



地外天体采样柔性智能化系统设计与应用

邓湘金, 金晟毅, 郑燕红, 彭 兢, 姚 猛, 史 伟

Design and Application of Flexible Intelligent System for Sampling on the Extraterrestrial Body

DENG Xiangjin, JIN Shengyi, ZHENG Yanhong, PENG Jing, YAO Meng, and SHI Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210128>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小天体表面采样技术综述

Summary of Sampling Technology for Small Celestial Bodies

深空探测学报(中英文) . 2018, 5(3): 246-261

小天体探测自主绕飞智能规划建模

Modeling of Autonomous Flight Mission Intelligent Planning for Small Body Exploration

深空探测学报(中英文) . 2019, 6(5): 463-469

质谱计在行星系统与小天体探测中的应用

The Application of Mass Spectrometer in Planetary System and Small Solar System Bodies

深空探测学报(中英文) . 2017, 4(6): 522-528

一种深空粒子采样返回探测器构型设想

Study on the Configuration of Deep Space Particles Sampling and Return Spacecraft

深空探测学报(中英文) . 2019, 6(1): 96-102

月球极区钻取采样技术

Research of Drilling and Sampling Technique for Lunar Polar Region Exploration

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(3): 278-289

基于轨道任务几何的“嫦娥五号”采样区选择

Sampling Area Selection for Chang' E-5 Mission Using the Orbital Geometry

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(3): 227-236



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

地外天体采样柔性智能化系统设计与应用

邓湘金, 金晟毅, 郑燕红, 彭 兢, 姚 猛, 史 伟

(北京空间飞行器总体设计部, 北京100094)

摘要: 地外天体的采样是未来深空探测领域的重要发展方向。与近地轨道任务不同, 地外天体采样在任务执行期间通常会受通信时延大、能源有限以及非结构任务执行环境等多方面因素制约, 一方面地面系统无法实时支持, 需要航天器具有较高的自主能力, 但另一方面航天器上系统计算资源有限, 任务环境有较高的不确定性, 导致航天器上全自主设计复杂且可靠性低, 在很大程度上仍需要地面系统决策支持, 两方面相互矛盾影响并阻碍了任务的顺利实施。针对此, 通过分析地外天体采样系统及其对人工智能技术的需求, 设计构建了基于人工智能技术的地外天体采样柔性系统, 系统支持通过柔性配置航天器和地面系统在任务执行过程中的任务功能模块, 从而逐渐实现航天器高自主能力提高任务执行效率。该系统通过“嫦娥五号”采样封装专项试验得到了验证和应用, 验证结果显示: 在该系统支持下可显著提高采样任务执行效率和可靠性。

关键词: 器-地联合; 柔性采样系统; 大时延; 地外天体采样

中图分类号: V114

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)01-0080-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210128

引用格式: 邓湘金, 金晟毅, 郑燕红, 等. 地外天体采样柔性智能化系统设计与应用[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(1): 80-87.

Reference format: DENG X J, JIN S Y, ZHENG Y H, et al. Design and application of flexible intelligent system for sampling on the extraterrestrial body[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(1): 80-87.

引言

2013年5月, 国务院印发《中国制造2025》, 部署全面推进实施制造强国战略, 明确提出“推动载人航天、月球探测工程, 适度发展深空探测”^[1]。中国的探月工程分“绕、落、回”三步开展研制实施。探月工程三期的目标是实现月面无人自动采样返回, 并开展月面就位探测和月球样品地面分析研究^[2]。根据技术的发展趋势和深空探测发展需求, 中国未来也将会实施火星、小行星等地外天体的采样分析或采样返回任务。在大时延等刚性约束限制条件下, 月球、火星和小行星等地外天体的智能采样技术将是全世界未来深空探测领域的重要发展方向。

经过近60年的发展, 人工智能学科在机器感知、模式识别的原理和方法、知识表示与推理理论体系、机器学习相关理论和算法等方面取得了巨大进展^[3-4], 应用也从初始单一的工作场景发展至在复杂不确定的非结构环境之中^[5-7]。探月三期工程月面自动化采样封装任务, 需要在非结构化的月面环境和严格的时间及资源约束条件下, 控制驱动复杂的机构产品执行采样

