



月面采样机械臂遥操作仿真验证技术

杨成^{1,2*}, 李贵良², 冯晓萌², 刘传凯^{1,2}, 刘茜^{1,2}, 张弓^{1,2}

1. 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094;

2. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094

* E-mail: yangchenug@qq.com

收稿日期: 2021-06-16; 接受日期: 2021-09-01; 网络版发表日期: 2021-11-23

国家重点研发计划 (编号: 2020YFC2200902)项目资助

摘要 利用机械臂对月面表层月壤进行表取采样, 是进行月球原位探测的常用手段, 然而受限于探测器和机械臂自身的自主化程度, 采样操作过程需要在地面预先规划, 经验证后形成指令序列上注至探测器控制机械臂操作. 针对月面采样时间窗口紧、安全要求高、机械臂运动空间不规则的问题, 本文提出了一种新的三维结构层次化表征模型和基于新表征模型的采样操作仿真验证方法, 首先通过为三维部件设计顺序码, 将三维模型快速自动构建为三维树状结构, 实现对机械臂运动构型变化下的结构层次化动态表示; 其次基于层次包围盒与分离轴思想设计了由粗到细的高效碰撞检测策略, 实现了机械臂与探测器复杂外形的快速精确碰撞分析; 再次建立了采样铲与模拟月壤的交互模型, 通过对两类实体的简化接触模拟与铲挖交互仿真, 实现了采样前后的月面形态变化表征和采样量的近似评估. 最后通过实验结果验证了本文所述方法的有效性, 实现了对月面采样操作过程进行可视化仿真验证支持, 确保了机械臂操作的安全性和采样任务的高效性.

关键词 月面采样, 机械臂, 规划验证, 碰撞检测

1 引言

月球是距离地球最近的天体, 以其独特的空间位置、广阔的科学探索前景, 成为人类地外天体探测和资源利用的首选目标和持续选择^[1~3]. 月球土壤采样是宇宙探测活动的重要任务之一, 是实现对地外天体土壤物理化学性质的分析, 进而对宇宙空间环境、星球演化历史进行研究的前提. 月壤样品的采集返回是各航天大国研究月球的主要手段^[4,5]. 目前, 美国、苏联、中国都成功实现月面着陆, 并从月面采样返回地球. 美国通过6次载人登月任务, 共计获得了382 kg的

月球样品; 前苏联通过两次Luna任务, 获得了0.31 kg的月球样品; 我国在嫦娥5号采样返回任务中, 成功从月面获得了1.7 kg月球样品, 为我国开启了月球地质研究和宇宙起源探索的新纪元.

月面无人采样一般采用机械臂方式进行, 其中机械臂安装在月面着陆器上表面, 末端安装铲形采样装置, 具有结构细长简单、采样范围广的特点^[6,7]. 采样工作过程中, 首先由探测器相机对周围区域进行成像, 经分析后确定有价值 and 可行的采样区域; 然后由地面人员对机械臂进行规划, 控制机械臂各关节运动, 采样铲达到预定采样区域进行采样, 将月壤铲挖至采样

引用格式: 杨成, 李贵良, 冯晓萌, 等. 月面采样机械臂遥操作仿真验证技术. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1480–1491

Yang C, Li G L, Feng X M, et al. Simulation and verification technology for lunar sampling manipulator control (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 1480–1491, doi: 10.1360/SST-2021-0243

铲中. 最后通过机械臂运动, 将采样铲送至月壤收集容器上方, 打开采样铲将月壤放入收集容器内. 重复上述过程控制机械臂多次采样, 直至收集足够的月壤样品.

由于探测器和机械臂自主化程度限制, 机械臂月面采样工作需要在地面人员遥操作控制下完成^[8]. 地面操作人员对机械臂操作过程进行规划后, 生成的机械臂操作控制计划需要进行两方面验证: 一是验证机械臂与着陆器机构的碰撞关系, 计算每一步操作两者之间的最小距离是否满足安全要求, 避免因机械臂柔性变形与着陆器发生碰撞接触; 二是验证机械臂末端采样铲是否能够准确到达预定采样点, 实现对月壤采样的精准控制, 避免采样铲与月壤距离不合适导致表取失败.

对月面采样机械臂采样操作过程进行验证, 主要面临如下问题: 一是月面采样时间窗口紧, 在嫦娥五号任务中, 受光照条件和返回窗口的限制, 探测器在月球表面仅停留48 h, 必须在30 h内完成15次表取采样和样品转移等工作, 每次采样作业都需要进行环境感知、采样点分析选择、机械臂规划与验证、指令上行等步骤, 因此对机械臂规划方案的验证工作必须在短时间内完成. 二是安全系数要求高, 在月面非结构未知环境下, 机械臂发生碰撞极易受到损坏, 地面无法进行修复, 导致采样返回任务失败. 需要进行精确的碰撞分析, 确保机械臂控制的安全性. 三是机械臂与障碍空间描述复杂, 探测器的主箱体周围安装的着陆缓冲机构、天线、传感器等器件, 构成了较为复杂的非结构化空间, 机械臂的采样、放样路线需要考虑与众多器件的干涉问题, 需要考虑探测器和机械臂以及携带载荷的精确几何外形结构, 构建数量庞大的三维网格模型, 并设计高效的碰撞分析策略, 提高机械臂运动方案验证的效率和准确性.

月面机械臂采样过程的仿真验证分为实物仿真验证和数字仿真验证两种方式. 实物仿真验证需要模拟构建月面物理环境, 一般应用于设计论证阶段^[9,10], 支撑探测器产品地面试验与性能验证. 在月面采样任务执行阶段, 由于操作时效性, 难以在地面快速构建现场环境. 数字仿真验证利用计算机仿真技术构建数字环境进行采样过程模拟, 能够根据真实航天器的遥测数据快速逼真地呈现真实状态, 适用于地面遥操作的同步快速验证支持. 在文献^[6,7]中, 作者提出了一种月面表取末端铲挖式采样器设计, 并根据月壤特性,

对机土作用过程中的铲挖深度、受力分析情况进行了分析验证. 在文献^[11]中, 作者提出了一种简化的碰撞检测方法, 将机械臂划分为若干杆件, 建立虚拟传感器, 对嫦娥三号三关节机械臂就位探测规划进行可视化验证. 在文献^[12]中, 作者采用障碍物的规则体包围盒对机械臂及其空间占位进行简化描述, 通过在一定程度上扩大了障碍物空间占位范围, 极大地简化碰撞检测过程. 在文献^[13,14]中, 作者采用分离轴方法, 利用凸多面体的特点, 快速处理凸多面体之间的碰撞检测. 在文献^[15,16]中, 作者对可变形物体的包围盒构造和更新问题进行了研究, 提出了根据几何目标的特点构建包围盒的方法. 上述方法主要是通过外形简化表示方式, 使用包围盒策略简化复杂结构物体的外形, 采用数量较少的三维网格计算碰撞关系, 以提高碰撞检测效率. 然而月面采样应用中探测器结构较为复杂, 其不规则几何外形需要大量三维网格进行表示, 对检测精度、效率要求更高, 需要设计更为高效的模型表示和构建、实时精确碰撞分析方法.

