嫦娥三号巡视器遥操作系统设计与实现

贾阳, 张建利, 李群智*, 申振荣, 吴克, 彭松, 温博, 张香燕, 李清毅

中国空间技术研究院总体部, 北京 100094

* E-mail: liqunzhi78olive@139.com

收稿日期: 2014-02-12; 接受日期: 2014-03-22

国家中长期科技发展规划重大专项资助项目

摘要 巡视器月面运行过程是一个器地交互、地面持续支持的过程, 与国内以往航天器在轨测控工作模式有着明显的不同, 技术难度大, 具有距离远、任务复杂(模式多、约束多)、探测环境非结构化、地面任务支持频繁且持续时间长、需要进行伴飞仿真模拟验证等特点。设计一种与巡视任务相匹配的在轨运行操作新模式是必须解决的问题。本文从巡视器遥操作系统国内外发展现状、遥操作系统特点、系统设计、系统实现与在轨验证 4 个方面介绍巡视器遥操作系统设计与实现情况。地面任务支持与遥操作系统的研究与开发, 也可以称之为遥操作技术的研究, 主要包括绝对定位、相对定位、图像融合、任务规划、机构规划、移动里程、路径规划等技术。“主控规范、定位准确、图像清晰、规划到位、验证充分”, 是该系统在轨工作的核心任务目标。

关键词

嫦娥三号巡视器
地面遥操作
系统设计
月面在轨试验

1 引言

巡视器月面运行过程是一个器地交互、地面持续支持的过程, 与国内以往航天器在轨测控工作模式有着明显的不同, 技术难度大, 具有距离远、任务复杂(模式多、约束多)、探测环境非结构化、地面任务支持频繁且持续时间长、需要进行伴飞仿真模拟验证等特点^[1]。设计一种与巡视任务相匹配的在轨运行操作新模式是必须解决的问题。为此, 必须开发出满足月面巡视任务的地面任务支持与遥操作系统^[2], 为巡视器顺利开展月面巡视勘察任务扫清了障碍。

巡视器地面任务支持与遥操作系统的研究与开发, 也可以称之为遥操作技术的研究, 主要包括绝对定位、相对定位、图像融合、任务整体与探测周期规划、机构(桅杆、太阳翼、机械臂、移动装置)规划、

移动里程绘制与综合比较、路径规划、数学与物理仿真验证等核心技术。

本文从巡视器遥操作系统国内外发展现状、遥操作系统特点、系统设计、系统实现与在轨验证 4 个方面介绍巡视器遥操作系统的设计与实现情况。

2 巡视器遥操作系统国内外发展现状

迄今为止, 在近 50 年的时间里, 成功发射到月球和火星表面并进行巡视探测的巡视器共有 10 辆, 其中在月球上运行的巡视器有 6 辆, 火星上运行的巡视器有 4 辆; 按国家划分, 中国有 1 辆, 苏联有 2 辆, 美国有 7 辆。这 10 辆巡视器的地面支持系统各有不同, 归纳为如下几种。

引用格式: 贾阳, 张建利, 李群智, 等. 嫦娥三号巡视器遥操作系统设计与实现. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 470–482

Jia Y, Zhang J L, Li Q Z, et al. Design and realization for teleoperation system of the Chang'E-3 rover (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 470–482, doi: 10.1360/092014-49

1) 苏联月面巡视器 Lunokhod 的遥操作

苏联于 1970 年 11 月发射的巡视器 Lunokhod 1 (月球车 1 号), 以及 1973 年 01 月发射的巡视器 Lunokhod 2 (月球车 2 号), 控制模式为地面遥操作模式. 以不同摄像头形成的小画幅图像作为参考, 通过飞控中心的远程控制系统实现月面巡视器沿月表运动的控制, 其中障碍辨别、确定到障碍的距离、分析道路可穿越性和月面巡视器运动控制等操作由地面遥控组的成员共同完成. 地面遥控组由地面 5 人操作, 包括: 指挥员、驾驶员、领航员、定向天线操作员和参数分析工程师.

Lunokhod 遥操作的特点如下. 遥操作工程师基本完成巡视器的所有控制, 巡视器基本没有自主能力; 遥操作者未直接感知运动过程; 与直接观测相比按照电视屏幕感知地形有难度; 接收和传输电视图像以及遥测信息具有时间的延迟.

