

## 基于遥操作安全的预测仿真系统研究

李波<sup>1,2,3,4,5</sup>, 赵怀慈<sup>1,3,4</sup>, 孙士洁<sup>1,2,3,4</sup>, 花海洋<sup>1,3,4</sup>

(1 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2 中国科学院大学, 北京 100039;  
3 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;  
4 辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;  
5 沈阳工程学院, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:** 针对外太空恶劣环境, 在分析空间机器人遥操作系统安全隐患基础上提出了遥操作预测仿真系统框架, 构建了三维遥操作虚拟场景, 同时应用基于虚拟夹具的碰撞检测算法和基于时间戳的修正策略提升了预测仿真系统性能, 并给出了与地面实物仿真系统联调验证实验结果. 实验结果表明, 构建的预测仿真系统运行快速、预测准确, 可有效规避遥操作大时延问题, 避免误操作导致的实物损伤.

**关键词:** 遥操作安全; 预测仿真; 大时延; 虚拟夹具

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)05-0098-05

## The Prediction Simulation System Based on Teleoperation Safety

LI Bo<sup>1,2,3,4,5</sup>, ZHAO Huai-ci<sup>1,3,4</sup>, SUN Shi-jie<sup>1,2,3,4</sup>, HUA Hai-yang<sup>1,3,4</sup>

(1 Department of Optical-Electronics and Information Processing, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China;  
2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China;  
3 Key Laboratory of Optical-Electronics Information Processing, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China;  
4 Key Laboratory of Image Understanding and Computer Vision, Liaoning Province, Shenyang 110016, China;  
5 Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** According to the severe environment in space, this paper describes the whole simulation scene build on the ground based on teleoperation safety analyses. Corrective Measures based on timestamps and special collision detection algorithm based on virtual fixtures are used to improve the performance of the VR system. Besides, many experiments with real robot show that the VR system described in this paper works efficiently and precisely. It is very helpful for the operator to avoid the large time delay and keep hardwares safe from improper operation.

**Key words:** teleoperation safety; prediction simulation; large time delay; virtual fixtures

### 1 引言

随着我国航天事业的迅猛发展, 通过空间机器人完成的空间作业任务大幅度增加, 机器人执行任务的精度和复杂度都在不断提高.

外太空机器人遥操作面临的困难主要体现在通信时延上<sup>[1]</sup>. 由于天地间数据通信过程中的较大时

延的存在, 严重影响了遥操作的稳定性和操作性能; 此外, 通信时延导致地面操作人员不能实时观测到外太空操作环境的变化, 无法及时有效地对空间机器人进行操作.

外太空遥操作过程中信号传输时延问题无法完全克服, 只能在一定程度上减小. 而由此产生的地面操作员对于空间环境变化的认知不够的矛盾, 目前

收稿日期: 2013-07-09; 修回日期: 2013-09-01

基金项目: 921 载人航天领域预先研究项目(030202); 辽宁省教育厅科研项目(L2011238)

普遍采用通过虚拟现实技术进行预测的方式加以解决. 虚拟预测技术已经成功应用于众多领域,借助于虚拟预测技术,操作人员无需对空间机器人直接进行操作,而改为对虚拟机器人操作<sup>[2]</sup>,并依据虚拟场景的预测结果指导下一步操作<sup>[3]</sup>,这样就可以有效地规避天地时延. 近年来,虚拟预测技术在国内也得到了迅速发展,在空间机器人遥操作领域也有了实验性地应用.

## 2 遥操作系统安全隐患分析

外太空环境不确定因素很多,若在遥操作过程中操作不当,极易导致事故,造成巨大损失. 目前流行的遥操作系统是将遥操作指令同时发送给虚拟系统和真实系统,这种方式存在着严重的安全隐患.

假设控制台向机器人发送的操作指令为机器人从当前位置向目标位置移动的相对位移  $\Delta s$ , 即  $\Delta s = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ , 其中  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  为机器人在  $X, Y, Z$  三个坐标轴上相对位移的分量. 则每次机器人执行指令后所处的位置  $S$  为

$$S = S' + \Delta s,$$

式中,  $S'$  为机器人的原位置.