本文提出了一种基于三维结构建模的机械臂月面采样可视化仿真验证方法. 首先结合机械臂多关节运动特性, 采用树结构对探测器和机械臂的部件层次结构进行表示, 设计了一种自动从三维模型文件中建立树结构的方法; 在此基础上, 采用层次包围盒由粗到精逐步提出无碰撞风险部件, 仅对高碰撞风险部件采用分离轴方法动态精细化检测机械臂每一步运动状态与探测器本体间的碰撞情况, 计算最小距离, 确保操作安全性. 进一步针对采样铲挖的特殊场景, 对采样铲与月壤的交互作用进行仿真, 预估采样效果, 判定采样安全性. 以嫦娥五号月面采样为例, 构建了探测器和采样机械臂的精密三维网格模型, 通过实验验证了上述方法可用于评判机械臂采样操作过程安全性和到位精确性, 为嫦娥五号月面采样工程实施提供有力的技术支持.

2 基于树形结构建模的可视化仿真方法

嫦娥五号月面采样机械臂是四自由度活动机构, 在可视化仿真过程中是可动部件, 需要首先对多个部件的运动进行建模, 再对所有运动状态进行碰撞检测, 对采样到位情况进行验证.

假设机械臂有 N 个自由度, 其状态 S 使用一组关节

角度 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$ 来表示, 对机械臂的规划方案可以转换为机械臂运动过程的 M 个离散中间状态 $\{S_1, S_2, \dots, S_M\}$, 其中 $S_i=(\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{iN})$, α_{ij} 为第 i 个时刻关节 j 的角度. 对规划控制方案的验证需要确定所有时刻下, 机械臂每一组关节角构型状态均不与周围物体发生碰撞, 并且在某一构型 S_M 下, 机械臂末端采样铲可以对月壤进行采样.

针对上述机械臂规划控制验证需求, 本节设计了一种三维模型结构化处理方法, 获得机械臂、着陆器的部件层次关系和几何外形网格; 在此基础上, 采用包围盒和分离轴思想, 根据规划控制方案中的关节角度驱动机械臂运动仿真, 动态、精确地检测每一组关节状态下的机械臂构型与周围环境的碰撞关系, 并对机械臂末端采样铲与月壤的交互进行仿真, 实现了采样前后月面形态变化表达与采样量的近似评估.

2.1 三维模型树状结构处理方法

机械臂是一个可变形的多刚体结构, 一般包括多个活动关节, 关节之间存在相对转动, 通过设置不同的关节角度, 使得机械臂呈现不同几何形态, 将机械

臂末端控制到预定位置. 对机械臂进行仿真验证, 需要建立各关节角度对机械臂外部形态的驱动接口; 在采用由粗至精的碰撞检测策略时, 还需要对机械臂和着陆器的结构进行多层分组. 为满足上述要求, 本小节采用树结构对三维模型进行表示, 节点表示模型的部件, 节点间的关系表示部件间的层次关系, 如图1所示. 层次关系可在三维软件建模时设置, 自动从三维模型文件中获取.

2.1.1 三维模型树状结构表示

航天器可以分成若干部件组成, 部件需要划分层次关系. 一方面是部件之间存在多层次联动关系, 一个部件的运动带动与它有关联的部件一起运动; 二是碰撞检测需要对航天器进行分层分组处理. 本小节利用树结构对航天器三维模型进行表示, 树结构的节点表示模型各部件的几何外形、运动状态, 节点之间的父子关系表示部件层次关系.

树结构中的节点分为叶节点和非叶节点. 叶节点对应航天器的一个真实存在的物理部件, 以三角网格的形式表示部件的几何外形, 如图2所示, 包括部件顶

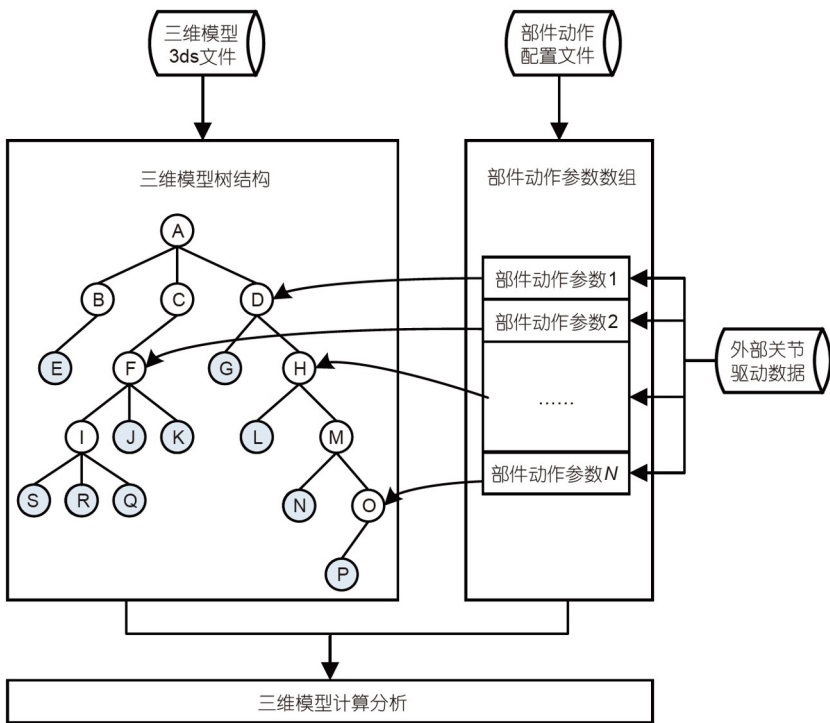


图1 三维模型树状结构处理流程

Figure 1 Flowchart of 3D model processing with tree structure.