2) 美国载人月面巡视器 LRV 的遥操作

阿波罗计划中分别在 Apollo 15 (1971 年 07 月)、Apollo 16 (1972 年 04 月) 和 Apollo 17 (1972 年 12 月) 中采用载人月面巡视器 (Lunar Roving Vehicle, LRV), 是由宇航员操纵, 属于有人参与、用于运输目的的巡视器^[3]. 地面任务控制中心分为 3 个基本的小组, 包括任务指令与控制、系统操作和状态监测, 每个小组都有从事数据检测和分析的支持小组. 此外, 还有空间环境、航天器规划与分析、控制的恢复和月球表面试验支持小组等. 在月面运行期间, 巡视器的控制由航天员操作手动控制器来实现.

这种载人的月面巡视器, 由航天员直接控制, 即地面或指令舱与巡视器的通讯或遥操作都是通过航天员来直接做出回应, 因此受遥操作技术的局限性的影响比较小.

3) 美国火星巡视器 Sojourner 的遥操作

美国火星探路者项目 Pathfinder 使用的巡视器 Sojourner (索杰纳), 于 1996 年 12 月发射, 控制模式采用遥操作加半自主模式^[4]. 由于火星与地球之间通信存在较大的时延, 因此, 相对于月球巡视器, 对火星巡视器的自主性有更高的要求. Sojourner 以“启动—停止”的方式工作, 其半自主能力主要体现在自主地形穿越、突发事件处理和资源管理 3 个方面. 着陆器与地球之间的通信每天进行 2 次, 每次 2 h. 巡视器的指令和遥测分析是由地面巡视器控制工作站完成的. 当巡视器每天工作结束时, 地面科学家小组利

用巡视器和着陆器拍摄的图像, 指定巡视器下一步运动区域内的目标位置、巡视器自身定位、障碍检测和路径选择.

巡视器 Sojourner 遥操作的特点主要有以下几点. 地球和火星之间的时延使遥操作者不能实时控制 Sojourner. 巡视器通过着陆器与地面进行周期性的通信, 巡视器仅执行简单的命令序列. 巡视器的自主能力较低, 可以自主地穿越火星表面简单的地形到达遥操作者指定的位置. 地面遥操作和巡视器一定自主性的结合, 使大延时的遥操作成为可能.

4) 美国火星巡视器 MER 的遥操作

美国火星探测项目 MER 中使用巡视器勇气号 (Spirit, 2003 年 6 月) 和机遇号 (Opportunity, 2003 年 7 月), 主要工作模式是长距离自主导航加遥操作^[5]. 具体来说, 巡视器 MER 的任务执行模式是以每个火星日为周期来开展的. 早晨发送的命令序列基于前一天传回的图像和数据, 由地面遥操作科学家小组完成, 专门用于当天火星日的活动; 活动结束后, 巡视器将获得的图像和数据传回地面. 每个火星日的活动时间大约为 4 h, 一般集中在中午时分. 巡视器的工作模式有遥操作 (人为直接控制) 和自主控制两种, 取决于具体的任务和地表地形. 为了开发每个巡视器的能力, 地面 MER 专家小组分成 2 个完全独立的小组来接受和分析数据、确定科学探测策略、上传运动和仪器设备动作命令, 解决巡视器行进过程中出现的任何问题.

MER 巡视器遥操作的特点主要有以下几点. 巡视器 MER 的自主性实现了火星和地球之间大时延的遥操作, 解决了数小时的无人监测、复杂地形的运动控制和远程遥操作无法实现的问题. 巡视器 MER 的任务执行模式是以每个火星日为周期来开展的, 其执行的任务只能根据巡视器传回的图像和数据来进行下一步的规划.

5) 美国火星巡视器 MSL 的遥操作

美国火星巡视器 MSL (好奇号, 2011 年 11 月), 主要工作模式是长距离自主导航加遥操作^[6].

美国火星巡视器 MSL 遥操作的主要特点: 一方面, 器上有强大的空间在轨软件维护能力, 可通过遥操作将地面软件更新到器上, 比如使 MSL 的工作模式由飞行状态转换到火星工作状态. 火星工作状态能够使 MSL 在火星的表面上行驶. 另一方面, 器上自主能力强, 有强大的系统执行效率以及对配置的

优化认识. MSL 在火星行走时所进行的高效路径规划决策, 以及在采样过程中对机构的精准控制, 由器上自主完成.

