月球车实时遥操作方法研究

杨成^{①*}, 宋军^①, 孙军^①, 苗毅^①, 张伟^①, 余佳宏^②, 杜辉^③

① 北京航天飞行控制中心, 北京 100094

② 中国航天员科研训练中心, 北京 100094

③ 中国航天科技集团, 北京 100094

* 通信作者. E-mail: yangchenug@gmail.com

收稿日期: 2013-12-18; 接受日期: 2014-01-10

国家自然科学基金 (批准号: No. 61173080) 资助项目

摘要 在月球探测任务中, 利用无人月球车在月面移动, 对一定范围的月面环境进行探测, 是一种较为安全的方式. 月球车的月面巡视是一个以轮地交互为基础、地面实时监视控制的过程. 根据恢复的月面三维地形环境, 地面进行探测目标选择和巡视路径规划, 以远程控制的方式控制月面巡视. 本文提出了一种月球车在线控制方式, 基于虚拟现实技术, 对月面地形环境和月球车状态进行运动学和视景仿真, 地面控制人员通过人机交互, 控制虚拟月球车行进, 控制信号经验证后生成月球车的控制指令, 实现月球车的在线控制. 为应对地月通讯延时问题, 采用预测显示方法, 避免了大延迟的影响. 本方法减少了控制环节, 提高了月球车远程控制的效率和安全性.

关键词 虚拟现实 预测显示 月球车 遥操作 空间探测

1 引言

虚拟现实 (virtual reality, VR)^[1~5] 是一种可以创建和体验虚拟世界 (virtual world) 的计算机系统. 其中虚拟世界为全体虚拟环境 (virtual environment) 或给定仿真对象的全体, 它是由计算机产生, 通过视、听、触觉等作用, 使用户产生身临其境感觉的交互式视景仿真. 因此, 虚拟现实系统是由包括计算机图形学、计算机仿真、多传感器、语音处理与音像以及网络等技术所构成的大型综合集成环境.

在文献 [2] 中, 作者对虚拟现实系统进行了描述. 虚拟现实技术的核心是通过计算机产生一种如同“身临其境”的具有动态、声像功能的三维空间环境, 而且使操作者能够进入该环境, 直接观测和参与该环境中事物的变化与相互作用. 在虚拟现实系统中, 人机界面具有三维立体感, 人融于系统, 人机浑然一体, 同时继承了现有计算机仿真技术的优点, 具有高度的灵活性, 通过对仿真环境进行设置和模拟, 就可模拟现实世界中真实环境, 并以逼真的立体输出展现出来, 特别是应用于目前不易获得的环境中更为突出, 使用十分灵活、方便, 对于危险系数高、花费投入巨大的工程环境, 更能体现其安全、经济、可重复使用的优势. 由于以上优点, 虚拟现实系统已经在军事、医学、设计和娱乐等领域得到了广泛应用.

众所周知, 航天飞行控制是一项耗资巨大、变量参数很多、非常复杂的系统工程, 保证其安全、可靠是航天控制时必须考虑的重要问题. 因此, 利用虚拟现实技术经济、安全及可重复性等特点, 进行飞

引用格式: 杨成, 宋军, 孙军, 等. 月球车实时遥操作方法研究. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 461-472, doi: 10.1360/N112013-00228

行任务或操作的模拟, 以代替某些费时、费力、费钱的真实试验或者真实试验无法开展的场合, 从而获得提高航天控制工作效率或航天器系统可靠性的飞控决策. 世界各航天机构已经将虚拟现实技术应用在航天员训练、航天测控等方面, 发挥了重要作用^[3~6]. 如世人瞩目的“发现号”航天飞机返回的关键弧段, NASA 就应用了该技术对“发现号”的返回过程进行了实时、三维可视化测控, 直观、实时地展示航天飞机的位置、姿态等各类参数.

