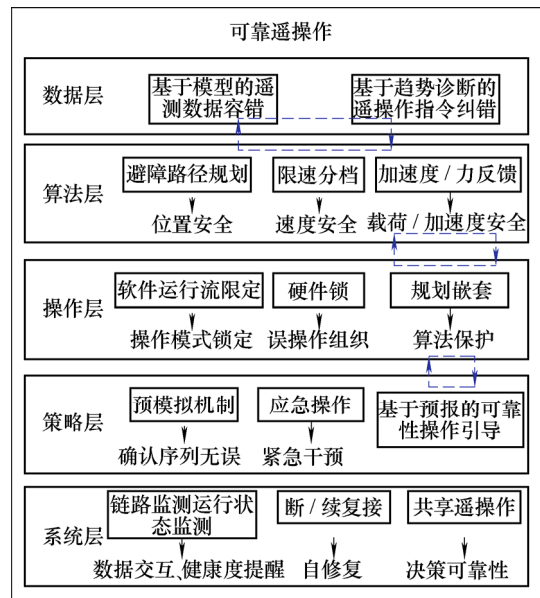


图2 可靠遥操作策略集及各层分解

2 可靠遥操作策略

2.1 数据层中的可靠遥操作方法

交互数据的数据纠错、容错处理是信息交互中的常用手段，成熟算法很多，主要集中于对数据流的编解码过程中的容错和纠错。对于不确定大时延环境下的遥操作情况，数据层有几个新问题需要进行可靠性提升。

(1) 由于时延的波动，获取的遥现场数据可能一段时间密集，而另一段时间稀疏，甚至在某段时间内形成数据真空，为保证状态预报和模型修正的连续性所要求的数据密度，需要进行遥测数据补偿。

(2) 预报模型的修正根据实收的遥测状态和对应的预报状态进行比对后进行。由于时延的波动, 遥测数据的接收时序常与发出的时序不同, 某些遥测状态可能生成较早但接收较晚, 因此遥测数据即使在编码校验中无误, 仍需要根据前后状态判断其对预报模型修正的有效性。

(3) 与遥测数据一样, 即使在编解码中校验无误, 仍然需要根据前后状态判断是否属于有效指令。

对遥测数据的补偿采用基于预报模型的数据平滑方法, 以达到补全和增加数据密度的目的。常用的数据平滑方法有线性插值平滑、抛物线插值平滑、样条插至平滑等, 但这些方法的平滑误差较大, 并且没有考虑在此期间控制量的作用, 影响修正的效果。考虑到模型结构的确定性信息, 利用动态的同态模型设计如下平滑器, 见式(1)

$$\tilde{Y}(t+n \cdot h) = \underbrace{f[\dots[f[\tilde{Y}(t), U(t), \tilde{A}(t)], \dots, U(t+(n-1) \cdot h), \tilde{A}(t+(n-1) \cdot h)]]}_n \quad (1)$$

式中, h 为采样/计算步长, $\tilde{Y}(t)$ 为 t 时刻的预报状态向量, $f[\tilde{Y}(t), U(t), \tilde{A}(t)]$ 为预报模型, $U(t)$ 为 t 时刻的输入指令, $\tilde{A}(t)$ 为对应 t 时刻的机器人结构状态矩阵。基于模型的数据积分平滑方法不仅充分利用了已知模型结构的确定性信息, 而且考虑了大采样步长时段内控制量的作用效果, 从而减小了平滑误差, 如图 3 所示。