6) 中国月面巡视器“玉兔号”的遥操作

中国空间技术研究院联合国内科研机构与高校, 通过近 10 年开展月面巡视探测器研制(玉兔号, 2013 年 12 月)工作, 完成了巡视器的遥操作技术的攻关, 开发出任务支持与遥操作系统, 采用地面遥操作与器上自主相结合的方式, 成功支持了巡视器月面的在轨运行.

7) 小结

MSL, MER 和玉兔号的遥操作和自主能力水平较高, 可以完成比较复杂的科学探测任务, 而 Sojourner 的遥操作和自主能力都较低. Lunokhod 采用基于视频的遥操作系统, 实时分析、实时控制, 消耗的人力资源较多, 效率也较低, 缺少局部的自主安全保障.

综上所述, 针对月球通信时延并不是很大的特点, 充分利用地面支持系统较强的处理能力, 以及地面操作人员的经验, 发挥人机结合的优势, 提高巡视器的探测效率, 保证巡视器的安全, 是地面任务支持与遥操作系统设计的重点.

3 嫦娥三号巡视器遥操作系统特点

国外深空探测相关的实践经验表明, 巡视器工作在月面的非结构化环境下, 预先对其所处的月面工作环境基本未知或仅有部分了解, 而且巡视器的巡视探测过程(主要指移动探测过程和机械臂就位探测过程), 是一个器地交互逐步完成的过程, 不仅需要地面能够在规定的时限下, 在逐步获取感知信息的基础上完成规划与仿真验证, 还要求巡视器有一定的自主能力, 以便能够高效、可靠地完成整个巡视探测任务, 因此, 巡视器在地面的操作有其自身的特点.

1) 巡视器月面运行过程与国内以往航天器在轨测控工作模式有着明显的不同.

巡视器月面运行过程是一个器地交互、地面持续支持的过程, 有时延, 技术难度大, 具有距离远、任务复杂(模式多、约束多)、探测环境非结构化、地面任务支持频繁且持续时间长、需要进行伴飞仿真模拟

验证等特点.

2) 地面需要获取月面图像数据与巡视器的状态感知信息, 进行二者的综合处理.

由于巡视器工作在月面非结构化环境下, 预先对此工作环境仅有粗略了解, 因此, 在巡视器的巡视探测过程中, 需要地面首先根据巡视器获取的环境感知信息(月面图像数据)进行处理, 从而得到巡视器周围的地形环境信息, 包括坡、坑、岩石等地形的三维信息, 以及巡视器到目标的距离、方位、坡度和坡向等信息. 同时, 地面需要获得巡视器的当前状态信息, 包括巡视器各仪器设备的温度、位姿信息、巡视器的轮系、主副摇臂与各机构的当前位姿等部分遥测信息.

3) 地面需要综合分析 with 规划, 生成控制指令.

巡视器的期望路径与对日定向充电、对地指向数传、移动探测、载荷就位探测等行为序列不可提前预知或预定, 需要在地面进行感知信息处理的基础上综合分析规划得到. 其中, 综合分析规划需要充分考虑巡视器的工作约束条件, 包括整器的功率平衡条件、通信遮挡情况、机构运动约束条件、机构运动对太阳电池阵的遮挡情况、光照条件、科学探测需求等, 以及太阳、地球和月球之间的星历关系、月表地形条件. 由此, 确定巡视器的航向和基本行为, 为巡视器规划提供方向指引和起始点、目标点, 在此基础上规划得出月面非结构化环境下的巡视器探测所需要的期望路径与行为序列, 并分解成运动控制指令, 操作控制巡视器实现月面巡视探测.

4) 控制指令需要经过仿真与验证.

为提高控制指令执行的可靠性, 最大程度上保证巡视器的安全, 需要将控制指令在仿真系统中进行验证, 故障时需要在物理仿真环境(室内试验场)下完成验证. 同时, 为保证器地交互完成巡视探测任务的效率, 仿真验证需要加速进行.