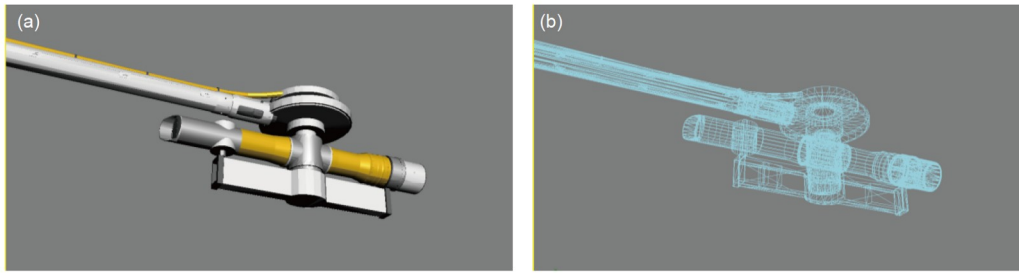


图 2 (网络版彩图)利用三维网格描述物体几何外形. (a) 实体图; (b) 网格图

Figure 2 (Color online) The 3D mesh to describe the geometric shape of an object. (a) The geometric shape of an object; (b) the 3D mesh.

点的三维坐标和三角面片顶点索引. 使用这种形式, 可以较为精确地描述非结构化几何外形, 并方便后续碰撞检测中的几何计算处理.

非叶节点表示由子节点组成的一个特定结构. 叶节点中描述该特定结构可能存在的运动动作状态. 部件相对于航天器的运动有平移、旋转和缩放三种形式. 平移可以用平移距离表示, 包括 (x, y, z) 三个方向各自的平移量, 如交会对接中对接环运动、上升器月面起飞等; 旋转表示部件绕特定旋转轴的转动, 如机械臂控制、天线展开、帆板转动等; 缩放表示部件体积的膨胀和缩小, 如气囊充气、降落伞展开等. 每种动作驱动参数和运动参数来表示, 其中运动参数表示该动作的运动方式, 值是固定的; 驱动参数表示动作的状态, 可以随时间变化. 如表1所示.

部件动作参数表示一个非叶节点对应结构存在的上述三种运动的信息, 可表示全部三种或者其中几种, 或者不存在任何一种运动. 所有部件动作参数与树结构中的非叶节点建立关联关系. 节点间的父子关系表示航天器的层次结构以及部件间的联动关系, 父节点的运动状态会影响所有子节点的状态. 通过上述方法将机械臂多个部件组装构建为形态可变的树状结构模型, 便于机械臂运动过程中对外形轮廓的自动表征.

2.1.2 树状结构的自动生成

为了能够实现树状结构模型对不同机械臂构型的自动表征, 本小节设计了一种基于结构模块分类编码的数据表达方式, 通过对三维模型的几何外形和部件分组编码, 能够实现模型树结构的自动生成, 再通过设计合理的驱动接口实现对模型树结构的自动变换.

首先基于通用的3ds格式数据文件, 对结构模块和部件进行分类编码. 根据航天器各部件的几何外形对

表 1 部件动作描述方法

Table 1 Component action description method

动作类型	驱动参数	动作参数	
平移	平移距离 (x, y, z) 三方向	—	—
旋转	旋转角度	旋转不动点坐标	旋转轴方向
缩放	缩放倍数 (x, y, z) 三方向	缩放不动点坐标	—

部件进行分组, 按照部件之间的动作联动关系和空间位置分布, 建立部件的层次结构关系, 存储为3ds格式文件^[17]. 考虑3ds文件基于块(chunk)结构进行存储的特点, 通过块结构中的整数类型ID识别块的类型, 从物体块(0x3D3D)、三角面块(0x4100)、顶点块(0x4110)、面块(0x4120)中, 得到所有部件以及每个部件的三角网格信息.

在此基础上, 利用三维模型文件(3ds)的部件名称与层次结构块(0xB010)获得部件之间的层次结构信息, 构造模型的树结构, 使得模型中不仅包含了部件的名称和层次信息, 而且模型中的每一个部件被给予一个数字, 以表示其在模型树结构中的顺序. 通过所有部件的顺序码, 即可解算出部件之间的层次结构关系, 从而建立模型的树结构. 其方法是: 读取模型中的名称与层次结构块, 依次获得部件的顺序码, 作为根节点的部件, 其顺序码为-1(0xFFFF); 如果当前部件的顺序码比前一个大, 那么当前部件附着在前一个部件上, 为前一个部件的子节点, 否则, 如果当前部件的顺序码比前一个小, 那么又回到了上层结构, 从该分支往上搜索, 与顺序码相等的节点同级. 通过这种策略, 即可恢复部件之间的层次结构关系, 建立模型的树结构.

上述过程建立了对静态结构模型的自动构建能力, 下面考虑机械臂运动对树状层次结构的影响以及

适应性变换. 为建立对部件的动作控制接口, 通过单独的部件附属属性信息, 描述模型中涉及的动作. 对每个需要进行运动控制的部件, 在部件附属属性信息中增加对动作信息的描述, 包括部件的名称、动作类型、动作参数, 如表1所示. 在建立三维模型树结构后, 增加部件动作描述参数作为部件附属属性信息, 并将每个部件动作参数映射到树结构中作为该部件的子节点; 在三维模型计算分析过程中, 通过外部动作驱动数据, 改变对应的部件动作参数, 实现对模型外形结构状态的调整控制.

相比于其他方法, 本方法将三维模型作为一个整体处理, 不需要将活动部件拆分为多个模型, 保持了模型的完整性, 部件的运动状态控制灵活, 提高了模型可维护性.

2.2 机械臂动态碰撞检测

基于层次化结构模型表征方法, 利用由粗到精^[13,14,18]的策略, 设计了一种机械臂与周围场景三维网格的连续、快速、精确的碰撞检测方法. 该方法根据机械臂关节角度动态地调整机械臂模型外部形态, 利用层次化结构模型的树状结构由粗到细逐级构建各层次的包围盒, 逐步筛选每种状态下碰撞风险较高的部件, 高效剔除无碰撞风险的部件结构, 仅对碰撞风险高的部件进行精细化碰撞分析. 进一步利用分离轴方法对高风险部件的三角网格进行精确碰撞检测, 实现机械臂运动过程的动态高效精确碰撞分析, 实现思路如图3所示.

(1) 关节角驱动的机械臂模型调整

根据规划方案中机械臂关节角度对三维模型的三维坐标位置进行更新, 包括树结构中叶节点对应部件三维网格更新和所有节点包围盒的更新.