月球车远程控制中最主要的问题是空间与地面通信中的时间延迟以及有限的数据传输带宽^[7~12]. 通信延迟包括遥控指令的延迟和遥测信号的延迟, 主要是由月球与地球间的远距离造成的. 地球和月球之间的最大距离是 407000 公里, 通讯延迟约为 1.4 秒, 加上一般的系统延迟 1.1 秒, 地月单向回路延迟为 2.5 秒^[13]. 时延使连续遥操作闭环反馈控制系统变得不稳定. 对月球车进行远距离遥操作, 在大延迟条件下控制月球车在月面复杂地形环境中行走, 是一项高风险、高投入、高度复杂的系统工程, 其耗资巨大、研制周期长、环境约束条件复杂、变量参数繁多、系统设计与控制要求高可靠性等突出特点, 需要构建更好的遥操作平台, 为工程决策提供有力的支撑手段. 传统方式采用离线控制方式, 即地面根据月球车在当前站点获取的月面图片, 恢复周围月面地形, 经过任务分析、路径规划后, 计算出月球车下一步运动的路径, 月球车按照该段路径进行月面行驶. 这种控制方式环节众多, 进行一次路径控制需较长时间, 而且月球车按地面规划路径行驶过程中, 地面不能进行实时控制, 存在较大风险.

本文针对月球车在线遥操作技术进行了研究, 提出了一种基于虚拟现实技术的月球车在线控制平台. 利用月球车月面环境感知系统重建月面地形, 建立月球车运动学和动力学模型对月球车的月面运动进行仿真, 以三维可视化的方式展示月球车任务状态和月面环境, 产生逼真的虚拟月球车控制环境, 地面控制人员利用操纵杆对月球车进行虚拟控制, 模拟月球车在月面的状态, 同时生成上行控制指令, 通过遥控注入, 实现在线控制月球车在月面的运动. 这种控制方式直接由地面指挥人员进行实时控制, 提高了月球车控制效率, 减小任务风险.

2 月球车月面巡视控制

月球车月面巡视控制是结合月球车自身的性能和所获取的巡视区地图, 以及光照、星历、月球车能源状态、温度水平、位置等信息, 为月球车制定探测计划和巡视路径, 使其在满足各种全局约束和月球车能力约束的条件下, 到达指定地点完成巡视探测任务: 一方面需要对科学家提出的科学探测点进行可行性分析, 另一方面需要对行进过程中的行为进行预测和规划, 为月球车的探测提供宏观的指导; 最后将行为转换为向月球车上注的指令序列, 控制月球车达到探测目标.

月面的环境非常复杂、恶劣并且充满着未知性, 月球车要在一个陌生的、非结构化的环境中行驶, 并且要完成特定科学探测任务, 实现对其控制是月球车最具挑战性的工作. 月球车的控制一方面可以根据月球车自身携带的计算机进行自主决策, 实现一定程度的自主导航、定位与控制; 另一方面也可以由地面进行规划生成控制指令, 月球车接受地面系统的遥操作控制指令, 以地面远程控制的方式进行月面作业. 由于月球车载荷有限, 只能具备最基本的自主控制能力, 通常都是由地面进行远程控制. 通过感知设备获得月球表面环境信息, 并将月球车位置以及运动姿态传递给地面的控制中心, 地面控制中心需要对月球车进行路径规划、躲避障碍等, 迅速给出下一步运动目标的指示, 并且将最优的运动方案控制命令返回月球车. 在一个月面巡视控制单元中, 月球车远程控制方式包含如下步骤:

1. 月面地形恢复

月球车月面巡视, 首先需要获得周围月面三维地形环境. 通过立体相机或者激光扫描仪, 月球车

图 1 月面巡视地面控制流程

Figure 1 The teleoperation procedures of lunar rover

获得周围的二维图像或者激光点云, 传送回地面控制中心后, 结合各类遥测信息及感知参数, 利用计算机视觉原理, 对月面三维地形进行恢复, 经坐标校正处理后得到月面高分辨率数字高程图和正射影像图. 一般过程为图像解析、转为透视投影模型、图像匹配、地形构建、DEM/DOM 生成, 是遥操作中环境感知的主要实现手段

2. 定姿定位

确定月球车在月面的坐标位置和姿态. 位置姿态计算途径有遥测 GNC 下传、深空测量、基于图像的视觉定位等方法, 根据当前任务状态, 对结果进行融合和选优.