封装动作。为此建立天地一体化并具有高度智能特征的月球采样封装系统, 成为支持并可安全地完成月面采样封装任务优化选择。

深空地外天体采样在任务执行期间通常会面临通信大时延大、测控通信、计算能力、能源有限以及非结构化任务执行环境等多方面条件约束限制因素制约, 一方面地面系统无法实时支持, 需要航天器具有较高的自主能力, 但另一方面航天器上系统计算资源有限, 任务环境有较高的不确定性, 导致航天器上全自主设计复杂且可靠性低, 在很大程度上仍需要地面系统决策支持, 两方面相互矛盾影响并阻碍了任务的顺利实施。传统的固定结构天地一体化操控系统, 面对这样的问题普遍通过降低任务要求、增加系统资源配置或降低操控效率等手段平衡两个方面的矛盾和约束。

本文针对地外天体采样的任务特点, 对地外天体采样系统的组成和功能需求进行分析, 提出了柔性智能地外天体采样系统的基本特征和典型智能系统设计方案, 支持通过柔性配置航天器和地面系统在任务执行过程中的任务功能模块, 在不增加系统资源配置的

基础上可保证任务实施可靠性和效率，解决上述两方面的矛盾。该设计已应用并实践于探月三期月球表面采样任务中，成功支持完成了月壤样品的采集和封装任务，为后续其它地外天体采样任务积累了技术基础。

1 地外天体采样系统需求分析

1.1 任务需求

地外天体采样任务的实施，需要采用器地系统联合操作的方式实施操控。根据部署位置系统可划分为器上功能模块（航天器系统）和地面功能模块（地面系统）两大部分4类功能：航天器上执行机构控制、地面总控与上行管理、操控人员分析与决策、大延时通信和网络。

1) 航天器上执行机构控制

采样封装动作的执行，需通过传感器获取工作环境和工作状态相关信息，航天器上机构设备具备相应的采样功能。在地外天体采样系统中，航天器接收地面上注的遥控指令，进行解析后向采样机构输出电机驱动信号，同时采集采样机构的状态信息，向传感器输出工作驱动信息，并对获取的信息进行滤波、压缩、打包、转发等处理。此外，由于地外天体采样任务中，航天器至地面往返通信时延相对较大，航天器上的相关采样机构、传感器设备及其控制设备等，必须具备一定的自主控制能力和故障应对能力。

2) 地面的指令与总控管理

地外天体采样系统的在轨运行过程，也是航天器系统与地面系统的联合操作过程，需要通过地面操作人员发送指令完成航天器的状态控制，需要地面系统完成航天器遥测和图像信息的接收、存储、解译和转发等工作，需要地面系统完成上行指令的制作、校对和状态管理等工作。

3) 通信和网络

地外天体采样过程中，航天器上的遥测和图像等状态信息应能发送至地面，地面指令应能发送至航天器，实现航天器与地面之间的信息交换，并且，地面总控与在各个终端上的操作人员应具有快速、准确的信息交互，因此，采样系统中应有通信和网络功能，根据功能模块部署的位置，可以分为器上通信功能、地面通信和网络功能。

4) 操作人员的分析与决策

地外天体采样任务执行过程中，采样机构的部分工作状态不能直接通过遥测信息进行判断，需要地面操作人员参与进行分析，并依据产品设计方案和地面

试验经验等信息，决策后续采样工作的策略和流程。主要包括：工作环境三维重建、采样点选择、星壤力学评估、采样状态和采样量评估、运动补偿分析等；还应有操作人员参与的规划仿真，工作项目主要包括：采样机构的运动规划以及相关传感器联合工作时的策略规划等；还应有操作人员参与的工作决策，工作项目主要包括：采样机构、传感器和相关控制模块的联合工作流程，以及地面系统与航天器联合工作流程等；还应有支持操作人员分析与决策的相关系统等。