树结构叶节点中部件三维网格由网格顶点的三维坐标确定. 对每个叶节点, 向上查找其上层父节点中存在旋转动作的节点, 按照顺序根据旋转动作参数对叶节点网格顶点的三维坐标进行转换. 设关节的旋转不

动点为 $(x_0, y_0, z_0)^T$, 旋转轴方向向量为 $(V_x, V_y, V_z)^T$, 旋转角度为 α , 令沿 $(V_x, V_y, V_z)^T$ 角度的旋转矩阵为 $\mathbf{M}$, 则子节点中的顶点坐标 $(X, Y, Z)^T$ 经该关节变换后的坐标计算如下:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{pmatrix} X-x_0 \\ Y-y_0 \\ Z-z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}.$$

包围盒采用长方体形式, 由 X, Y, Z 三个方向的最大值和最小值来表示. 每个节点对应的结构为其子节点的合集, 其包围盒为其子节点包围盒的并集. 当部件进行动作后, 包围盒发生变化, 需要进行更新. 使用递归的方式, 按照深度优先策略, 从最底层节点开始更新. 叶节点包围根据部件三角网格顶点集合来确定; 当非叶节点的子节点包围盒全部更新后, 其包围盒为子节点包围盒的并集.

(2) 高风险部件的包围盒粗检测

三维模型树结构中, 非节点表示的区域为子节点之和. 两个节点 A 和 B 之间的碰撞检测采用递归的方式进行, 算法步骤如下.

(i) 检测两个节点 A 和 B 的包围盒是否存在碰撞. 如果未发生碰撞, 则停止检测, 判定两个节点 A 和 B 未发生碰撞, 返回; 如果发生碰撞, 则继续下面步骤.

(ii) 如果两个节点 A 和 B 都是叶节点, 转入两个叶节点 A 和 B 的三角网精检测.

(iii) 递归进行两个节点的子节点之间的碰撞检测. 包围盒碰撞判断方法为: 将两个包围盒分别在 X, Y, Z 三个方向进行投影, 检测每个方向的重叠情况. 若三个方向均有重叠部分, 则判定两个包围盒发生碰撞; 反之, 若三个方向有一个方向没有重叠, 则判定两个包围盒未发生碰撞.

(3) 基于三角网的部件碰撞精检测

两个节点 A 和 B 都是叶节点, 则它们都是几何结构, 其几何外形由三角面片组成. 进行 A 和 B 的三角网精检测即为检测 A 的每个三角面片与 B 的每个三角面片是否有相交.

两个三角面片 P 和 Q 的碰撞检测采用分离轴方法, 即检测是否有一个面, 能将 P 和 Q 分离, P 和 Q 分别位于该面的两侧. 若存在这样的面能将三角面片 P 和 Q 分离, 则判定 P 和 Q 未发生碰撞; 否则, 判定发生碰撞.

如图4所示, 三角面片 P 的顶点为 (A, B, C) , Q 的顶

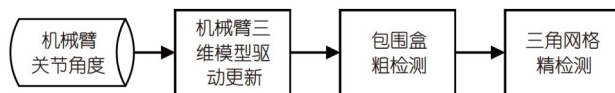


图3 机械臂动态碰撞检测步骤

Figure 3 Dynamic collision detection of manipulator.

点为 (D, E, F) , 选择一个三角形的一条边和另一个三角形的一个顶点, 构成的平面即为可能的分离面, 这样分离面共有12种可能, 分别判断每种分离面是否将两个三角形分开, 从而判断两个三角面片是否分离.

选择边 AC 和点 E 构成分离面进行判断的算法步骤如下:

(i) 由边 AC 和点 E 的三维坐标, 计算 A, C, E 三个点所在的面的方程;

(ii) 将 B, D, F 三个点的三维坐标代入面的方程, 判断三个点位于面的上方还是下方;

(iii) 若 D, F 位于面的同侧, 且 B 位于面的另一侧, 则判定本分离面将两个三角形分离; 否则, 判定本分离面未能将两个三角形分离.

通过上述方法, 即可判断两个节点对应的三维模型是否存在碰撞, 并找出存在碰撞的三角面片, 实现对机械臂规划的运动过程的安全性验证.

2.3 采样铲与月壤的交互仿真

采样铲与月壤的交互仿真是判断任务实施过程中采样器是否铲取到月壤、下铲深度如何和采样量是否足够等因素的重要支撑. 考虑到采样器与月壤交互过程的动力学特征仿真较为复杂^[6,7], 耗时较多, 为了提升采样过程的实施效率, 本小节设计了一种简化的铲壤交互仿真方法, 主要对采样器与月壤的接触关系、采样前后月壤的形态变化和采样量的近似估计等物理特性进行近似模拟, 实现了对关键指标因素的快速近似估计, 有效支持采样任务实施的快速决策.

采样铲是采样机械臂的重要组成部分, 直接负责对指定点的月壤进行采集. 采样铲外形呈勾状, 安装于机械臂末端, 当机械臂按照规划运动到预定采样点上方, 采样铲运动过程中可实现对月壤的挖取收集, 适用于较为松散的月壤收集, 如图5所示. 本方法对采样铲挖取过程进行仿真, 模拟采样铲与月壤的交互作用, 验证采样铲对月壤采样的有效性.

采样区域的月面地形环境是进行采样的基础. 地面控制人员利用着陆器携带的相机, 对机械臂采样区域内的月面地形进行成像, 生成高精度月壤三维地形^[19], 用于采样点的确定和机械臂规划. 需要验证采样铲在运动过程是否能进入月壤一定深度获取月壤样品. 本文使用规则的网格对月壤地形进行表示, 利用深度模板方法模拟采样过程中月壤地形的形状变化, 对

采样铲与月壤的交互进行仿真.

采样铲在松软月壤内部运动, 对月壤进行挖掘, 获取月壤样本^[20,21]. 月壤地形被采位置出现塌陷留下挖掘坑, 使用深度模板对挖掘坑进行快速模拟, 定义了采样铲对月面地形网格高度值的影响, 如图6所示. 在采样铲宽度 W 范围内, 月壤出现塌陷, 地形高度降低;

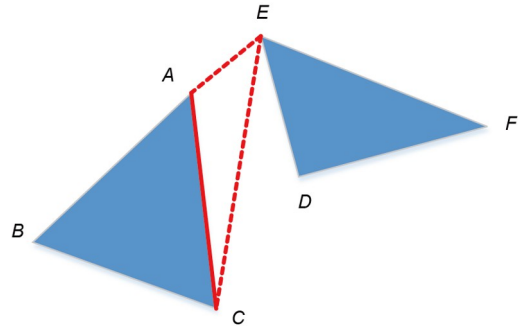


图4 (网络版彩图)三角面片分离轴碰撞检测方法示意图

Figure 4 (Color online) Separation axis method of collision detection for triangles.