3. 路径规划

根据月球车行进过程中的运动特性、通讯约束等条件, 在数据处理分析的基础上, 根据已知的环境信息, 通过提取和分析相关特征, 将物理环境转化为可进行路径搜索的、能被计算机表示和理解的环境模型, 再从中利用路径搜索算法, 找出一条从起始位置到达目标位置的与障碍物无碰撞的月球车行走路径, 规划月球车下一段时间内的运动过程, 计算相应控制参数.

4. 规划验证

对生成的指令计划和注入数据上行后验证控制效果是否满足目标, 指令计划是否存在冲突, 机构运动是否存在干涉, 最后给出验证结果报告.

5. 控制实施

规划结果验证正确且注入数据完成会签后, 向月球车发送相应指令及注入数据. 监视月球车到达某点后的状态进行评估, 判断是否满足实施后续行为的要求. 控制流程如图 1 所示.

这种周期控制模式针对两点之间路径单元的控制需要, 根据月面巡视约束条件, 利用计算机自动进行路径搜索, 获得指引月球车前进至探测点的安全路径, 经地面验证通过后, 生成控制指令注入月球车执行, 月球车按照该路线行进. 该方法具有较高的稳定性, 但存在 2 个局限性: (1) 效率较低. 这种控制模式工作流程长, 涉及环节多, 需在月面地形的基础上, 根据各类与月面巡视相关的约束条件, 生成月面环境图, 再利用人工指定或者自动搜索的方式, 获得路径, 经验证正确后才能控制月面行走, 涉及较多中间结果和信息接口, 影响地面决策速度, 且控制过程需考虑一些时变因素, 如光照通讯条件

图 2 月球车在线控制系统组成

Figure 2 The diagram of the online control system of lunar rover

等,增加了地面控制的难度;(2) 缺乏应急处理能力. 该方式为“一注一动”方式,地面将一段时间内的路径控制指令注入月球车,月球车按指令行走过程中,地面利用实时下传的月球车状态数据对其行走过程进行监视,不能实时进行修正和控制,由于地球月球之间存在较大的通讯时延,若行进过程中发生意外需要应急控制,地面不能及时对巡视路线进行调整,将导致月球车损坏,不能保证月球车行进过程的安全性.

3 月球车在线控制策略

本文提出了一种基于虚拟现实的月球车在线控制策略,在地面建立月球车月面巡视虚拟现实系统,根据月面三维地形环境以及月球车运动学特性对月球车在月面的运动进行仿真,并对月面巡视状态进行三维显示.地面控制人员利用手控操作设备,利用三维显示反馈的月面环境以及车体状态进行操作,控制月球车的转向、前进、后退,月面巡视仿真从手控设备采集控制数据,对月球车巡视状态进行仿真,更新状态后由三维视景仿真进行展示,同时生成对月球车的控制指令,经遥控注入,月球车按该指令在月面进行行进.

本方法利用虚拟现实系统对月面巡视过程进行模拟,地面控制人员对虚拟月球车进行控制,代替对月面真实月球车的远程控制.由于地面控制人员只与地面虚拟现实系统进行交互,从虚拟现实系统获取任务状态,从而做出操作判断,因此,地面控制人员能对月球车做出实时的控制.生成的控制指令上传到月面月球车,控制其月面巡视.地球与月球之间的通讯时延只会影响到遥控注入,但这不会对地面控制人员产生影响.本文在线控制方法如图 2 所示.

3.1 手控设备

手控设备为虚拟现实系统中的人机交互设备,提供地面控制人员进行月球车在线控制的操作接口,设置月球车行走所需的参数.地面操作人员通过三维显示,了解当前月面地形环境以及月球车的当前位置姿态,根据目标点实时操作手控设备,产生控制信号,控制月球车的运动.

月球车的运动控制包括:

1. 运动模式

月球车运动模式有如下两种方式,控制前,需首先设置运动模式.

1) 原地转向模式:月球车在原地保持位置不变,仅改变姿态进行向左或者向右转向,从而调整前进方向;

图 3 手控驾驶过程中的地月延时情况

Figure 3 The time delay of the communication between the Earth and the Moon

2) 直接行走模式: 月球车按照一定的曲率和线速度, 向前行驶. 曲率表示了行进路线的弧度. 该模式下, 需设置行进路线曲率和行进线速度.