由于模型的误差和人手抖动等因素,虚拟仿真场景无法绝对精确地执行该过程;对于真实场景而言,由于电气设备的精度、重力、空气阻力等因素的影响,也不可能非常精确地执行该过程. 在执行过程中肯定会存在一定的误差,假设每次的误差为  $\Delta e$ , 则真实场景机器人的位置:

$$S = S' + \Delta s + \Delta e.$$

随着遥操作指令的不断执行,设每次发送的相对位移为  $\Delta s_1, \Delta s_2, \dots, \Delta s_n$ , 每次产生的误差为  $\Delta e_1, \Delta e_2, \dots, \Delta e_n$ , 则机器人的最终位置应该为

$$S = S' + \sum_{i=0}^n \Delta s_i + \sum_{i=0}^n \Delta e_i.$$

显然,随着操作的进行,  $\sum_{i=0}^n \Delta e_i$  会不断累积,当误差累积到一定程度,就会导致虚拟预测系统与真实系统中机器人的位置产生较大的偏差,进而导致遥操作任务的失败.

遥操作系统中一般都会考虑累积误差问题,目前多采用场景校正的方法减小累积误差,即采用一定的策略,使用真实场景的数据去校正虚拟场景. 这可以在一定程度上减小误差,但是却不能消除操作人员误操作带来的隐患.

由于遥操作指令被同时发送给虚拟系统和真实

系统,一旦产生误操作,尤其在碰撞临界点发生误操作,虽然在虚拟系统中可以早一步预测到并产生警示,但是发送给真实系统的遥操作指令仍然会被执行. 在真实的外太空遥操作中这种操作方式可能导致严重后果. 因此考虑对于误操作的纠正及补救措施是很有必要的.

## 3 系统框架

本文描述的仿真系统对整个外太空机器人遥操作的过程进行了完整仿真,并通过预测系统对操作人员的误操作进行纠正和补救. 系统框架如图 1 所示,由地面操作装置、预测仿真虚拟现实系统和外太空场景实物模拟场景三大部分组成. 操作人员发出遥操作指令后,遥操作指令没有被同时发送给虚拟系统和真实系统,而是先发送给预测仿真系统,由预测仿真系统验证操作安全后再发送给真实系统. 通过这种方式,可以有效避免误操作带来的损害.

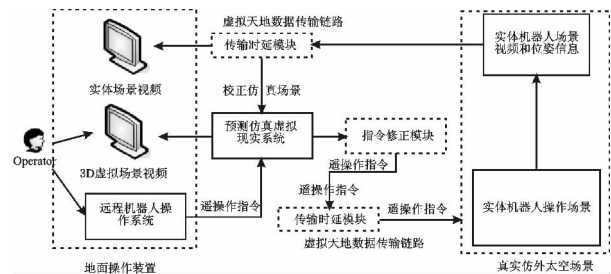


图 1 系统框架示意图

地面操作装置由遥操作控制台、虚拟现实显示设备和外太空场景视频显示设备组成. 遥操作控制台用于产生遥操作指令,对外太空场景的机器人和虚拟现实环境中的机器人进行控制. 虚拟现实显示设备由球形屏幕和两台高精度投影仪组成,可形成三维立体影像,能够提供深度信息. 视频显示器显示的是来自真实场景的视频,该视频信息经过时延处理.

外太空实物模拟场景为在实验室中布置的机器人和相关操作装置,并使用吊丝配重法<sup>[4]</sup>进行零重力模拟,用以模拟外太空的操作环境. 该场景中设置了多个摄像头,可完成对该场景多角度拍摄,并且将视频传送回操作台.

为了模拟天地通信中的时延,在地面遥操作控制台和外太空实物模拟场景之间加入了传输时延模块. 通过算法产生了通信传输时延,每次时延在 1~3 秒左右,呈正态分布. 从遥操作指令发出到看到视频回馈大约要经过 3~7 秒左右. 一段时间内的时延产生情况如图 2 所示,时延产生概率如图 3 所示.