为支持上述任务需求，设计地外采样系统架构示意如图1。

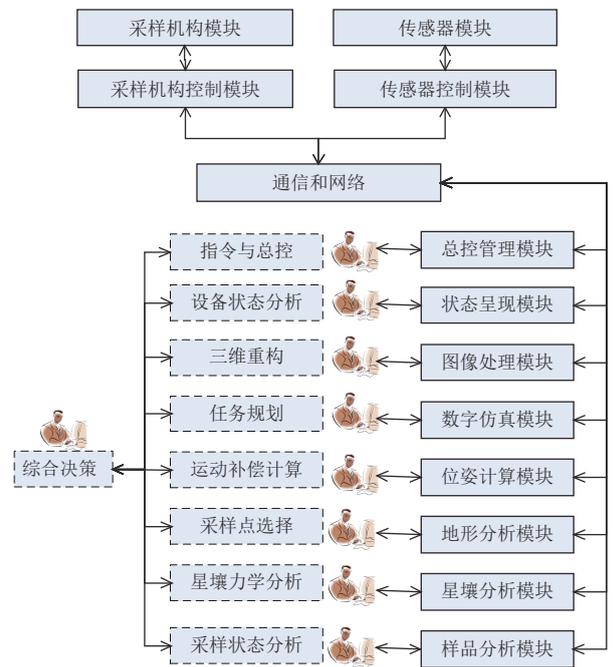


图 1 系统信息流架构图

Fig. 1 System information flow architecture diagram

1.2 对智能化的需求

如图1所示，需要操作人员参与的项目和环节包括：采样过程中的综合决策、指令和总控、设备状态分析、三维重构、任务规划、运动补偿计算、采样点选择、星壤力学分析、采样状态分析等分析与决策工作。

任务过程有3个特点：①需要感知非结构化的、不确定工作环境；②需要完成复杂采样机构和探测设备协同工作策略的制定、调整；③后续的动作类型和工作参数等，取决于当前动作的动态结果。

为了提高任务执行效率，采用智能技术是实现地外天体自主采样的最佳控制手段。在地外天体采样系

统中涉及的主要人工智能技术应有如下方面:

1) 智能决策模块: 综合决策规则应用和经验推理, 对任务期间产生的遥测、图像以及仿真结果进行分析, 并对后续工作策略、工作步骤和工作指令进行调整和确定。

2) 智能指令总控模块: 自主完成控制指令的生成、校对和状态管理, 对系统中多模块之间的工作流程和息流进行管理。

3) 智能健康评估模块: 对航天器上各相关设备健康状态和工作状态的分析和确定。

4) 三维重建模块: 建立航天器目标采样区域的三维模型单元。

5) 智能任务规划模块: 对采样机构的运动规划和对采样相关设备的联合工作规划, 并对规划结果实现仿真验证和确认。

6) 智能运动补偿分析模块: 对采样运动机构定位精度的补偿量计算, 根据视觉标识的运动补偿或基于力学模型的运动补偿。

7) 智能采样点选择模块: 通过采样点星壤形态、采样点及其周围区域地形等方面进行分析, 选择安全高价值的采样目标点。

8) 智能星壤力学评估模块: 根据星壤形态和作用痕迹等信息预估星壤力学特性。

9) 智能采样状态评估模块: 根据图像和遥测信息估计是获得样品状态, 预估样品质量。

10) 虚拟现实模块: 提供直观的采样设备健康状态和工作状态信息, 呈现采样过程中的遥测、图像、仿真等多维信息。

上述环节需人工智能技术进行参与和支持, 组成如图2所示。

为了确保系统的安全可靠和灵活应对各种应用环境, 系统中的智能模块不仅具有人工智能功能, 还应具有便捷、友好的人机交互接口, 确保操作人员能够根据实际需要, 随时可以介入采样状态的分析 and 决策等过程。

2 柔性采样系统的设计

2.1 系统基本特征

设计的柔性采样系统在航天器系统和地面系统中, 通过动态选择或组合配置各智能模块。以适应不同地外天体采样任务需求, 满足航天器研制和在轨执行不同阶段对自主智能化的需求。该系统基本特征如下:

1) 可选择的智能模块。根据采样任务需求, 配置多个智能模块组成的系统应该能完成采样功能, 可以不配置不需要的智能模块。

2) 可封装的智能模块。通过对某些功能进行规整或分级, 实现某些功能的智能模块化封装, 使系统具有选择配置和组合配置能力。

3) 可迁移的智能模块。通过分析智能模块的功能、输入信息和输出信息关系, 定义其规范接口, 既能配置在地面系统中, 也能配置在航天器上, 使智能模块具有优秀的迁移能力。