此外, 巡视器在月面非结构化环境下行驶, 地面分析规划所得控制指令的准确度受地面获取的巡视器环境感知信息、状态信息以及对两者进行综合处理得到信息的准确度和精度的影响. 因此, 在月面地形复杂的情况下, 完全依靠地面的支持完成巡视器的巡视探测过程存在潜在的危险, 需要巡视器自身具有自主避障、自主急停和安全监测等自主能力.

4 嫦娥三号巡视器遥操作系统设计

4.1 功能与组成

地面任务支持与遥操作系统由主控系统、任务决策系统、导航控制系统、控制指令生成系统、仿真验证系统组成, 主要功能包括:

- 1) 能够接收巡视器的工程遥测数据、工程图像数据和科学探测数据; 能够进行数据的处理、存储、查询、分发与管理等操作。
- 2) 能够获取不同相机的图像数据, 完成图像处理; 生成月面地形图; 实现巡视器在巡视区内的定位。
- 3) 能够完成巡视区不同范围内的任务规划, 确定巡视器不同位置的基本工作模式, 生成任务行为序列。
- 4) 能够完成巡视器的全局环境感知、全局路径规划与运动控制, 在任务规划的指导下, 生成控制指令序列, 完成巡视器的遥操作与控制工作。
- 5) 能够完成控制指令的定序与确认, 生成控制指令数据包。

指令数据包。

6) 具有仿真系统, 能够支持巡视器在轨同步验证的需求; 能够提供仿真分析与验证的手段, 支持正常情况下巡视器控制策略(主要包括任务行为序列和控制指令序列)的仿真验证需求, 支持异常情况下巡视器故障解决策略的仿真验证。

7) 具有室内试验场, 能够支持巡视器地面任务支持与遥操作系统的内场试验需求; 能够支持巡视器地面综合测试中的内场综合试验; 在巡视器在轨运行过程中, 能够实现异常与故障复现, 对故障策略进行内场试验验证, 辅助完成新的控制策略的制定。

8) 能够自成闭环, 支持本系统自身的仿真验证。

9) 能够为地面操作人员提供模拟训练的平台。

4.2 系统框架

巡视器任务支持与遥操作系统的框架如图 1 所示, 系统框架表示系统各组成部分之间的基本关系和基本工作流程, 同时适用于工程研制阶段和在轨飞行阶段。

图 1 巡视器任务支持与遥操作系统框架图

在轨运行阶段, 该系统首先通过地面测控中心和地面应用中心获取遥测和数传数据, 由主控系统接收后, 发送遥测数传数据到任务决策系统等, 同时获取导航控制系统中全局环境感知单元的处理结果, 得到任务行为序列后发送到导航控制系统, 得出巡视器的控制指令序列; 无需验证的控制指令直接发送到控制指令生成系统, 待验证的控制指令经仿真验证系统验证后发送到控制指令生成系统; 其中, 任务决策系统和导航控制系统处理后得到的图像和数据产品, 发送到仿真验证系统供建模使用; 最后, 控制指令序列经控制指令生成系统定序、确认后, 得到最终的控制指令序列, 通过地面测控中心发送遥控指令或数据注入上行, 由巡视器接收并执行。

在系统自身的仿真验证阶段, 由于仿真验证系统中含有巡视器仿真和物理模型, 因此, 可以模拟发送遥测和数传数据, 模拟接收遥控指令, 对巡视器任务支持与遥操作系统的整个操作过程, 用数字或物理模型进行系统的自身验证。

此外, 还需要说明的是, 任务决策系统需要科学家提供科学探测需求, 包括科学探测目标点和科学探测行为序列。

4.3 操作实施流程

由巡视器在月面进行巡视探测的特点可知, 巡视器器地一体化一次工作循环的操作实施流程如图2所示。

操作实施过程简述如下:

1) 根据着陆器降落相机图像和巡视器首次获得的图像进行图像融合, 获取巡视区的月面地形图; 同

时根据上述信息进行着陆点的定位处理, 获取着陆点的位置(落月后开展一次即可)。

2) 根据巡视区的月面地形信息和着陆点位置、科学探测需求, 综合考虑星历、光照条件、通信条件、热控约束、功率约束等因素, 完成任务整体规划、探测周期规划, 生成期望行驶路线及相应行为序列。