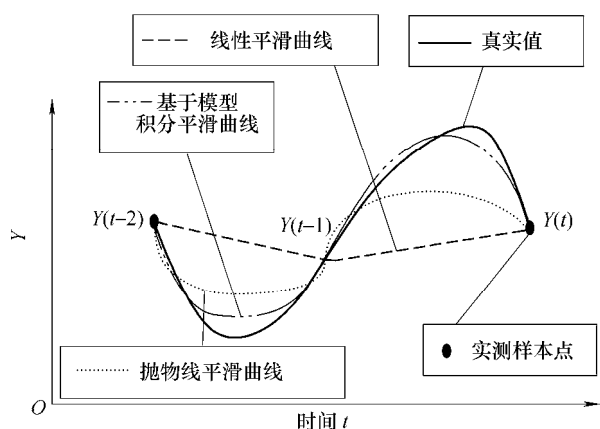


图 3 基于模型的数据积分平滑示意图

遥测数据的有效性判断策略如下。设当前接收空间机器人某关节的遥测关节角度状态数据为 $Y(t)$, 前三个经过预测模型平滑处理后的有效的关节角度遥测状态分别为 $Y(t-1)$ 、 $Y(t-2)$ 和 $Y(t-3)$; 在预测模型中, 对应 $Y(t-1)$ 、 $Y(t-2)$ 和 $Y(t-3)$ 的预报状态数据为 $\tilde{Y}(t-1)$ 、 $\tilde{Y}(t-2)$ 和 $\tilde{Y}(t-3)$, 预报模型中现在以及后续的三个预报状态分别为 $\tilde{Y}(t)$ 、

$\tilde{Y}(t+1)$ 、 $\tilde{Y}(t+2)$ 和 $\tilde{Y}(t+3)$, 则 $Y(t)$ 有效性的一种简单判定策略如式(2)~(6)所示

$$|Y(t) - \tilde{Y}(t)| \leq k_1 * (|Y(t-1) - \tilde{Y}(t-1)|$$

$$+ |Y(t-2) - \tilde{Y}(t-2)| + |Y(t-3) - \tilde{Y}(t-3)|) \quad (2)$$

$$|Y(t) - Y(t-1)| \leq k_2 * (|Y(t-1) - Y(t-2)| + |Y(t-2) - Y(t-3)|) \quad (3)$$

$$|Y(t) - \tilde{Y}(t-1)| \leq k_3 * (|\tilde{Y}(t-1) - \tilde{Y}(t-2)| + |\tilde{Y}(t-2) - \tilde{Y}(t-3)| + |\tilde{Y}(t+1) - \tilde{Y}(t)| + |\tilde{Y}(t+2) - \tilde{Y}(t+1)| + |\tilde{Y}(t+3) - \tilde{Y}(t+2)|) \quad (4)$$

$$|Y(t-2) + Y(t) - 2Y(t-1)| \leq k_4 * |Y(t-3) + Y(t-1) - 2Y(t-2)| \quad (5)$$

$$|\tilde{Y}(t-2) + Y(t) - 2\tilde{Y}(t-1)| \leq k_5 * [|\tilde{Y}(t-3) + \tilde{Y}(t-1) - 2\tilde{Y}(t-2)| + |\tilde{Y}(t-2) + \tilde{Y}(t) - 2\tilde{Y}(t-1)| + |\tilde{Y}(t-1) + \tilde{Y}(t+1) - 2\tilde{Y}(t)| + |\tilde{Y}(t) + \tilde{Y}(t+2) - 2\tilde{Y}(t-1)| + |\tilde{Y}(t+1) + \tilde{Y}(t+3) - 2\tilde{Y}(t)|] \quad (6)$$

式(2)~(6)分别反映了实测数据以及预报模型数据的位置量关联、速度量关联以及加速度量关联的计算判定条件, 式(2)~(6)满足其一即可判定为有效遥测数据。其中 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 分别为对应的可调整判定系数, 判定系数的确定与对应关节的运动特性相关。