4) 分布式的并行结构。整个系统以通信和网络作为信息交互载体, 可以根据不同任务的使用环境约束, 分布式部署各功能模块, 形成并行模块结构的采样封装系统。

5) 主宾式的智能模块。主人智能模块可以调用和管理其它智能模块。宾客智能模块不能调用其它智能模块, 可以被其它模块调用和管理。主人模块和宾客模块都可以根据任务需要独立运行。系统运行过程中, 可以配置一个或并行配置多个同类智能模块, 也能兼容器上和地面同时配置一个或多个同类智能模块, 通过优先级标识的设置, 确定智能模块输出结果的优先使用级。

6) 人机协同的系统运行。采样系统运行过程中, 操作人员可以随时介入任务过程的分析 and 决策, 利用智能模块的支持, 开展分析和决策, 或者直接替换智能模块, 由操作人员直接进行分析和决策。

2.2 系统配置方案

针对器上模块需具有较高自主能力要求的采样系统, 在航天器上配置智能决策、智能指令总控、智能健康评估、智能三维重建、智能任务规划、智能运动补偿、智能采样点选择、智能星壤力学评估、智能采样状态评估等模块。

地面系统的计算资源几乎不受限制, 为了确保智

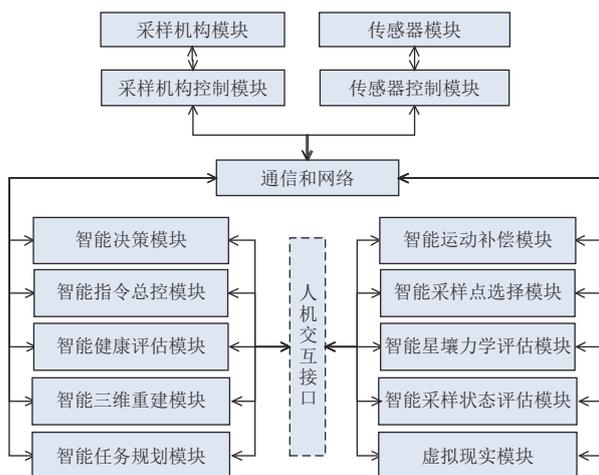


图2 采样系统智能化组成示意图

Fig. 2 Diagram of intelligent composition of sampling system

能采样系统的可靠运行，在地面系统中配置与航天器上相应的智能模块。用于地面操作人员的随时介入采样过程，与相应的智能模块进行交互。

器上模块具有高级自主工作能力的采样系统的配置方案如图3（a）所示。对于接近零重力环境工作的采样系统，当采样设备的重复定位精度足够高的情况下，可不配置智能运动补偿分析模块；对于采样机构只有一种固定运动轨迹的采样任务，可不配置智能采样点选择模块。器上的智能模块配置，也可根据实际任务需要进行选择，也可以部分智能功能由器上实现，其它智能功能由地面实现的方式进行构建。

当器上的重量资源或计算资源等受限时，器上模块可以仅配置最基本的采样机构、传感器及其控制模块，而不配置智能模块，通过地面配置的智能模块，在器地系统联合操作过程中，实现具有高级自主能力的采样系统。

通过地面系统实现高级自主工作能力的采样系统的配置方案如图3（b）所示。对于零重力环境工作的采样系统，当采样设备的重复定位精度很高的情况下，可不配置智能运动补偿分析模块；对于采样机构只有一种固定运动轨迹的采样任务，可不配置智能采样点选择模块。