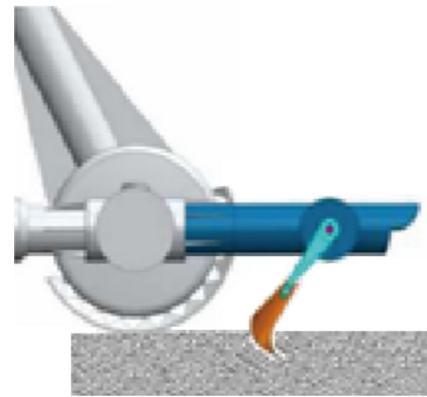


图5 (网络版彩图)采样铲构型示意图

Figure 5 (Color online) Schematic diagram of sampling shovel configuration.

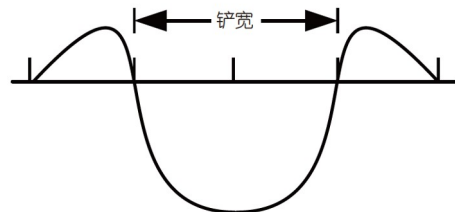


图6 深度模板示意图

Figure 6 Sketch map of depth template.

在采样铲外部边缘月壤地形出现隆起, 地形高度下降. 记为 $y=f(x)$, 其中 x 为距离采样铲底部中心点距离, y 为采样坑的高度.

使用规则三角网格对采样区月面地形进行表示, 地形数据从生成的数字高程图DEM中读取, 包括地形分辨率、网格长和宽. 在采样铲对月壤采样过程中, 计算采样铲底部点 M 的三维坐标, 通过判断 M 与地形网格的关系, 对 M 周围地形网格顶点的高度按照深度模板进行更新, 模拟采样过程中采样坑的形成.

如算法1所示, 当采样铲进入月壤内部, 按照采样铲在月壤内部深度以及深度模板来对月面地形三角网格的顶点高度进行修改, 对采样坑的形成过程进行仿真.

3 实验

利用月面采样机械臂对上述方法进行实验, 验证机械臂规划方案中, 机械臂与周围环境的碰撞安全性以及采样铲采集月壤的有效性.

如图7所示, 探测器包括着陆器和上升器两部分, 着陆器包括箱体、着陆支架、帆板、燃料箱、发动机、天线、相机、钻取机构、机械臂等部件, 上升器包括箱体、帆板、发动机、气瓶、对接支架、传感器等部件.

机械臂安装于着陆器主框架上面, 具有四个自由度. 如图8所示, 第一个关节旋转轴为竖直方向, 剩下三个关节均为水平方向. 通过设置第一个关节角度, 可调整机械臂到达的采样区的方位; 第二、三关节角度调整机械臂构型控制末端采样器到达采样区上方位

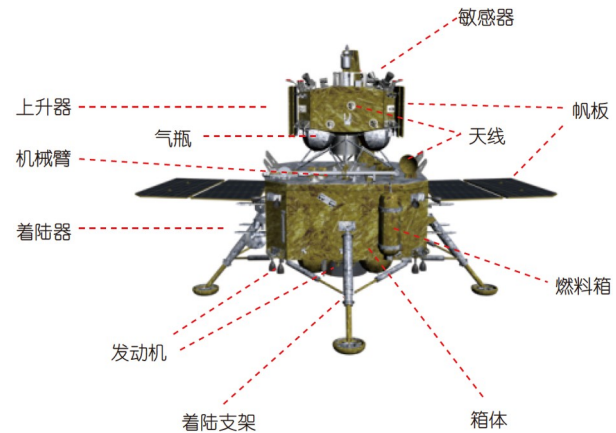


图7 (网络版彩图)探测器主要部件和机械臂位置示意图
Figure 7 (Color online) Diagram of main components and manipulator of the lunar detector.

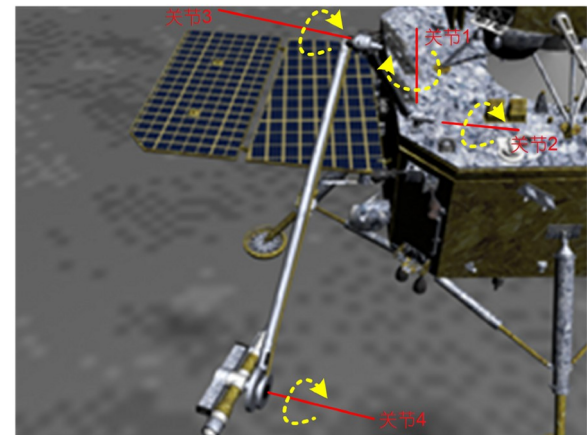


图8 (网络版彩图)机械臂关节角度示意图
Figure 8 (Color online) Diagram of joint angles of manipulator.

置; 第四个关节控制末端采样器与月面平行, 方便采样铲挖取月壤.

3.1 探测器和机械臂三维建模

三维建模过程包括三个方面: 实体建模、层次关系建模和机械臂关节建模. 首先是对探测器本体和机械臂进行实体建模, 构建着陆器、上升器和机械臂各部件的几何外形. 在三维建模软件3DMAX中, 利用软件的建模功能, 根据部件的外形和尺寸, 构建部件的三维网格. 为进行精确碰撞检测的需要, 可以采用比较精细的建模方式和参数, 加大网格密度, 从而提高模型几何形状表示的准确性. 本实验中所建立模型的面片数

算法1 采样坑模拟算法

输入: 机械臂关节角度;
采样区地形网格.

输出: 采样区地形网格.