遥操作指令的有效性判断方法与判断遥测数据的有效性类似, 仅需要根据指令序列的上下信息进行比对即可。设某关节角度的一组指令序列状态数据为 $C(1)$ 、 $C(2)$... $C(m)$... $C(n)$, 则指令 $C(m)$ 的有效性判定策略如式(7)、(8)所示, 满足其一, 则 $C(m)$ 可判定位有效指令, 其中 k_6 和 k_7 为可调整的判定系数, 与该指令序列内容的运动范围和平均运动速度相关。

$$|C(m) - C(m-1)| \leq$$

$$k_6 * (|C(m-2) - C(m-3)| + |C(m-1) - C(m-2)| + |C(m+1) - C(m)| + |C(m+2) - C(m+1)|) \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
& |C(m-2) + C(m) - 2C(m-1)| \leq \\
& k_7 * (|C(m-3) + C(m-1) - 2C(m-2)| + \\
& |C(m-1) + C(m+1) - 2C(m)| + \\
& |C(m) + C(m+2) - 2C(m+1)|) \quad (8)
\end{aligned}$$

2.2 算法层中的可靠遥操作方法

操作员难以将指令详细分解到机器人的执行序列，因此操作员下达的如末端直线运动、圆弧运动、多圆弧曲线运动、单/多关节运动和离线规划宏指令等命令，或者通过手操作器输入方向性操作指令，当解算为机器人各关节角的转动控制序列指令时，需要通过内嵌与机器人构型结构相关的关节运动规划算法，如避障最远、时间最优、反作用力矩最小^[5-6]等规则所形成的反解约定形成指令序列。算法层对遥操作的可靠性提升也依赖于内嵌的规划策略，包括位置、速度和加速度可靠性规划。

位置的可靠性规划主要为机器人的末端和构型避障规划，即在生成指令序列时，各指令序列所对应的机器人构型和末端位置均满足避免自碰撞和障碍碰撞的条件。一般的，避障规划只能假设机器人是为良好受控的刚性系统(柔性的情况下的控制结果会偏离刚性假设下的预计位置，使得以刚性条件为前提的避障规划器失效)。速度的可靠性规划主要针对机器人的柔性问题(当机器人关节较多，杆臂较长、负载较重时，加之空间中的微重力环境，关节的柔性、臂杆的柔性效应^[7]难以避免)。解决柔性问题的方法除了增强系统的刚性、采用柔顺控制等方法外，一个直接的方法即约束末端/各关节的平动/转动速度，其可靠性提升的物理含义在于降低动量(当惯性减少，相应的各种柔性效应则会减弱)。一种简单的速度约束策略即设置不同的速度档位，针对不同的运动阶段(如静止启动、平稳运动、减速运动)和不同的负载条件，对末端运动速度和关节的转动使用不同档位的速度限制。加速度的可靠性规划重点针对接触操控或者目标接近过程中的问题，主要采取的方法即通过加速度反馈、人工势场^[8]下的力反馈和接近速度反馈告知遥操作员机器人执行器与目标对象的相对关系的变化趋势，从而规划下一步动作。

2.3 操作层中的可靠遥操作方法

操作层中的可靠遥操作方法目的是在有效发挥人的智能决策优势的同时，尽量抑制人的不稳定操作和非精确性动作对遥操作任务的不利影响。包括硬、软件锁、规划嵌套方法和可靠操作反演。

硬件锁是指在操作器或者操作台上加装使能有效的硬件设备，只有在一个或多个硬件锁同时使

能后，由操作器或者操作台发出的指令才会有效输入。硬件锁对于由非主观因素引起的误指令和误操作非常有效。软件锁即通过软件运行流程的限定，如操作模式切换的流程限定，各操作模式下的控制信号输入流程限定等，亦能对非主观因素引起的误指令和误操作进也能有效屏蔽。此外，在操作员按照软件操作流程进行操作时，通过不断的提示所记录的操作过程以及提醒操作员正在进行的操作可能目的，可有效地防止操作员因为短暂的主观误导引起的误操作。基于规划嵌套的操作，是指在操作的输出端通过避障规划和安全保护的规划嵌套，使得即使在遥操作员错误的主观引导下，也不易于对空间在轨系统和操作对象产生灾难性危害。可靠操作反演主要针对操作员动作通过操作器输入后反演成操作指令的可靠性处理。现有的操作器种类繁多，如杆形操作器、空间鼠标、肌电感应操作器、外骨骼式操作器、数据手套和基于视觉的行为感知的非接触式操作器等，但由于人操作的不精确性，操作器输出均都存在通道耦合的现象。解决的方法主要通过操作员训练、平洞/转动使能限制、多向输出的主项判定、基于运动趋势连续性的输出滤波和输出再分配算法等。