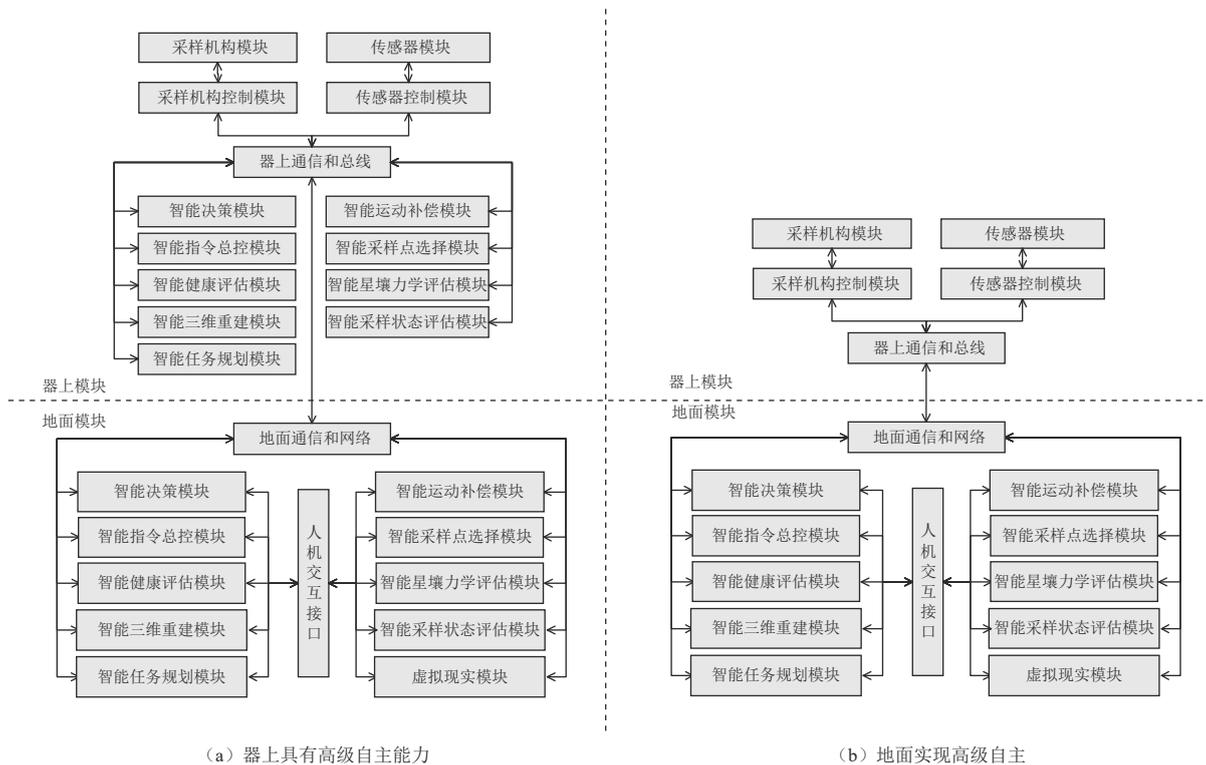


图 3 系统配置方案
 Fig. 3 System configuration scheme

通过采用柔性的动态配置手段，弥补了航天器计算资源不足，在提升任务执行效率的基础上，确保了自主化应用的可靠性。

3 实现与应用

为支持“嫦娥五号”月面采样为代表的地外天体采样任务，验证柔性智能化系统设计。在地面模拟了月面的任务执行环境，设计了与“嫦娥五号”探测器月面采样功能、性能和接口状态一致的孪生验证器。

验证器受高可靠性要求和计算资源限制，初期采样系统架构设计如图4所示。这样的配置与传统的天地

一体化操控系统较为接近，操控执行任务具有低风险、自主化程度和操控效率低等特点。

随着验证试验开展，对采样任务操控认识进一步加深，在地面系统开始配置具有智能化模块，以地面自主智能化为主系统架构如图5所示，这样的操控系统以初步具有了智能化的特点，在不增加系统风险的前提下，提高了对验证器的操控效率。

随着自主化模块设计成熟，算法和策略优化得到了充分验证，部分地面智能模块通过轻量化设计装载并转移到了验证器上，验证器自主化能力得到了提高，完成了最终任务执行状态的系统配置，如图6所示。