3) 根据期望行驶路线点以及巡视器相机图像数据和相关状态量, 进行导航单元规划, 生成控制策略, 巡视器按照此策略进行移动。

4) 同时根据巡视器相机图像数据和相关状态量, 完成巡视器的相对定位, 并在月面地形图显示, 形成行驶路线图(基于图像)。

5) 根据巡视器的遥测工程值, 进行巡视器移动里程计算, 并在月面地形图上显示, 形成行驶路线图(基于遥测)。

6) 根据巡视器相机图像数据和相关状态量, 进行机械臂投放规划, 生成控制策略, 机械臂按照此策略进行投放, 辅助粒子激发 X 射线谱仪完成科学探测。

7) 根据星历、巡视器位置和姿态, 进行机构规划(桅杆和+Y 太阳翼), 生成控制策略, 完成定向天线对地指向数传和+Y 太阳翼对日定向充电。

8) 根据巡视器相机图像数据, 对月面地形图进行融合处理, 及时更新月面地形图。

9) 对生成的控制策略进行数学、物理仿真验证。

10) 在巡视器故障情况下, 地面采用数学或物理仿真模拟巡视器故障情况, 并制定排故策略。

11) 对月面地形图和行驶路线图进行可视化显示。

图2 器地一体化一次工作循环的操作实施流程

4.4 核心技术

在巡视器任务支持与遥操作系统的设计过程中, 需要重点解决的核心技术, 主要包括以下几个方面:

- 1) 绝对定位技术;
- 2) 相对定位技术;
- 3) 图像融合技术;
- 4) 任务整体与探测周期规划技术;
- 5) 机构(桅杆、太阳翼、机械臂、移动装置)规划技术;
- 6) 移动里程绘制与综合比较技术;
- 7) 路径规划技术;
- 8) 数学与物理仿真验证技术.

5 巡视器遥操作系统实现与在轨验证

基于巡视器任务支持与遥操作系统的设计, 该系统的软硬件平台建设完成. 2013 年 12 月 14 日到 2014 年 2 月 24 日, 嫦娥三号巡视器任务支持与遥操作系统圆满完成巡视器月面测试段、月面工作段以及两器分离、两器互拍阶段的所有工作.

5.1 主控系统

主控系统主要负责对所有巡视器遥操作系统的数据处理、图像处理、任务规划等软件和运行环境等进行统一管理, 完成遥操作系统任务的自动化执行、

规划过程的调度与管理、图像、规划和分析等数据的管理, 任务规划报告的自动生成等功能.

主控系统的界面示意图如图 3 所示.

5.2 任务决策系统

任务决策系统是地面任务支持与遥操作系统的核心系统, 主要完成巡视器的位置确定、图像融合、综合规划、移动里程绘制等工作, 生成巡视器任务整体规划、探测周期规划、导航单元规划、桅杆对地指向规划、太阳翼对日定向规划、机械臂就位探测规划等执行策略.

5.2.1 绝对定位模块

降落影像在深空探测任务中有着非常重要的作用, 美国的“勇气号”和“机遇号”火星车在 2004 年成功登陆火星任务中, 利用降落影像运动估计系统实现了降落过程水平速度估计与定位^[7].

嫦娥三号软着陆任务中, 着陆器携带的降落相机获取了降落影像序列, 图像质量清晰连续, 为着陆点精确定位提供了保障. 遥操作系统中着陆器的初始定位环节使用降落影像, 利用 sift 特征匹配^[8]、基于地面相对水平假设的仿射变换^[9]和图像镶嵌的方法实现了降落影像序列与嫦娥二号获取的月理地形图的精配准, 从而得到着陆器的精确位置坐标信息. 定位过程的流程图如图 4 所示.

图 3 主控系统界面示意图

图 4 基于降落影像的初始定位流程图

为直观展示基于降落影像的初始定位效果, 选取的一组镶嵌图, 如图 5 所示, 图中选用 7 幅典型高度处的降落影像, 并给出了镶嵌后对应在嫦娥二号 DOM 影像中配准的位置. 图中红色标示点位即是着陆器最终降落点的图上位置.

5.2.2 相对定位模块

目前, 应用于深空巡视探测器的定位方法有多种^[10], 各种方法各有优劣. 其中, 图像光束法平差技

图 5 与嫦娥二号 DOM(a)配准及降落影像镶嵌结果(b)示意图

术^[11], 综合考虑了巡视器的特点, 利用巡视器移动过程中的图像信息, 以及轨道器影像、着陆影像进行联合定位.