2.4 策略层中的可靠遥操作方法

策略层的可靠遥操作方法主要目的是通过遥操作流程或者规则等策略性的优化，达到遥操作可靠性提升的目的。主要包括与预模拟策略、应急操作策略和可靠性操作引导策略。

预模拟策略是利用对象运行状态高精度前向预报技术，在执行操作前，先基于场景模拟、视觉模拟等数字仿真技术^[9]，对即将发出的遥操作指令进行预演练和效果评估，确定操作任务的可行性以及对周围环境和物体的影响，并用于改进任务步骤，优化指令序列，从而提高遥操作的可靠性。

应急操作策略是在现场情况出现了紧急情况，或者对任务和空间在轨系统安全有重要影响的突发事件时，需要使用的操作行为。一类应急情况是由于空间机器人的操作对外界物体、任务或空间机器人本体带来危险的情况，一般这类应急情况都有相应的处理预案，如紧急停止，回行安全位置等；另一类应急情况是未预计的突发事件对空间机器人或者空间机器人搭载平台产生威胁，又或者急需空间机器人进行补救性操作的情况，当这类情况出现时，空间机器人的应急操作需要部分打破若干安全性原则，而且若突发事件动态性要求较高，短时间内难以进行充分的任务预演和路径规划，此时应急操作将更依赖于操作员的操作技术和远端状态的预报正

确性和预报精度。

可靠性操作引导策略是当人在回路的实时遥操作时,如复杂环境/动态环境下的复杂任务操作、在轨维修/在轨服务中的精细化操作、或者对非合作的或未知目标进行接触或抓取操作、又或者是紧急情况下的操作时,为了降低遥操作员的疲劳度,为任务的执行的便利提供若干的提示引导信息,以提高操作员的操作成功率。具体的,包括对任务的关键路径节点的提示引导、对典型准备位置的提示引导,对任务执行流程的提示引导、对运动物体和可能的威胁提示引导^[10-14]等。

2.5 系统层中的可靠遥操作方法

系统层中的可靠遥操作方法主要是指从遥操作系统的架构和运行机制来提升遥操作的可靠性。系统层面的可靠遥操作方法主要体现在以下几方面。

(1) 对上述数据层、算法层、操作层和策略层可靠遥操作方法/算法进行集成,并在遥操作任务过程中,对各运行情况进行的监视、汇总、判断和及时的提示反馈至遥操作员和任务决策专家,以便于其考虑到目前的运行情况制定操作任务。

(2) 保障遥操作系统运行的稳定、流畅,提高遥操作系统对外部环境(温度、湿度、电磁、电源、振动环境等)的适应性,监视系统运行情况,出现故障情况时能够迅速诊断并热启动复接。

(3) 共享遥操作,不同于现有研究成果所提到的“遥操作共享控制^[15-16]”概念。共享控制主要是指遥操作员的操作指令与现场闭环控制指令进行的共享、分配和融合,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的共享。共享式遥操作提供遥操作系统的冗余和备份,直接提高了遥操作任务的可靠性;同时还提供多智能集同决策能力,提高决策可靠性;共享式遥操作

还是提供遥操作人员间的集同决策和协同操作能力的前提,提升对复杂系统,复杂任务和多操作对象的协同操作有重要意义。

3 不确定大时延可靠遥操作试验

某型遥操作系统的实现例子如图 5 所示,利用该遥操作系统,对类似于加拿大臂的某型空间机械臂(图 6)的地面试验系统进行操作(在地面试验中,将机械臂设定在气浮台平面上运动,因此关节 1、5、6 在试验过程中锁定为固定角度)。达到的主要技术指标和能力有: 操作模式:包含自主/监视模式、宏指令模式、在线编程模式、主从(交互)操作模式;