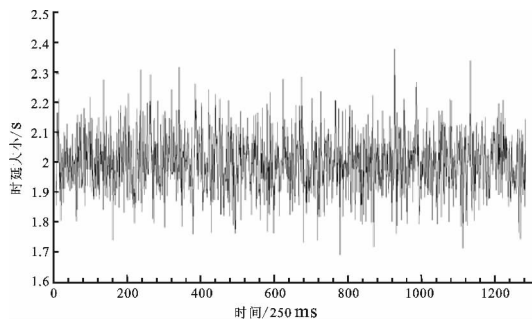


图 2 一段时间内时延产生情况

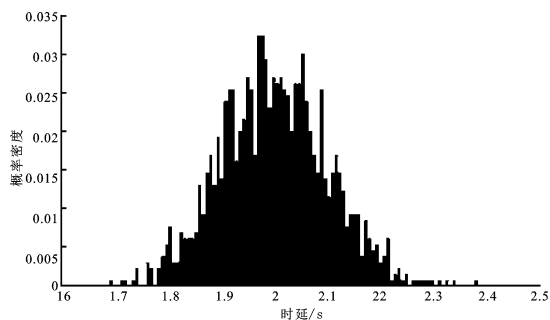


图 3 时延产生概率

预测仿真虚拟现实系统是整个仿真系统的核心,对整个外太空机器人操作场景以 1:1 比例构建了一个完全相同的虚拟的外太空机器人操作场景.其目的是接收地面操作装置发出的遥操作指令,对真实的机器人运行状况进行预测仿真,并且输出仿真结果到虚拟场景显示器.受制于三维建模精度、外力影响等不可控因素,虚拟场景与真实场景之间不可能完全一致,在预测仿真过程中一定会产生误差,而这些误差在不断的运行过程中会被累积放大,最终导致错误.为了避免较大的仿真误差产生,在仿真过程中加入了虚拟场景校正算法,使虚拟场景与真实场景尽可能保持一致,以此控制误差范围.

### 4 三维场景构建

虚拟场景与真实场景的匹配程度是决定预测的准确程度的关键因素.只有虚拟场景与真实场景高度接近,预测仿真的结果才有可能精确.为了增强虚拟场景的真实感,对场景的光影效果进行了针对性处理<sup>[5]</sup>.与此同时,为了提高虚拟场景的更新速度,通过 GPU 分担了大部分绘图和指令操作<sup>[6]</sup>.

为系统安排的遥操作任务是控制机器人头部的探针通过一个在水平和垂直方向上均有一定的变化的凹槽,而不和凹槽发生任何方向的碰撞.在机器人的运动过程中,要同时考虑水平和垂直两个方向的位移,需要非常精确地控制操作.

机器人以 IBB 公司的 R120 为原形制作了仿真

模型.该机器人具有六个自由度,以连杆方式运动,可用众多运动学模型<sup>[7]</sup>进行解析.考虑到终端探针的形状单一,选用 DH 模型<sup>[8]</sup>.为计算方便,以每个自由度的旋转轴为 Z 轴确定其运动坐标系如图 4 所示.

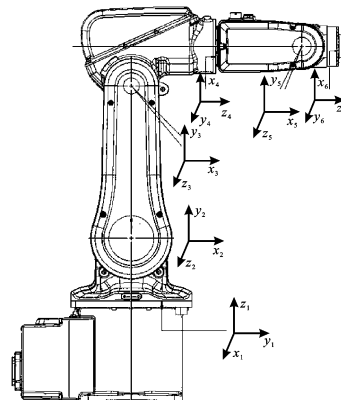


图 4 机器人的六个自由度的运动坐标系

根据建立的连杆坐标系可计算出机器人的运动学模型.设连杆变换<sup>i-1</sup>T 表示连杆坐标系 {i} 相对于连杆坐标系 {i-1} 的变换,则根据 DH 算法,有

$${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i \sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

机器人末端相对于机器人的基座坐标系的变换矩阵为

$${}^0T = {}^0T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T$$

由此可计算出机器人末端相对于基础坐标系原点的位置.

### 5 碰撞检测

由于人手抖动和通信时延的存在,要通过遥操作控制机器人沿着凹槽运动而不与凹槽的底部和两侧发生碰撞,是一项极为精细而又有难度的工作.为了降低操作难度,本系统使用虚拟夹具<sup>[9]</sup>帮助操作人员完成遥操作.

在虚拟场景中,为机器人顶端的探针定义直径一个形状与探针相似但是直径比探针略大的如图 5 所示的虚拟夹具,在机器人移动时对虚拟夹具与凹槽进行碰撞检测.这样就将机器人与凹槽的碰撞转换为虚拟夹具与凹槽的碰撞.由于虚拟夹具比探针范围略大,当虚拟夹具与凹槽发生碰撞时,探针实际上并没有与凹槽发生碰撞,而在处于与凹槽壁很近的位置.这样操作人员就可以以碰撞位置为参考,

使机器人沿凹槽前进,进而完成遥操作任务.