1. 根据机械臂关节角度计算 M 点坐标, 记为 $P_M=(X_M, Y_M, Z_M)$;
2. For each 地形网格顶点 N
3. 点 N 坐标设为: $P_N=(X_N, Y_N, Z_N)$;
4. 计算 N 与 M 水平距离 L_{NM} ;
5. If $L_{NM} < W$
6. $Z_N \leftarrow Z_N + (Z_N - Z_M) * f(L_{NM})$;
7. End If
8. End For

量如表2所示。

然后对部件之间的层次关系进行建模。使用三维建模软件3DMAX中的“Group”功能，将若干部件组合起来，组合形成的“Group”可以继续和其他部件进一步组合为新的“Group”，形成一种树状的多层次结构。将多个物体进行组合，遵循两个原则：一是根据部件的动作进行组合，按照活动部件之间的链接关系设置层级，从链接部件的最末端开始进行部件组合操作，逐步组合到最上以及的可运动部件。比如机械臂的活动方式，肩、肘、腕、采样铲四个关节按顺序链接在一起，肩关节的转动会影响肘、腕、采样铲关节，机械臂末端采样铲的铲舌可以转动，首先是对最末端的腕和采样铲进行组合，依次对腕关节、肘关节、肩关节进行组合。二是根据部件在三维空间的分布，尽量将在空间中位置相邻、尺寸相近的部件进行组合。这样在进行

碰撞检测时，由粗致精的检测过程中，对部件按照区域分布进行划分，尽可能提高检测的效率。图9为实验建立的模型的层次关系示意图，第一层分为探测器和机械臂两个子节点，其中探测器分为着陆器和上升器两个子节点，继续按照部件的几何位置进行组合和层级细分；机械臂按照各关节的运动链接关系进行组合，满足机械臂关节角度控制要求。在图中，具有点背景的节点为叶节点，表示一个具体的部件实体；空白背景的节点为非叶节点，不对应一个具体的部件实体，而是表示若干部件实体的组合。

最后是机械臂关节旋转轴建模。对具有转动属性的部件，根据部件在模型的三维坐标，设置部件的名称、旋转轴不动点坐标和旋转轴矢量方向。

按照本文2.1小节方法读取上述三维建模的三部分信息，按照模型层次结构关系建立模型的树结构。

表 2 三维模型面片数量(单位: 个)
Table 2 Number of 3D model meshes (Unit: piece)

着陆器	上升器	机械臂					合计
		关节1	关节2	关节3	关节4	采样铲	
268730	120676	5970	8723	8952	7060	2164	422275

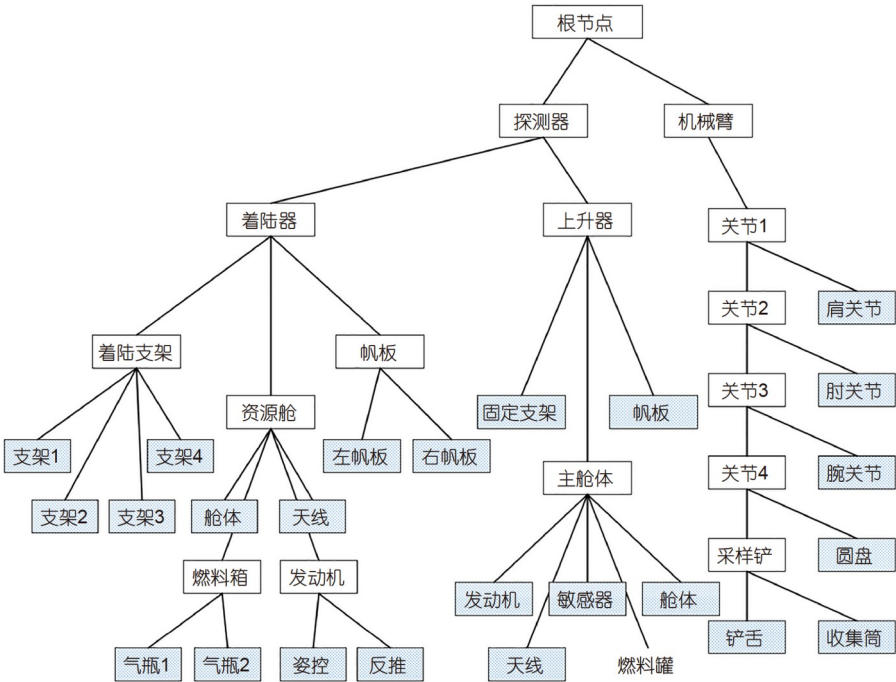


图 9 (网络版彩图)三维模型部件间的层次结构
Figure 9 (Color online) Hierarchy of 3D model components.

3.2 机械臂运动规划验证

在月面采样过程中, 机械臂负责表取、放样、放罐工作。首先是机械臂运动到月面采样位置, 对月面月壤进行表取, 月壤存放在采样铲内部; 然后运动到位于着陆器上表面的存储罐位置, 将月壤转移到存储罐内; 待存储罐收集足够月壤后, 机械臂抓取存储罐, 将存储罐转移到上升器上部的返回回收装置中, 由上升器携带至月球轨道, 与轨道器对接返回地球。

因此, 机械臂的运动规划就是控制机械臂末端在月面采样点、存储罐、回收装置之间进行移动, 实现采样、放样、放罐作业。一次运动规划包括一序列机械臂关节角度状态, 描述了机械臂运动的过程。如图10所示, 描述了机械臂在采样点、放样点、放罐点之间运动过程中机械臂末端采样铲中心的轨迹。

本实验对10次机械臂规划结果进行了验证。每次规划结果包括若干数量的机械臂状态, 利用本文方法, 利用机械臂每个状态对应的机械臂关节角度, 驱动机械臂三维模型树结构, 控制机械臂运动过程中的构型, 然后按照层次结构关系, 使用由粗到精的策略, 首先使用包围盒进行粗检测, 再用三角网格进行精检测, 得到机械臂和着陆器、上升器之间的碰撞分析结果, 如果存在碰撞, 得到碰撞部件三角网格。碰撞检测算法实验在CPU为Intel i7 2.4GHz、内存4.0G的电脑运行。对10次机械臂规划结果的验证耗时情况如表3所示, 第一列为规划序号, 第二列为规划中包含的机械臂状态数量, 第三列为对规划结果的验证时间, 第四列为每个机械臂状态的平均耗时。整个10次规划共包括2982个

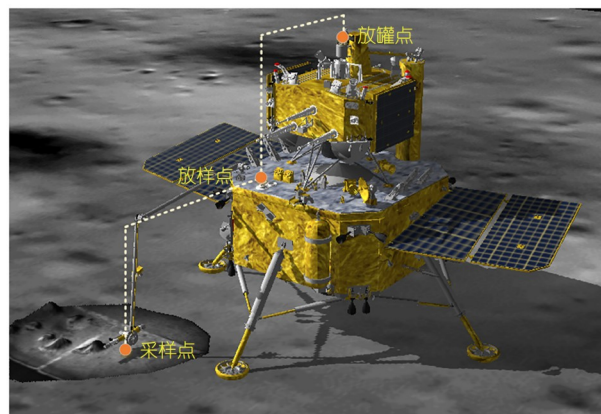


图 10 (网络版彩图)机械臂规划轨迹示意图
Figure 10 (Color online) Diagram of planned trajectory of manipulator.