以“玉兔号”巡视器为例, 在轨移动时里程计、惯性导航系统协同工作, 可获取相机成像时刻巡视器的摄站姿态信息. 随着里程计、惯性导航系统的系统误差累积, 以及受到巡视器车轮打滑等因素的影响, 巡视器遥测位置信息精度下降. 因此, 本文提出了基于巡视器立体图像的导航定位算法. 巡视器立体图像定位流程示意图, 如图 6 所示. 同传统的仅在前后 2 摄站立体图像间进行定位计算的视觉测程法(MER 任务中采用的火星车立体视觉定位方法)相比, 新算法具有以下优点. 不需要巡视器的位姿遥测数据等先验知识, 避免了视觉测程法中光束法平差方程式的构造和迭代计算, 计算简单快捷; 对立体相机的相对方位元素重新进行了计算, 避免受到环境、着陆冲击等因素的影响发生变化时, 仍采用地面检校值导致定位精度降低的情况; 对巡视器相机大角度立体模型的几何计算具有较强的适应性, 解算稳定.

5.2.3 图像融合模块

基于立体相机影像的三维地形重建一般采用双目立体视觉的方法, 基于匹配得到的密集同名点进

图 6 巡视器立体图像导航定位流程示意图

行二维到三维的空间变换,然而月表照度低、纹理信息贫乏等因素的存在,使得现有方法不能满足当前需求.

为解决巡视器导航/全景相机月面立体像对间的连接点高准确度自动匹配、大差异拍摄角状态下站点间影像的拼接等高精度三维地形重建相关技术难点,在动态规划匹配算法上进行了改进,提出迭代式动态规划匹配算法,大幅提高了同名点匹配的准确度.同时,参考火星车定位方法^[12],提出了基于平差处理的多站点影像数据几何纠正及拼接方法,实现了月面地形高效、高精度的三维重建和多站点正射影像拼接.具体技术路线如图 7 所示.

巡视器在轨导航、全景相机月面立体像对单站与多站的融合结果,如图 8 所示,幅宽为 72 m (左右方向)×77 m (上下方向),向上为北.

5.2.4 任务规划模块

美国 MER, MSL 火星车地面操作系统中成功地应用了称为 MAPGEN 的火星车任务规划系统,采

用启发式引擎提高搜索速度,保证了火星探测任务的圆满完成^[13]. Carnegie Mellon 大学的 Hyperion 巡视器任务规划系统,英国的行星探测仿真分析系统 PANGU,也实现了任务规划.

巡视器任务规划采用基于“马赛格”障碍图的启发式规划方法,如图 9 所示,使其适应对任意航向约束的要求;谓词逻辑与约束规划理论是巡视器任务规划的基础理论,月面高程图与纹理图是巡视器任务规划系统的重要输入,在基于谓词逻辑的动作规划后,以动作的时间代价作为启发式优化的准则,进行巡视器移动路线的规划.

巡视器机构性能约束包含: +Y 翼控制运动约束、桅杆运动约束、全向通信天线约束(参见图 10)等. 巡视器测控与数传、能量供给由星历时、地面站部署、巡视器位姿共同确定. 巡视器任务规划功能矩阵如图 11 所示. 温控约束关系、通信可见性约束、太阳可见性约束、巡视器工作模式及动作间关系约束、+Y 翼运动角度限制、桅杆对太阳电池阵的遮挡、休眠条件、地面操作耗时等,在任务规划过程中均需要考虑.

图 7 (网络版彩图)月面巡视器影像处理技术路线图

图 8 月面巡视器图像融合图

图 9 启发式规划原理

5.2.5 机械臂规划模块

巡视器机械臂就位探测规划是一个 9 自由度的器载机械臂轨迹规划问题, 其中车体位姿有 6 个自由度, 机械臂有 3 个自由度. 器载机械臂就位探测规划是机械臂轨迹规划的一个难点. NASA 在 2012 年发表

图 10 全向天线遮挡分析示意图

图 11 巡视器任务规划功能矩阵

的技术简明报告中简单介绍了 Nesnas 和 Issa^[14]解决了火星车车载机械臂的就位探测规划问题.