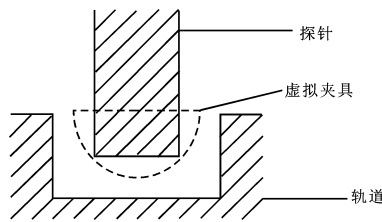


图 5 虚拟夹具示意图

该操作过程能够顺序进行的关键是碰撞检测技术,要求所使用的碰撞检测技术必须快速并且准确.

由于凹槽的不规则性,导致目前常用的包围球碰撞检测算法效率低下且不准确.经过多次实验验证,根据作业任务的特点,结合凹槽特点,在虚拟夹具的基础上开发了九点碰撞检测算法,很好地满足了任务需求.该算法在虚拟夹具上如图 6 所示,选取了九个碰撞检测点,在运行过程中仅使用这九个点检测与凹槽的碰撞情况,大幅度减小了运算量,提高了虚拟场景的响应速度.

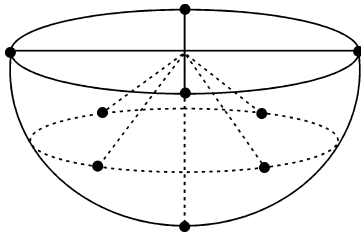


图 6 九点碰撞检测法示意图

## 6 仿真场景修正

为避免累积误差,在预测仿真系统中使用了仿真场景修正策略.即每隔一定时间,就使用实体机器人的位姿参数调整虚拟场景机器人的参数,使虚拟机器人的位姿与真实机器人保持一致.

由于通信时延的存在,并且时延的大小不断变化,导致从真实场景中获取到的姿态信息无法确定其姿态来自具体哪个时间点,也就无法进行姿态匹配.为此,在仿真系统中采用了时间戳策略,即将地面操作台发送的遥操作指令都打上时间戳,真实机器人执行该指令后,将姿态信息加上同样的时间戳发送回地面控制端,这样就能够确定每条指令执行后对应的机器人的姿态信息.

表 1 和表 2 分别为在无位置修正和有位置修正的情况下,地面操作员按照同样步骤连续进行遥操作后,采集到的仿真机器人和真实机器人的空间数据对比.分别选取了三组数据.

表 1 未经修正的探针位置数据

序号	虚拟机器人			真实机器人			位置 差距
	x	y	z	x	y	z	
1	13.02	15.35	5.28	13.03	15.35	5.27	0.01
2	8.43	14.37	6.35	8.47	14.42	6.31	0.07
3	3.56	13.28	3.45	3.54	13.25	3.30	0.18

表 2 经过修正的探针数据

序号	虚拟机器人			真实机器人			位置 差距
	x	y	z	x	y	z	
1	13.02	15.35	5.28	13.02	15.38	5.27	0.03
2	8.44	14.38	6.36	8.46	14.40	6.27	0.02
3	3.53	13.58	3.46	3.51	13.27	3.28	0.02

由实验数据可见,若不进行位置修正,随着遥操作过程的进行,虚拟机器人与真实机器人的空间位置偏差会越来越大,最终会出现不可容忍的错位,导致遥操作失败;而经过位置修正的虚拟机器人与真实机器人的位置偏差总保持在 0.04 个单位以内,该精度足以保证遥操作任务的顺利进行.

## 7 遥操作指令修正

出于安全考虑,必须保证真实场景机器人不能与凹槽发生碰撞,以避免引起硬件损伤.本系统采用了先由预测仿真系统验证遥操作指令,确保不会发生碰撞后再将指令交由真实场景执行的策略.由于虚拟夹具将探针完全包围在其中,当虚拟场景中虚拟夹具与凹槽发生碰撞时,说明探针在当前的运动趋势下,即将会与凹槽发生碰撞.此时由预测仿真系统修正遥操作指令,停止向真实场景发送向碰撞方向运动的命令,以防真实机器人与凹槽发生碰撞.同时恢复预测场景中的视图并发出碰撞警告.借助于指令修正功能,即使操作人员进行了误操作,也不会导致真实场景中的硬件损伤.指令修正过程如图 7 所示.