2. 行进路线曲率

月球车可以按照直线方式行进, 也可以在行进时进行一定的转向, 从而按照弧线行进. 用路线曲率表示路线的弯曲程度, 曲率为弧线所对应圆周的半径的倒数 (半径单位为米). 曲率小于 0, 表示月球车往左转; 曲率等于 0, 表示月球车沿直线前进; 曲率大于 0, 表示月球车往右转. 曲率的绝对值越大, 月球车转弯半径越小, 路线越弯曲. 行进路线曲率由手控设备的方向盘进行设置.

3. 行进线速度

行进线速度为月球车在直接行走模式下的行进速度, 与月球车的运动档位对应, 由手控设备的档位键设置.

4. 运动控制

通过步骤 1~3 设置月球车行进参数后, 即可控制月球车实施前进、后退、停止, 可由手控设备的操作推杆控制. 在原地转向模式下, 操作推杆松开, 控制月球车停止转向; 操作推杆前推, 控制月球车向左原地转向; 操作推杆后推, 控制月球车向右原地转向. 在直接行走模式下, 操作推杆松开, 控制月球车停止行进; 操作推杆前推, 控制月球车按照设置的曲率和线速度前进; 操作推杆后推, 控制月球车按照设置的曲率和线速度后退.

3.2 预测显示

月球车在月面三维地形环境中运动, 地面控制中心接收月球车状态数据, 监视其运动状态, 并产生控制指令, 传送至月球车实时控制其运动. 在月球车与地面控制中心的天地控制回路中, 由于地月空间距离较大, 会产生通讯延迟, 如图 3 所示, 包括两方面:

1. 月球车遥测延迟. 月球车位置、姿态等数据上传频率为 4 秒/帧, 加上无线电在地月传输的时间 2 秒, 地面控制中心接收到的月球车遥测数据存在约 2~6 秒的延迟.

2. 手控驾驶指令延迟. 地面控制人员根据三维画面, 通过手控设备进行驾驶, 产生遥控指令需 1 秒, 经地月通讯链路到达月球车需 2 秒. 月球车接收到手控指令存在约 3 秒延迟.

如图 4 所示, 当前时刻为 t_1 , 最近的遥测数据对应的时刻为 t_0 , 手控操作指令到达月球车的时刻为 t_2 . 在 t_1 时刻, 以 t_0 时刻的遥测数据为基础, 根据其原地转向或者曲率前进的运动状态, 利用 $t_1 \sim t_2$ 过程中手控操作情况进行外推, 获得月球车在 t_2 时刻的位置、姿态, 用于驱动三维画面.

预测显示算法根据输入参数, 计算预测时刻 (T) 的月球车位置、姿态. 算法所使用到的数据如表 1, 包括初始化、数据接收处理、画面刷新处理 3 部分, 具体如下:

图 4 原地转向和曲率运动状态的预测方法
Figure 4 The prediction method for the two moving modes

表 1 预测显示算法参数设置
Table 1 The parameters of the predicting algorithm

	Variables	Parameter
Inputs	(X, Y, t)	Position of lunar
	(P, t)	Attitude of lunar
	(Ts_1)	Starting time of lunar
	(Ts_2)	Stopping time of lunar
	(V)	Moving velocity of lunar
	(Q)	Curvature of lunar
	(R)	Turning velocity of lunar
	(E)	Teleoperation mode of lunar
	(T_y)	Earth-Moon delay time
	(T)	Predicting time
Outputs	(X_T, Y_T)	Position of lunar
	(P_T)	Attitude of lunar

1. 初始化:
 - 1) 设置月球车初始位置 (X, Y, t) .
 - 2) 设置月球车初始偏航 (P, t) .
 - 3) 设置月球车开始运动时刻 (Ts_1) . $Ts_1 = \text{当前任务时} + 1\ 000\ 000$.
 - 4) 设置月球车停止运动时刻 (Ts_2) . $Ts_2 = Ts_1 + 100\ 000$.
2. 数据接收处理:
 - 1) 月球车位置 Y : 将 Y 值缓存.
 - 2) 月球车偏航 P : 将 P 值缓存.
 - 3) 月球车位置 X : 将 X 值、数据时间 t 以及 Y, P 赋值给 (X, Y, P, t) .
 - 4) 月球车开始运动时刻 Ts_1 .
 - 5) 月球车停止运动时刻 Ts_2 .
3. 画面刷新处理:
 - 1) 将 t, Ts_1, Ts_2 , 与 T 比较, 判断月球车处于正在运动状态或者停止运动状态.