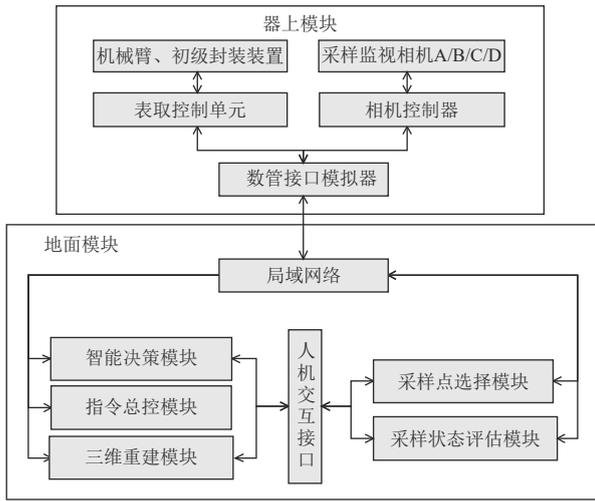


图4 验证器初级采样系统架构图

Fig. 4 Preliminary sampling system architecture diagram of the validator

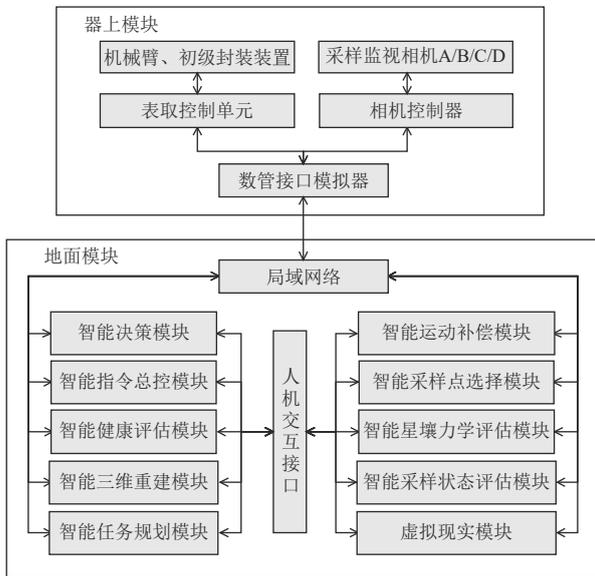


图5 基于地面自主化的验证器采样系统架构图

Fig. 5 Architecture diagram of validator sampling system based on ground autonomy

配置的智能运动补偿分析模块示意如图7所示,该模块自主控制验证器上采样机构实现基于视觉标识的机械臂末端运动补偿,精确控制机械臂运动过程。

配置的智能采样点选择模块基于智能三维重建模块形成的三维地形云图,如图8所示,通过自主分析采样点周围区域地形与采样器工作姿态的相互关系,实现采样区域内的采样点的可采性辨识和评估。

配置的智能采样状态评估模块根据图像以及遥测,自主识别和评估是否获得月球样品,并实现月球样品量的预估。图9为使用监视相机对采样状态判断的示意,图10为使用机械臂近摄相机对采样状态判断的示意。

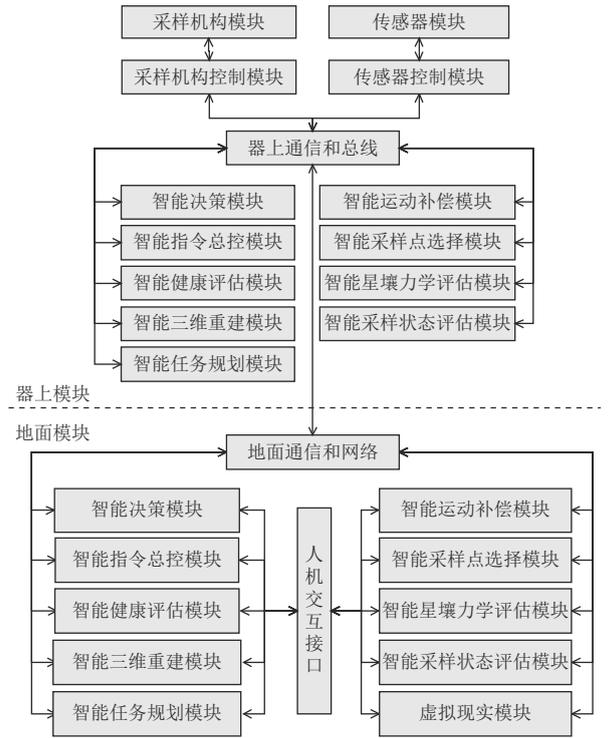


图6 验证器采样系统最终架构图

Fig. 6 Final architecture diagram of validator sampling system

验证器上构建的智能采样系统能够自主准确完成采样全过程工作,主要包括:选择采样点、机械臂运行至采样点、采样和样品状态判断、样品放样、初级封装夹持、初级封装进入密封容器(放罐)等,能够实现全过程中的指令制作和管理,以及工作过程中各模块的信息调度和管理。在单次采样的全工作过程中,约需上行指令约300条,初期系统所需的人工操作需要超过300 min,采用最终状态系统建立后可节省约150 min时间,并且消除了操作人员由于生理疲劳、操作失误、情绪波动等产生的非预期风险,实现了高效率、高质量的采样任务,验证器自主操控过程曲线如图11所示。