## 8 结束语

为确定系统的准确性,将遥操作预测仿真系统与实物场景进行了联调测试,实验结果表明,真实场景和虚拟场景达到了高度的一致.该预测仿真系统能够在通信大时延情况下,对真实场景运行情况进行精确预测,协助操作员对远端真实场景进行控制并完成精细工作任务,并且能够有效地防止误操作,保证真实场景中硬件的安全.该预测仿真系统运行稳定、预测准确.但是,由于遥操作指令要先由预测

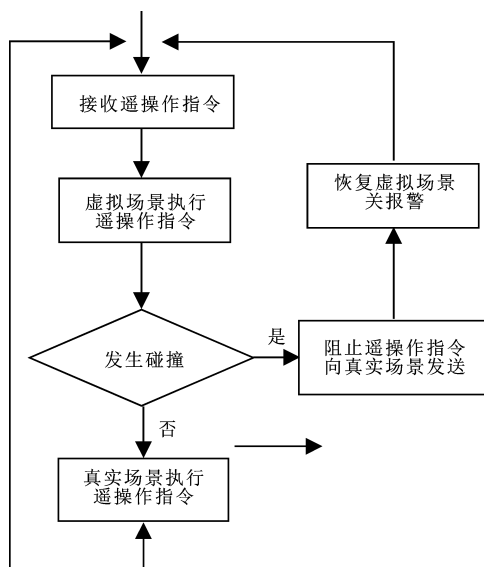


图7 遥操作指令修正过程

仿真系统执行,预测安全后才能交由真实场景执行,在一定程度上延缓了真实场景的反应时间,降低了遥操作系统的运行效率.如何缩短虚拟场景的执行时间,提高真实场景的运行效率,是下一步研究的重点.

#### 参考文献:

- [1] 于振中,惠晶,许胜,等.多自由度遥操作系统控制的波变量法[J].信息与控制,2012,41(2):147-152.
- [2] 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.

(上接第97页)

的搜索次数和发送的信息量.仿真分析证明,改进的二进制搜索算法具有更高的效率.

#### 参考文献:

- [1] 冯娜,潘伟杰,李少波,等.基于新颖跳跃式动态搜索的RFID防碰撞算法[J].计算机应用,2012,32(1):288-291.
- [2] 洪海亮,金杰,矫亭亭.跳跃式二进制树形搜索防碰撞算法及其分析[J].微电子学与计算机,2011,28(7):146-148.
- [3] 高金辉,郑晓彦.RFID系统中二进制搜索防碰撞改进

- [3] 王学谦,梁斌,徐文福,等.空间机器人遥操作地面验证技术研究[J].机器人,2009,31(1):8-14.
- [4] 高海波,郝峰,邓宗全,等.空间机械臂收拢状态零重力模拟[J].机器人,2011,33(1):9-15.
- [5] 刘旭.基于快速Fourier变换三维海浪建模方法研究[J].微电子学与计算机,2012,29(3):125-128.
- [6] 袁壮,陈庆奎,曹剑炜.CPU和GPU混合集群的负载均衡策略[J].微电子学与计算机,2012,29(9):47-50.
- [7] 黄玉钊,曲道奎,徐方.基于自然正交补的真空机器人动力学建模[J].机器人,2012,34(6):730-736.
- [8] 王裕基,孙富春,刘华平,等.基于6-DOF解耦操作臂的空间遥操作控制及运动学分析[J].信息与控制,2012,41(1):38-43.
- [9] 蒋再男,赵京东,刘宏.力反馈柔性虚拟夹具辅助遥操作[J].机器人,2011,33(6):685-690.

#### 作者简介:



李波 男,(1980—),博士研究生.研究方向为虚拟现实与仿真技术、高性能计算及其可视化.

赵怀慈 男,(1974—),博士,研究员,博士生导师.研究方向为虚拟现实与仿真技术.

孙士洁 男,(1980—),博士研究生.研究方向为通信技术.

算法[J].计算机测量与控制,2012,20(10):2754-2756.

- [4] 周艳聪,孙晓晨,顾军华.一种改进二进制防碰撞算法研究[J].计算机应用研究,2012,29(1):256-259.
- [5] 李飞,曹敦,傅明.一种BIBD编码的RFID防碰撞算法的改进[J].计算机应用与软件,2012,29(6):151-154.

#### 作者简介:

李宝山 男,(1965—),硕士,教授.研究方向为射频识别系统及应用.

乔聪 女,(1988—),硕士研究生.研究方向为射频识别系统及其应用.