2) 根据 1) 的结果进行处理.

a) 若月球车为停止状态, 将 (X, Y, P, t) 中的 t 更新为 T , 月球车状态输出 X_T, Y_T, P_T 为 X, Y, P .

b) 若月球车为正在运动状态, 根据 t, T_{s1}, T 三者计算自 t 至 T 时间段内月球车运动的时间 Δt , 在 (X, Y, P, t) 基础上, 按照设置的月球车运动速度、曲率、转向速度进行外推 Δt 内的变化, 获得输出 X_T, Y_T, P_T .

3) 根据 X_T, Y_T, P_T , 重新绘制三维输出画面.

利用上述算法, 可对月球车控制时刻的状态进行预测, 避免地月通讯延迟的影响.

3.3 月面巡视仿真

根据月面三维地形环境以及位置姿态等数据, 在手控设备的控制下, 对月球车在月面的运动进行仿真, 真实地模拟其运动过程^[10]. 月球车行驶在凹凸不平的松软月面之上, 月面几何结构和物理属性对于月球车的运行性能有至关重要影响作用, 需要在多刚体运动学、动力学基础上, 分析月球车物理模型的特点和月球车车轮与月面之间的作用关系, 采用基于约束的多体动力学方法建立一个融合月面环境的月球车动力学模型, 对月球车在月面的行进过程进行仿真^[5,6]. 计算出月球车所在的位置与航向角, 将这一位置与航向角映射到三维环境中的三维月球车模型上得到. 为了逼真地显现月球车月面行走的过程, 还需要通过求解逆运动学问题得到月球车的位形信息. 月球车的位形信息包括车体的俯仰角、横滚角、航向角、各大小摇臂转角.

为了使虚拟环境真实可靠, 虚拟月球车要具备客观的物理属性. 虚拟环境的物理属性可以用微分方程来描述, 从而构成动力学系统. 虚拟环境的动力学仿真必须可靠、无缝、自动、实时地运行. 在建模的范围内, 任何可能发生的情况必须正确处理. 在月球车地面模拟和仿真系统中, 动力学仿真主要涉及到月球车的运动模拟、月球车对控制指令的响应、月球车在不同的地形地貌上的运动响应等. 月球环境的显著特点是微重力和高真空. 这些特点不仅影响到月球车的运动, 同时还影响到月球上的原有物体. 这些物体又和月球车相互作用, 从而产生动力学仿真中很重要的一个问题就是碰撞检测. 碰撞检测的处理通常是通过检测每次修改位置时的物体重叠状况. 如果发现重叠, 就发出碰撞信号, 系统状态就返回碰撞的时刻, 碰撞响应就计算并进行. 为了完成动力学仿真, 首先在理论上建立月球车的动力学模型; 其次建立月球车在月球表面运动的动力学模型; 然后在虚拟月球地形地貌和虚拟月球车的创建过程中, 通过各个物体对象的属性来设置各个对象动力学模型的加载. 通过地面模拟和仿真系统的其它软硬件部分的配合, 最后, 完整实现月球车动力学的仿真.