“玉兔号”巡视器机械臂就位探测规划, 首先完成巡视器停泊位置估计, 在此过程中需要判别巡视器停泊时的安全性, 如车轮下是否存在障碍, 车厢下是否存在障碍, 巡视器是否在点云图内等。根据巡视器停泊的位置, 计算巡视器车轮轮面位置, 从而得到车轮下方点云数据, 根据车轮下方的点云数据可以近似估计巡视器停泊时的俯仰角与横滚角。巡视器就位探测规划功能矩阵如图 12 所示, 规划结果包含: 巡视器停泊位置、停泊姿态、机械臂展开动作序列等。

机械臂障碍检测问题,即虚拟传感器线段与障

碍三角形是否相交的问题. 碰撞检测时, 将机械臂杆件上分别固接虚拟传感器, 如图 13 所示. 每个传感器如同激光测距仪, 测量由发射点至接收点的距离, 若该激光线被障碍阻断, 则表明对应杆件与障碍碰撞.

5.2.6 移动里程绘制模块

基于地理信息系统框架开发的里程计算与显示软件在行星探测领域的应用在国外已有成熟先例。俄亥俄州立大学制图与地理信息系统实验室, 为了火星车的定位路径信息和地形制图产品的发布和管理, 开发了火星 WebGIS 系统^[15]。美国亚利桑那州立

图 12 巡视器就位探测功能矩阵

图 13 机械臂碰撞检测

大学火星航天基金会开发了用于存储管理大量火星探测数据的 WebGIS 网站 JMARS^[16].

里程计算与路径显示管理模块, 用于巡视器探测路径的数据管理和可视化等服务, 能够实现数据浏览, 加工处理, 为决策分析提供支持, 以及地形图产品的制作和发布等. 该模块针对数据属性, 进行了交叉式的数据管理模式. 分类依据包括, 时间属性分

类、栅格和矢量分类、实时和非实时分类、点线面分类、接收类和自生成类数依据等, 各类别间数据属性交叉关联. 第 1 个月昼巡视器的移动里程绘制, 如图 14 所示.

5.3 导航控制系统

在获取遥测、数传信息的基础上, 导航控制系统首先完成全局环境感知, 提取周围地形的数字高程模型, 再根据任务决策系统生成的任务行为序列, 进行全局路径规划和运动控制, 生成控制指令序列. 整个过程要求在一定的时间内完成, 而且该系统所包括的几个单元的工作内容一般需要依次执行, 不能并行完成.

5.4 控制指令生成系统

该系统将导航控制系统生成的控制指令序列转化为相应的控制指令, 其中, 无需验证的控制指令直

图 14 月面巡视器第 1 个月昼移动里程图

接生成控制指令数据包待用;待验证的控制指令经仿真验证系统验证后,生成控制指令数据包待用。

5.5 仿真验证系统

该系统主要包括数字仿真系统和物理仿真系统(含室内试验场)2 个方面的内容,用于实现控制指令的仿真验证;实现异常或故障模拟,对故障策略进行仿真和内场试验验证,辅助完成新的控制指令的制定。

5.5.1 数字仿真系统

为配合地面仿真验证的需求,开发高效的数字仿真模型,并研究加速仿真验证模块、虚拟环境的仿真建模模块和巡视器的故障仿真模块,完成遥操作地面仿真系统(图 15)的开发,既能满足巡视器研制阶段的需求,也适合巡视器的在轨运行。

5.5.2 物理仿真系统

物理仿真系统(图 16)服务于巡视器的试验验证

图 15 巡视器数学仿真模型

图 16 巡视器室内试验场

需求,如巡视器移动的试验验证,巡视器携带有效载荷的操作规划试验验证,并能够根据异常描述模拟异常或危险状态,对故障策略进行内场试验验证,辅助完成新的控制指令的制定。该系统还可以配合和支持室外试验场联合试验时的准备工作。

6 结论

嫦娥三号巡视器遥操作系统圆满完成了巡视器在轨月面测试段、工作段以及两器分离、两器互拍阶段的所有工作,突破并验证了基于视觉图像的巡视器绝对定位和相对定位、基于立体视觉的月面未知环境的三维恢复与重建、多约束多层次规划(任务规划、周期规划、导航规划)、多自由度机械臂就位探测规划、实时移动里程绘制等多项关键技术,实现了巡视器操控的半自动化,提高了地面操控的效率,确保了巡视器月面工作的安全,丰富了设计验证的手段,提升了深空型号探测器系统总体的设计、分析与仿真验证能力,为后续行星表面巡视器工程任务积累了经验,奠定了基础。