状态, 消耗时间为9391 s, 平均每次为3.15 s, 考虑到三维模型包含的面片数量, 本文方法实现了对精细建模的较快碰撞检测速度, 满足工程任务中的时效性要求。

3.3 月壤采样仿真验证

当机械臂按照规划方案运动, 末端采样装置到达采样区域上空, 对采样铲与月壤地形的交互进行仿真, 验证采样的有效性。采样前, 采样铲打开至预定状态; 执行采样指令后, 采样铲向前转动, 进入月壤, 采集样本。月壤地形根据着陆器携带的采样感知系统, 对采样区域进行拍照, 经过三维处理生成。实验中月壤地形分辨率为2 cm, 大小为3 m×3 m范围, 按照本文2.3小节方法, 对采样铲与月壤地形的交互进行仿真, 在月壤地形产生采样坑。如图11所示, 在图11(a)中已经产生了一个

表 3 机械臂运动规划验证耗时情况(单位: 秒)
Table 3 Experiments on consumed times of manipulator planning (Unit: s)

规划序号	规划状态数量	碰撞检测计算时间	平均时间
1	381	1079.06	2.83
2	264	914.57	3.46
3	345	1028.51	2.98
4	249	796.43	3.19
5	276	782.63	2.83
6	238	778.73	3.27
7	294	862.29	2.93
8	323	1073.67	3.32
9	286	960.73	3.35
10	326	1114.31	3.41
Total	2982	9391.0	3.15

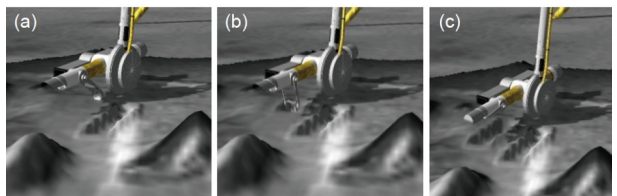


图 11 (网络版彩图)采样铲与月壤作用仿真。(a) 采样前; (b) 采样中; (c) 采样后
Figure 11 (Color online) Simulation of interaction between sampling shovel and lunar soil. (a) Before sampling; (b) sampling; (c) after sampling.

采样坑, 采样铲打开正准备进行第二次采样; 图11(b)为采样铲正进入月壤中; 图11(c)为采样完成. 通过这种可视化仿真方式, 规划人员可以直观地了解采样铲与月壤之间的位置关系, 从而对采样铲与月壤的作用进行初步评估, 预估采样的有效性.

上述实验结果表明, 对于复杂不规则的机械臂运动规划场景, 在场景面片数量很大的情况下, 本方法可以对机械臂规划方案进行连续碰撞分析, 验证机械臂按规划方案运动的安全性, 并对采样铲和月壤的交互进行了可视化仿真, 在工程实施过程中可以为规划人员提供技术支持.

4 结论

针对月面表层采样机械臂的规划验证工作, 提出了一种层次化结构建模方法, 并基于该方法设计了机械臂采样操作的仿真验证方法, 实现机械臂运动过程的安全性和到位准确性验证. 首先, 对机械臂进行三维结构的层次化表征建模, 设计了基于该模型的机械臂运动模型动态描述方法, 通过模型的层次化描述和模型结构的动态适应性调整设计, 能够实现对机械臂

不同运动构型状态下树状层次结构的自动构建与表征. 其次, 基于层次化结构模型表征方法, 利用由粗到精的策略, 设计了一种机械臂与周围场景三维网格的连续、快速、精确的碰撞检测方法. 该方法根据机械臂关节角度动态地调整机械臂模型外部形态, 利用层次化结构模型的树状结构由粗到细逐级构建各层次的包围盒, 逐步筛选每种状态下碰撞风险较高的部件, 高效剔除无碰撞风险的部件结构, 仅对碰撞风险高的部件进行精细化碰撞分析. 进一步利用分离轴方法对高风险部件的三角网格进行精确碰撞检测, 实现机械臂运动过程的动态高效精确碰撞分析. 第三, 考虑到采样器与月壤交互过程的动力学特征仿真较为复杂, 耗时较多, 为了提升采样过程的实施效率, 设计了一种简化的采样器铲壤的交互仿真方法, 主要对采样器与月壤的接触关系、采样前后月壤的形态变化和采样量的近似估计等物理特性进行近似模拟, 实现了对采样器是否铲取到月壤、下铲深度如何和采样量是否足够等关键指标因素的快速近似估计, 有效支持采样任务实施的快速决策. 最后通过仿真实验验证了本文方法的有效性, 有效支持了嫦娥五号月面采样任务的顺利实施.

参考文献

- 1 Pei Z Y, Wang Q, Tian Y S. Technology roadmap for Chang'e program (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2015, 2: 99–110 [裴照宇, 王琼, 田耀四. 嫦娥工程技术发展路线. 深空探测学报, 2015, 2: 99–110]
- 2 Zacny K, Metzger P, Luczek K, et al. The world is not enough (WINE): Harvesting local resources for eternal exploration of space. In: *Proceedings of the AIAA Space 2016 Conference and Exposition*. Long Beach, 2016
- 3 Badescu V, Zacny K. *Outer Solar System: Prospective Energy and Material Resources*. Berlin: Springer, 2018
- 4 Allton J H. *Catalog of Apollo Lunar Surface Geological Sampling Tools and Containers*. Technical Report JSC-23454. Lyndon B. Johnson Space Center, 1989
- 5 Zhang T, Xu K, Yao Z X, et al. The progress of extraterrestrial regolith-sampling robots. *Nat Astron*, 2019, 3: 487–497
- 6 Jiang S Q, Liu R K, Lin Y C, et al. Design and test of a sampler for lunar surface regolith (in Chinese). *Chinese Space Sci Technol*, 2019, 39: 49–58 [姜水清, 刘荣凯, 林云成, 等. 铲挖式表层月壤采样器设计与试验. 中国空间科学技术, 2019, 39: 49–58]
- 7 Ma R Q, Jiang S Q, Liu B, et al. Design and verification of a lunar sampling manipulator system (in Chinese). *J Astronaut*, 2018, 39: 1315–1322 [马如奇, 姜水清, 刘宾, 等. 月球采样机械臂系统设计及试验验证. 宇航学报, 2018, 39: 1315–1322]
- 8 Sun Z Z, Zhang T X, Zhang H, et al. The technical design and achievements of Chang'e-3 probe (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2014, 44: 331–343 [孙泽洲, 张廷新, 张焱, 等. 嫦娥三号探测器的技术与成就. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 331–343]
- 9 Sun Z Z, Zhang H, Jia Y, et al. Ground validation technologies for Chang'e-3 lunar spacecraft (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2014, 44: 369–376 [孙泽洲, 张焱, 贾阳, 等. 嫦娥三号探测器地面验证技术. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 369–376]
- 10 Gao B, Han P T, Shi G D, et al. Design of a landing attitude simulator for Chang'e-5 spacecraft (in Chinese). *Spacecraft Environment Eng*, 2020, 37: 65–72 [高奔, 韩佩彤, 石光达, 等. “嫦娥五号”月球探测器着陆姿态模拟装置设计. 航天器环境工程, 2020, 37: 65–72]
- 11 Wu K, Leng S, Li Q Z, et al. In-situ manipulator exploration planning of Chang'e 3 lunar rover (in Chinese). *J Astronaut*, 2015, 36: 375–382 [吴