4 结论

本文设计构建了基于人工智能技术的地外天体采样柔性系统,系统可支持通过柔性配置航天器和地面系统在任务执行过程中的任务功能模块,从而逐渐实现航天器高自主能力提高任务执行效率。

1) 分析识别了柔性智能地外天体采样系统的基本特征:包括可选择的智能模块、可封装的智能模块、可迁移的智能模块等共6个模块。设计了智能地外天体采样系统架构,并给出了应用方案。

2) 将相应的智能模块动态配置于系统之中,在“嫦娥五号”采样封装专项试验中进行了验证。验证结果表明,在系统的支持下,任务执行效率提升一倍,

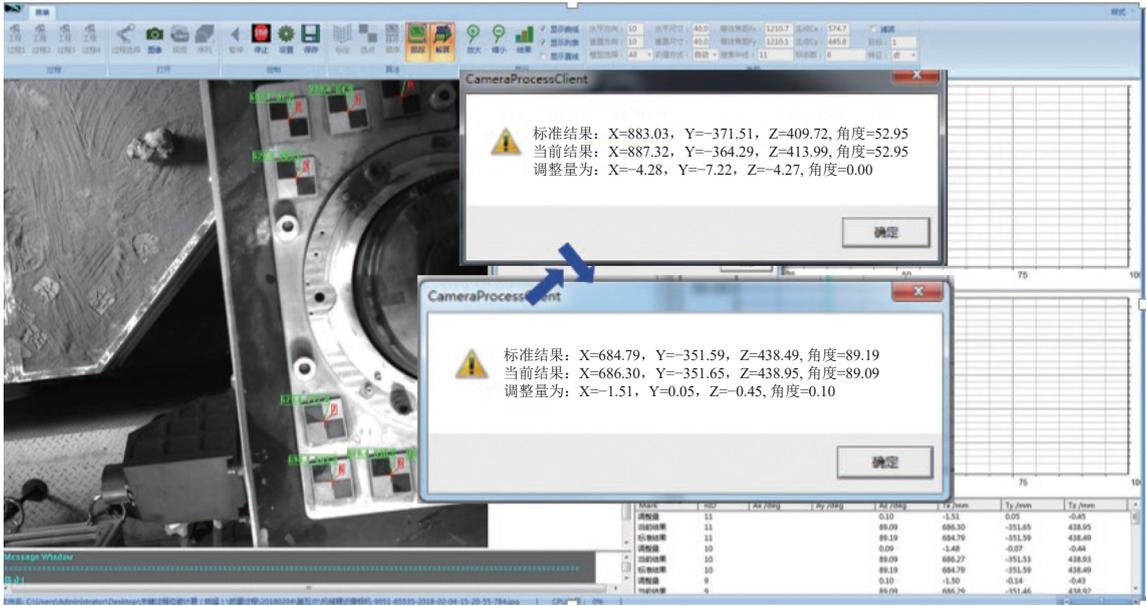
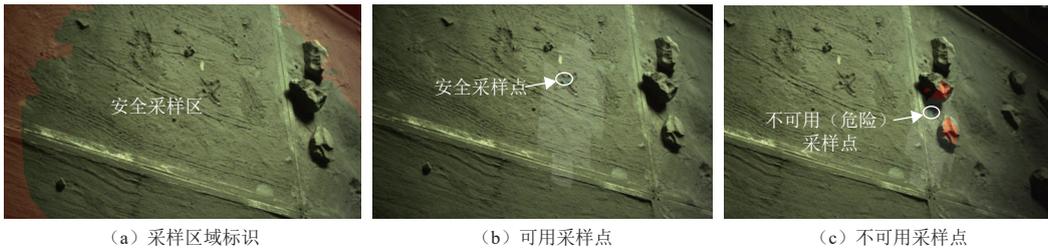