3.4 三维视景仿真

三维实景仿真根据月面巡视仿真得到的月球车位置、姿态、轮系状态数据, 模拟月球车在月面的场景, 以三维画面的方式进行展示, 为地面控制人员提供任务状态感知途径, 是地面控制人员操作手控设备、进行在线控制的基础. 三维视景仿真画面中除展示月面三维地形、月球车在地形中的位置姿态、轮系状态等实景外, 还需重点展示地面控制人员进行操作控制所需的分析、预示信息. 包括如下几个方面:

1. 月面地形环境

月球车在月面巡视, 需要对月面三维地形环境进行可视化, 展示月球车周围地形环境. 首先对月面地形文件进行解析, 读取月面三维地形数据, 然后利用计算机三维处理技术对地形进行可视化. 一

般三维地形信息包含一个区域内地形的高程信息以及该区域的经纬度信息, 其表示形式主要有 2 类: 规则网格和不规则三角网。规则网格存储一定间隔的点的高程信息, 具有读取方便、压缩率高、快速定位等特点, 而不规则三角网能表示更复杂的地形, 并且易于对地形进行各种处理, 一般采用规则网格的形式对大面积三维地形信息进行储存。读取一个区域内月面三维地形后, 建立二维数组存储地形采样点的高程值。根据高程值, 计算每个采样顶点的颜色、法向量。

顶点颜色计算: 首先遍历地形, 找出最大高程和最小高程, 对最大高程指定一种颜色, 最小高程指定另一种颜色, 然后对每个顶点, 根据其高程值求得其对应颜色, 作为该顶点显示颜色。这样, 通过颜色就能直观地表现地形的高低起伏。

法向量: 对一个顶点, 找出其周围 8 邻域顶点, 计算 8 邻域顶点所形成的面的法向量, 作为该顶点的法向量。法向量在地形三维可视化中意义重大, 表示了该点以及周围区域的朝向, 在光照条件下, 能反映地形受光情况。

可以颜色映射和纹理贴图两种方式进行地形的显示, 其中颜色映射方式能更直观地突出展示月面高低起伏状态, 纹理贴图方式更为真实。

2. 月球车状态

月球车主要结构由结构本体和 +Y 太阳翼、桅杆、机械臂、移动分系统等活动部件组成。结构本体为方形, 是月球车的主体, 其它活动部件附着于结构本体上。月球车需展示的状态包括月球车在三维月面环境中的位置、姿态, 以及轮系结构中车轮转向角度、滚动角度等。

通过对月球车进行三维建模, 获得月球车的几何结构和外观信息。由于月球车为多刚体结构, 活动机构之间具有相对运动, 且活动机构之间在结构上存在依赖关系, 因此需要对月球车的各活动机构进行有效组织, 根据其附属联动关系, 采用树结构进行表示, 并在对其机构间相对运动的处理时, 利用各自的状态数据进行驱动, 从而展示整个月球车的运动状态。

3. 预示路径

在操作过程中, 运用计算机的处理能力, 根据设置的运动参数, 将月球车未来一段时间内的运动路径计算并显示在三维地形环境中, 直观地展示该路径是否会与月面障碍存在冲突, 从而使地面操作人员能够及时评估控制策略并进行必要的调整。

4. 统计分析数据

对本次操作过程的数据进行统计分析显示, 例如行走里程、平均速度、转向总角度等, 帮助地面操作人员进行决策。

3.5 遥控注入

根据手控设备输出值, 计算出移动曲率、里程、移动时间等注入数据所需的参数; 根据移动路径生成及拟合输出的路径曲率及原地转弯角度, 计算生成月球车车轮的控制参数, 包括移动时间 (或里程), 每个轮子的转角、速度、控制模式等。根据上述参数, 生成注入数据帧, 并通知遥控软件实施上行控制, 控制月球车移动。

4 实验结果

实验中, 利用本文方法对月球车进行了远程行走控制。实验系统主要包括: 实时控制系统、月球车、远程模拟月面, 在本地构建实时控制系统, 在远程构建模拟月面实验场地, 控制月球车在模拟月面

图 5 月面模拟实验场地的月面三维地形

Figure 5 The DEM of the Moon surface in our experiment

行进. 具体设置如下:

1) 实时控制系统

包括手控驾驶设备、计算机系统和网络传输系统. 手控驾驶设备采用方向盘的形式, 设置行进的速度、曲率等参数, 并发出前进和停止信号; 计算机系统采集手控驾驶设备的控制信号, 并接收远程月球车遥测数据, 根据本文方法进行预测显示, 对月面工作状态进行视景仿真, 为操作者提供控制平台, 并向月球车发送控制信号, CPU 主频为 2 GHz, 内存 4 GB, 显卡为 NVIDIA Quadra 专业图形显卡, 网络传输系统为本地控制系统和远程月球车之间的信息传输通道, 可模拟地月传输信号的通信延时.