参考文献

- 1 孙泽洲,贾阳,张熹.嫦娥三号探测器技术进步与推动.中国科学:技术科学,2013,43(11):1186-1192
- 2 Li Q Z, Jia Y. Research on mission planning of teleoperation system of lunar rover. Global Lunar Conference. Beijing, 2010. 1-9
- 3 Yndon B. Apollo program summary report. National Aeronautics and Space Administration. Houston, Texas, 1975. 2-51
- 4 Washington R, Golden K, Bresina J, et al. Autonomous rovers for mars exploration. NASA Ames Research Center, MS 269-2, Moffett Field, CA 94035, 1999. 1-15
- 5 Maimone M, Biesiadecki J, Tunstel E, et al. Chapter 3: surface navigation and mobility intelligence on the mars exploration rovers. NASA Jet Propulsion Laboratory, USA, 2006. 45-69
- 6 Mars Exploration Rover Mission: Science. <http://marsrover.nasa.gov/science/goal1-results.html>. NASA, 2007-07-12, Retrieved 2010

- 7 Matthies L, Maimone M, Johnson A, et al. Computer vision on mars. *Int J Comput Vision*, 2007, 75: 67–92
- 8 Lowe D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int J Comput Vision*, 2004, 60: 91–110
- 9 Lee J J, Kim G Y. Robust estimation of camera homography using fuzzy RANSAC. In *ICCSA 07: International conference on computational science and its applications, Proceedings, Part I*, 2007. 992–1002
- 10 Shi D L, Ye P J, Jia Y. Study on Chinese lunar rover location methods. *Spacecraft Eng*, 2006, 15: 14–20
- 11 Di K, Xu F, Wang J, et al. Photogrammetric processing of rover imagery of the 2003 mars exploration rover mission. *J Photogramm Remote Sens*, 2008, 63: 181–201
- 12 Li R X, Di K C, Matthies L H, et al. Rover localization and landing-site mapping technology for the 2003 mars exploration rover mission. *Photogramm Eng Rem S*, 2004, 70: 77–90
- 13 Roland D P. Space mission operations DBMS. *Space Mission Challenges for Information Technology. 2nd IEEE International Conference*, 2006. 8–221
- 14 Fleder M, Nesnas I, Pivtoraiko M, et al. Autonomous rover traverse and precise arm placement on remotely designated argets. *Robotics and Automation (ICRA)*, 2011 IEEE International Conference, Shanghai, 2011. 2190–2197
- 15 Li R X, Di K C, Wang J, et al. A WebGIS for spatial data processing, analysis, and distribution for the MER 2003 mission. *Photogramm Eng Rem S*, 2007, 73: 671–680
- 16 Weiss-Mali M. JMARS: A GIS system for mars and other planets. *American Geophysical Union Fall Meeting, America*, 2005. 0169–0173

Design and realization for teleoperation system of the Chang'E-3 rover

JIA Yang, ZHANG JianLi, LI QunZhi, SHEN ZhenRong, WU Ke, PENG Song, WEN Bo, ZHANG XiangYan & LI QingYi

Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Lunar Rover operation is a complex and incessant progress which contains multi-interactions between the rover and ground teleoperation center. This challengeable remote control working model is obviously different from Chinese previous spacecrafts. The control model of the lunar rover has following features: long distance, complex tasks of multi-model and multi-constrains, un-repeatable, non-structural and un-predictable lunar environment, high frequency and long duration mission supporting operations, requirements of synchronous simulation etc. It is essential to design a novel operational model that matches the exploration mission of the lunar rover. This paper introduces the teleoperation system of the lunar rover by analyzing present situation of rover teleoperation in domestic and overseas, characteristics of rover teleoperation, system design, system implementation and on-orbit test. The teleoperation technology is composed of absolute positioning, relative positioning, image fusion, mission planning, mechanism planning, odometry and path planning.

Chang'E-3 lunar rover, ground teleoperation, system design, lunar on-orbit test

doi: 10.1360/092014-49