实时性:遥测数据刷新率 15 帧/s,各视觉相机图像刷新率 7 帧/s,三维场景模拟显示刷新率 10 帧/s,单条操作指令综合处理平均耗时为 37 ms,遥操作系统处理时延<300 ms; 数据处理能力:内/外部数据交互饱和码速率 27.5 MB/s/9.3 MB/s,误码率<0.05%; 时延影响消减能力:不确定时延辨识精度为 10 ms,可消减时延影响的回路时延值范围为 0~25 s。



图 4 某大型空间机械臂地面试验的遥操作系统实例

使用该遥操作系统,对该大型空间机械臂地面试验的等效数学模型开展遥操作试验,某一类典型的时延条件下(上行时延 10 s,下行时延 20 s,不确定时延波动范围 2 s)的试验结果如图 5 和图 6 所示。

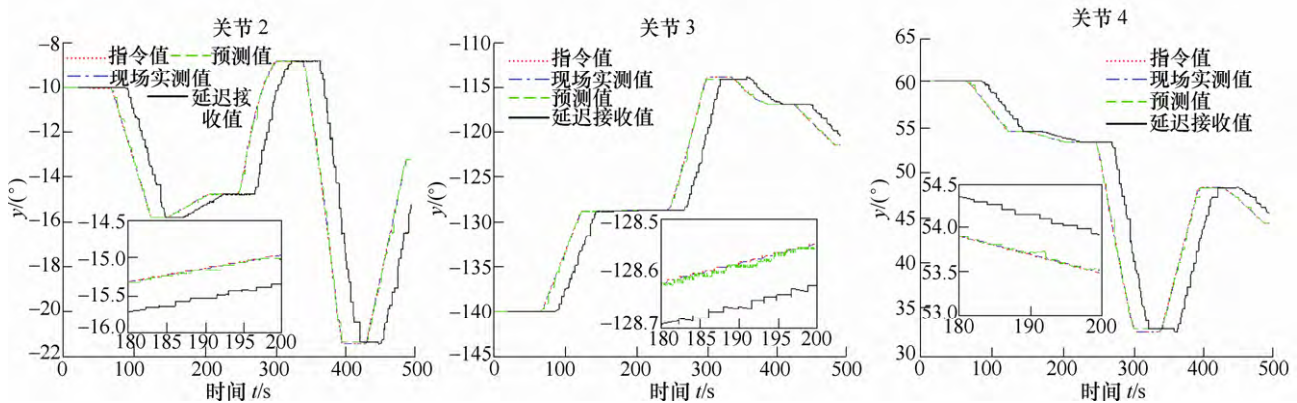


图 5 某典型时延下的遥操作各关节指令值、预测值、现场实测值和延迟接收值结果

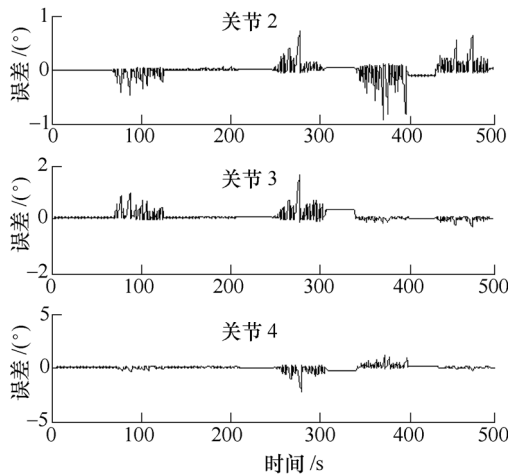


图6 某典型时延下的遥操作各关节预报误差

从图5和图6可以看出,在不确定回路时延下,预测值与现场实测值跟随较好,预报误差仅在运动中存在少量震荡,在25次遥操作试验中,统计不同类型的安全提示如表1。表1中,“数据丢弃/补偿/平滑”表示为在遥操作系统与机械臂系统交互中,由于时延波动所引起的主动过时数据剔除、补偿和平滑的次数;“运动超限/超速”表示使用手控器操作时,手控器操作输入碰触规划模块运动速度上限的次数;“碰撞”表示操作过程中由碰撞预警提示的可能发生碰撞的告警次数;“任务预模拟发现威胁”表示在操作前在任务预模拟中发现的威胁次数;“流程限制/错误”表示操作员在操作时调度和设置遥操作系统工作模式、操作模式和操作步骤时的主观性错误以及对应引发的软阻止次数;“操作使能阻止”表示为操作员由于非主观因素在错误的模式下使用进行错误的操作或者由于碰触/抖动等误操作并被使能设计阻止的次数。

表1 遥操作试验中不同类型的安全提示次数

安全提示	单次遥操作试验中发生的平均次数
数据丢弃/补偿/平滑	21.44
运动超限/超速	2.64
碰撞	0.48
任务预模拟发现威胁	0.84
流程限制/错误	1.2
操作使能阻止	2.24

“数据丢弃/补偿/平滑”主要与遥操作回路时延大小、时延波动范围、系统使用退化、交互接口设定等因数相关,“运动超限/超速”、“碰撞”、“任务预模拟发现威胁”等方面与操作者有关,但主要还是与任务设计相关,而“流程限制/错误”和“操作使能阻止”则主要与操作员相关。上述统计的结果虽不能说明具体哪类影响对空间机器人遥操作任