2) 远程模拟月面环境

根据目前掌握的月面环境构建了模拟实验场地, 包括月壤特性、月面低重力环境、月坑石块密度等, 尽可能逼近真实月面. 实验中, 模拟的月面环境为 30 米 $\times$ 30 米范围, 以平坦为主, 并存在陨石坑和散落的石块, 符合文献 [14, 15] 中的密度分布. 图 5 为对模拟月面试验场地进行局部三维地形恢复的结果.

3) 月球车

月球车为轮式移动方式, 具备前进、后退、原地转向 3 种移动方式, 可通过其车载立体感知相机获取周围环境图像.

在试验中, 月球车初始状态设置于模拟月面场地 (0,0) 坐标位置, 姿态偏航角度为 90° . 月球车利用立体相机对周围场地进行感知, 影像数据传送至控制中心, 经处理后恢复周围三维地形信息. 在此基础上, 实时控制系统装载恢复的地形和月球车坐标姿态信息, 对地形环境、月球车位置姿态进行视景仿真, 形成月球车虚拟现实系统, 即可利用方向盘操作设备进行月球车的行进控制.

通过方向盘设置运动模式为直接行走模式, 并利用旋转方向盘设置路线曲率. 如图 6 所示, 设置曲率时, 系统对预示路径进行预示, 可直观地反映路线与障碍物的关系, 帮助控制人员快速调整路线.

设置好曲率和速度后, 利用操作推杆控制月球车前进、后退和停止. 在运行过程中, 会实时显示预示路径, 若路径上存在障碍物, 控制人员可及时终止, 并调整路线. 图 7 中, 右边插三角旗的位置为月球车初始位置, 黑色粗线为月球车运行的车辙, 通过直线前进、原地转向以及曲率前进 3 个操作单元到达当前状态.

利用本方法在地面模拟的场地上进行了月球车运动控制试验, 月面信号传至地面的时延设置为 1.8 秒, 地面控制命令到达月球车的时延设置为 2.5 秒左右, 共进行了 4 次按照设置曲率行进实验, 预测显示的月球车位置与控制结束月球车实际位置的控制误差如表 2 所示:

图 6 月球车预示路径标示

Figure 6 The auxiliary line which indicates the future tracks

图 7 月球车月面巡视在线控制操作界面

Figure 7 The operating interface of the system

表 2 预测显示实验结果

Table 2 The prediction display results of the experiments

	Curvature	Velocity (m/s)	Last time (s)	Accuracy (m)
1	0.0	0.0667	30	0.12
2	0.0	0.0667	45	0.09
3	0.01	0.0667	30	0.14
4	-0.01	0.0667	40	0.11

从实验中可以看出, 基于虚拟现实技术, 利用手控设备可以快速直观地设置月球车的路径, 相比于传统路径规划与“一步一动”的控制方式, 本文的方式能实时控制月球车的行进路线, 在此过程中, 能方便地判断路线与障碍物的距离, 及时进行应急控制, 具有较高的控制效率和安全性. 后期还需要进行遥控注入、在线控制方面的实验. 通过实际将手控设备的控制指令注入月球车, 监视月球车实际运行情况, 比较真实月球车与虚拟现实月球车巡视仿真之间的时延大小, 论证其对远程控制的影响, 并比较两者之间的状态差异, 改进月球车巡视仿真的真实性, 提高系统可靠性.

5 结论

近年来, 月球探测技术得到了进一步的发展, 由于月面地形环境的复杂性以及地月通讯延迟问题, 进行月球车的月面控制是其中最具挑战性的课题. 利用虚拟现实技术, 建立月球车在线控制系统, 以地面仿真为基础, 利用手控设备, 直观、实时地控制月球车在月面的行进, 减少了地面控制时众多的中间环节, 缩短了决策时间, 提高了控制效率, 增强了危险情况下的应急处理能力, 是未来空间探测无人车遥操作技术的一个发展方向.