- 克, 冷舒, 李群智, 等. 嫦娥三号月面巡视器机械臂就位探测规划. 宇航学报, 2015, 36: 375–382]
- 12 Zhu Z X, Jing S, Zhong J F, et al. Obstacle avoidance path planning of space redundant manipulator based on a collision detection algorithm (in Chinese). J Northwest Polytechnical Univ, 2020, 38: 190–197 [朱战霞, 靖飒, 仲剑飞, 等. 基于碰撞检测的空间冗余机械臂避障路径规划. 西北工业大学学报, 2020, 38: 190–197]
- 13 Zhang Y Z, Fan C, Luo X F. Separating-axis calculation of motion path for continuous collision detection of convex polyhedrons (in Chinese). J Astronaut, 2013, 25: 7–14 [张应中, 范超, 罗晓芳. 凸多面体连续碰撞检测的运动轨迹分离轴算法. 宇航学报, 2013, 25: 7–14]
- 14 Zhang Z, Zou S T, Li J T, et al. A collision detection algorithm between convex polyhedrons based on projection of edges (in Chinese). J Astronaut, 2015, 27: 1407–1415 [张智, 邹盛涛, 李佳桐, 等. 凸多面体碰撞检测的棱线投影分离算法. 宇航学报, 2015, 27: 1407–1415]
- 15 Wang C, Zhang Z L, Long Y, et al. Improved hybrid bounding box collision detection algorithm (in Chinese). J Syst Simul, 2018, 11: 4236–4243 [王超, 张志利, 龙勇, 等. 改进的混合包围盒碰撞检测算法研究. 系统仿真学报, 2018, 11: 4236–4243]
- 16 Li Z, Jin Y X, Qin Z P, et al. Collision detection algorithm of deformable object based on snake model optimization (in Chinese). J Syst Simul, 2018, 30: 62–68 [李照, 靳雁霞, 秦志鹏, 等. 基于优化Snake模型的变形物体碰撞检测算法研究. 系统仿真学报, 2018, 30: 62–68]
- 17 Li T G, Li W X, Wang W W, et al. Research on visual 3D reconstruction of space manipulator based on OpenGL (in Chinese). Comput Technol Dev, 2018, 28: 178–181 [李泰国, 李文新, 王伟文, 等. 基于OpenGL空间机械臂三维重构可视化研究. 计算机技术与发展, 2018, 28: 178–181]
- 18 Pan H H, Dai J, Chen L, et al. Multi-robot parallel dynamic bounding volume hierarchy tree collision detection algorithm (in Chinese). J Astronaut, 2014, 26: 1948–1956 [潘海鸿, 戴骏, 陈琳, 等. 多机器人并行动态包围体层次树碰撞检测算法. 宇航学报, 2014, 26: 1948–1956]
- 19 Zhao D, Dai Z P, Li S Q, et al. Perception and scene modeling of complex terrain information in patrol and exploration tasks (in Chinese). Spacecraft Eng, 2019, 28: 32–38 [赵迪, 戴志鹏, 李世其, 等. 巡视探测任务中复杂地形信息感知与场景建模. 航天器环境工程, 2019, 28: 32–38]
- 20 Yao M, Zheng Y H, Zhao Z H, et al. Research on reasonable excavation depth for lunar regolith sampler (in Chinese). Spacecraft Eng, 2017, 26: 50–56 [姚猛, 郑燕红, 赵志晖, 等. 一种月表采样器合理铲挖深度的研究. 航天器环境工程, 2017, 26: 50–56]
- 21 Zou M, Xu S C, Zhao Z J, et al. Simulation analysis of the relationship between the lunar regolith and sampler actuator (in Chinese). J Tsinghua Univ (Sci Technol), 2014, 54: 865–870 [邹猛, 许述财, 赵振家, 等. 月面重力场下表取采样末端执行器与月壤作用仿真分析. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54: 865–870]

Simulation and verification technology for lunar sampling manipulator control

YANG Cheng^{1,2}, LI GuiLiang², FENG XiaoMeng², LIU ChuanKai^{1,2}, LIU Qian^{1,2} & ZHANG Gong^{1,2}

¹ The Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100094, China;

² Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China

It is common for lunar in-situ observations to use a manipulator to sample the lunar surface soil. A planning verification method for the manipulator has been designed to ensure sampling efficiency and safety. However, because of the limited autonomy of the detector and the robotic arm, the sampling process needs to be planned on the ground and carried out via Earth–lunar teleoperation. Addressing the problems of the tight lunar surface sampling time window, high safety requirements, and the irregular manipulator motion space, this paper proposes a simulation verification method for the manipulator teleoperation based on three-dimensional (3D) structure modeling. First, using the component sequence code, the 3D model file is quickly and automatically transformed into a 3D tree structure to enable a dynamic representation of the geometric shape of the robot arm during joint motion. Then, the robot arm is modeled based on the hierarchical bounding box strategy and the separating-axis method. A rapid and accurate collision analysis, including the complex shape of the detector, ensures the safety of the manipulator operation and the efficiency of the sampling task. Next, for the lunar surface-touching sampling process of the sampler, an interaction method between the sampler and the simulated lunar soil is designed to enable interactive simulations. The experimental results and analysis show that this method has a high detection accuracy and response speed and can therefore support the verification of the lunar sampling planning.

lunar sampling, manipulator, planning verification, collision detection

doi: [10.1360/SST-2021-0243](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0243)