务影响最大,但显然不同层级的遥操作可靠性设计均是非常必要的,而且操作员作为遥操作任务中可靠性最难以描述和确定的一环,针对操作员的可靠性提高技术是可靠遥操作技术的重点方向。

4 结论

本文提出的多层可靠遥操作策略集,不同层间既有明确的特征,也互相联系,随着空间复杂机构更广泛的应用,对其可靠性控制和操作的研究细化,可靠遥操作策略还将进一步补充和完善。

文中所述的可靠遥操作策略集,尚属于可靠遥操作体系研究的初级阶段,许多方法和策略还需要加强。比如在可靠操作反演方法上,尽管现有的操作器种类很多,各种反解算法也不少,但是都不易平衡操作中对去耦合性与对灵活性要求,关键原因可能不在于操作器的设计,而是需要与任务结合进行反演,因此可靠的操作反演方法需要与可靠性操作引导策略进行结合。在共享遥操作方面,也存在若干问题尚待系统性解决。首先,对于处于异地的遥操作系统,在轨系统到各遥操作系统间交互的时延环境不同,因此须解决不同时延的相同状态预报问题;其次,不同的遥操作系统间的信息传递也存在不确定的时延影响问题;此外,各遥操作系统由于研制或开发的差异,运行的机制和流程必然不尽相同,为了形成良好的共享关系,共享遥操作系统之间的必须进行深度的信息交互,所以,处理共享交互信息时,不同的遥操作系统需要形成共享交互标准还有待研究。

参 考 文 献

- [1] HIRINGER G, BRUONCR B, DIETRICH J. ROTEX-the first remotely controlled robot in space[C]// Proc. of IEEE Inter. Conf. on Rob. and Auto., 1994: 2604-2611.
- [2] IMAIDA T, YOKOKOHJI Y, DOI T. Ground-space bilateral teleoperation of ETS- robot arm by direct bilateral coupling under 7-s time delay condition[J]. IEEE Transactions on Robotics And Automation, 2004, 20(3): 499-511.
- [3] 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 robot[J]. Journal of Astronautics, 2001, 22(1): 95-98.
- [4] 赵猛, 张珩. 不确定大时延下遥操作对象模型的在线修正方法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(19): 4473-4476.