参考文献

- 1 Schebor F S, Turney J L. Realistic and consistent telerobotics simulation. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Charlottesville, 1991. 889–894
- 2 Mazuryk T, Gervautz M. Virtual Reality History, Applications, Technology and Future. Technical Report. 1996
- 3 Ellery A. Environment-robot interaction-the basis for mobility in planetary micro-rovers. *Robot Auton Syst*, 2004, 7: 1–10
- 4 Yen J, Jain A, Balaram J. ROAMS: rover analysis modeling and simulation. *Robot Automat Space*, 1999, 440: 249–254
- 5 Backes P G, Norris J S, Powell M W, et al. Multi-mission activity planning for mars lander and rover mission. In: Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2004. 877–886
- 6 Okada T, Sasaki S, Sugihara T, et al. Lander and rover exploration on the lunar surface: a study for SELENE-B mission. *Adv Space Res*, 2006, 37: 88–92
- 7 Tarokh M, McDermott G, Hayati S, et al. Kinematic modeling of a high mobility mars rover. In: Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, 1999: 992–998
- 8 Olson C F, Matthies L H, Schoppers M, et al. Rover navigation using stereo ego-motion. *Robot Auton Syst*, 2003, 43: 215–229
- 9 Kubota T, Kuroda Y, Kunii Y, et al. Small, light-weight rover “Micro5” for lunar exploration. *Acta Astronaut*, 2003, 52: 447–453
- 10 Ishigami G, Nagatani K, Yoshida K. Path planning for planetary exploration rovers and its evaluation based on wheel slip dynamics. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, 2007. 2361–2366
- 11 Bekker M G. Introduction to terrain-vehicle systems. Michigan: University of Michigan Press, 1969
- 12 Kamon I, Rivlin E, Rimon E. A new range-sensor based globally convergent navigation algorithm for mobile robots. In: Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, 1996. 429–435
- 13 Krotkov E, Simmons R, Cozman F, et al. Safeguarded teleoperation for lunar rovers. In: Proceedings of International Conference on Environmental Systems Monterey, California, 1996. 265–270
- 14 Zhang W, Dang Z L, Jia Y. Research on digital lunar terrain construction. *Spacecraft Environ Eng*, 2008, 25: 35–40 [张伍, 党兆龙, 贾阳. 月面数字地形构造方法研究. *航天器环境工程*, 2008, 25: 35–40]
- 15 Shi M P, Wu J, Li Y. A multi-constrained world modeling method in lunar rover path-planning. *J Nation Univer Defense Technol*, 2006, 28: 108–112 [史美萍, 吴军, 李焱. 面向月球车路径规划的多约束环境建模方法. *国防科学技术大学学报*, 2006, 28: 108–112]

On real-time teleoperation of lunar rover

YANG Cheng^{1*}, SONG Jun¹, SUN Jun¹, MIAO Yi¹, ZHANG Wei¹, SHE JiaHong² & DU Hui³

¹ *Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;*

² *China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China;*

³ *China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100094, China*

*E-mail: yangchenug@gmail.com

Abstract An online control platform was built based on virtual reality technology to control an unmanned lunar rover exploring the moon surface. 3-D topographic features of the lunar surface can be perceived and reconstructed with pictures taken by stereo cameras onboard the lunar rover. Combined with the telemetry data, a virtual full scene of the mission can be generated. Based on the terrain analysis, future probe points can be selected and path planning extracted. In particular, the future control plan for the rover can be visually verified. When the rover moves on the ground or probes some interesting rocks using its manipulator system, the whole process can be monitored in real time. Intervention commands can be transmitted to the rover at any time when necessary to change the control plan. Using a joystick or wheel, the rover on the moon can be controlled similarly to playing a racing car game. This online control platform can greatly improve the effectiveness and safety of teleoperation.

Keywords virtual reality, predictive display, lunar rover, teleoperation, space exploration

YANG Cheng was born in 1982. He received his B.S. in Mathematics in 2004, and his Ph.D. in Computer Science in 2009, from Peking University. His research interests include pattern recognition, machine learning and biometrics. He is currently an engineer at the Beijing Aerospace Control Center, and is engaged in aerospace TT&C and visualization.