- ZHAO Meng , ZHANG Heng. Online model-modifying method for teleoperation under large and uncertain time delay[J]. Journal of System Simulation , 2007 , 19(19) : 4473-4476.
- [5] 贾庆轩,张龙,陈钢,等. 多目标融合的冗余空间机械臂碰前轨迹优化[J]. 宇航学报, 2014, 36(6) : 639-646. JIA Qingxuan , ZHANG Long , CHEN Gang , et al. Pre-impact trajectory optimization of redundant space manipulator with multi-target fusion[J]. Journal of Astronautics , 2014 , 36(6) : 639-646.
- [6] 陈钢,张龙,贾庆轩,等. 基于主任务零空间的空间机械臂重复运动规划[J]. 宇航学报, 2013 , 34(8) : 1063-1071. CHEN Gang , ZHANG Long , JIA Qingxuan , et al. Repetitive motion planning for space manipulator based on null space of primary task[J]. Journal of Astronautics , 2013 , 34(8) : 1063-1071.
- [7] 张绪平,余跃庆. 综合考虑关节及杆柔性的空间机器人动力学分析[J]. 机械科学与技术, 1998 ,17(5) :775-778. ZHANG Xuping , YU Yueqing. Dynamic analysis of spatial manipulators considering joint and link flexibility[J]. Mechanical Science and Technology , 1998 , 17(5) : 775-778.
- [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, 2010 , 50(10) : 1728-1732. LI Zidi ,SUN Fuchun ,LIU Huaping ,et al. Shared control for space teleoperation using artificial potential field[J]. J. Tsinghua Univ. , 2010 , 50(10) : 1728-1732.
- [9] BEJCZY A K , KIM W S , VENEMA S C. The phantom robot : Predictive displays for teleoperation with time delay[C]// IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation , 1990 : 546-551.
- [10] 张斌,黄攀峰,刘正雄,等. 基于虚拟夹具的交互式空间机器人遥操作实验[J]. 宇航学报, 2011 , 32(2) : 446-450. ZHANG Bin ,HUANG Panfeng ,LIU Zhengxiong , et al. An interactive space robot teleoperation experiment based on virtual fixtures[J]. Journal of Astronautics , 2011 , 32(2) : 446-450.
- [11] 蒋再男,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 Zainan , LIU Hong , XIE Zongwu , et al. Teleoperation with large time delay based on 3D graphic predictive simulation and virtual fixture[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University , 2008 , 42(1) : 78-81.
- [12] MOHAJERPOOR R , REZAEI M , TALEBI A , et al. A robust adaptive hybrid force/position control scheme of two planar manipulators handling an unknown object interacting with an environment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I, Journal of Systems & Control Engineering , 2011 , 226(4) : 509-522.
- [13] CHAUDARY H , PANWAR V , PRASAD R , et al. Adaptive neuro fuzzy based hybrid force/position control for an industrial robot manipulator[J]. Journal of Intelligent Manufacturing , 2014 , 1 : 1-10.
- [14] CHEN Z , LIANG B , ZHANG T. A self-adjusting compliant bilateral control scheme for time-delay teleoperation in constrained environment[J]. Acta Astronautica , 2016 , 122 : 185-195.
- [15] ABIDI K , YILDIZ Y , KORPE B E. Explicit time delay compensation in teleoperation : An adaptive control approach[J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control , 2016 , 26(15) : 3388-3403.
- [16] CHEN Z , PAN Y , GU J. Integrated adaptive robust control for multilateral teleoperation systems under arbitrary time delays[J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control , 2016 , 26(12) : 2708-2728.

作者简介:李文皓(通信作者),男,1983年出生,副研究员。主要研究方向为空间对象遥操作与飞行控制。

E-mail : liwenhao@imech.ac.cn

张珩,男,1961年出生,博士,研究员,博士研究生导师。主要研究方向为控制理论与空间遥操作技术。

E-mail : hjheng@263.net