图 7 智能采样系统的夹持位置运动补偿

Fig. 7 Motion compensation analysis diagram of intelligent sampling system



(a) 采样区域标识

(b) 可用采样点

(c) 不可用采样点

图 8 智能采样系统的采样点选择

Fig. 8 Sampling point selection diagram of intelligent sampling system



(a) 采样前监视相机A图像

(b) 采样后智能识别的采样状态

图 9 智能采样系统的基于采样监视相机的采样状态判断

Fig. 9 Sampling state judgment of intelligent sampling system based on sampling surveillance camera

且有效消除了操作人员由于疲劳、操作失误、情绪波动等产生的非预期风险，实现了高效率、高质量的采样任务。由此验证了柔性智能地外天体采样系统的设

计正确性和可行性。

本研究为未来地外天体采样任务积累了技术基础及参考经验。



图 10 智能采样系统的基于近照相机的采样状态判断

Fig. 10 The intelligent sampling system is based on the sampling state judgment of the camera of the sampling mechanism

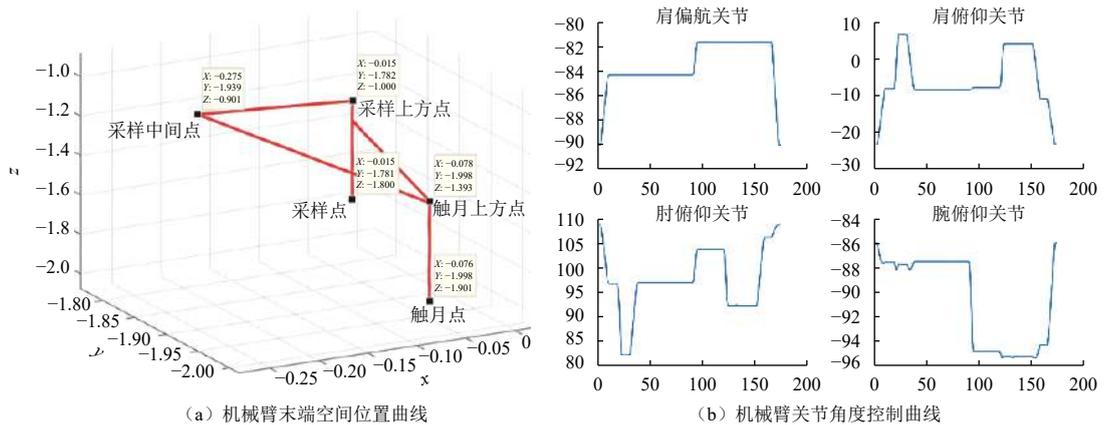


图 11 智能采样系统的机械臂运行至采样点控制曲线

Fig. 11 The control curve of the motion process of part of the manipulator in the intelligent sampling system

参 考 文 献

- [1] 金碚. 中国制造2025[M]. 北京: 中信出版社, 2015.
- [2] 杨孟飞, 张高, 张伍, 等. 探月三期月地高速再入返回飞行器技术设计与实现[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(2): 111-123.
YANG M F, ZHANG G, ZHANG W, et al. Technique design and realization of the cirumlunar return and reentry spacecraft of 3rd phase of Chinese lunar exploration propra[J]. *Sci Sin Tech*, 2015, 45(2): 111-123.
- [3] 曾毅, 刘成林, 谭铁牛. 类脑智能研究的回顾与展望[J]. 计算机学报, 2016, 1(39): 212-222.
- [4] CLOCKSIN W F. Artificial intelligence and the future[J]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 2003, 361: 1721-1748.
- [5] ZHENG C. Development and application of artificial intelligence[C]//2nd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology. [S. l.]: ICMEIT, 2017.
- [6] KARETNYK D G, GRANT E, MCGREGOR D R, et al. A review of artificial intelligence in feedback control [C]//IEEE International Symposium on Intelligent Control. Arlington, VA, USA: IEEE, 1988.
- [7] ZENG Y, LIU C L, TAN T N. Retrospect and outlook of brain-inspired intelligence research[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 1(39): 212-222.

- [7] LEITCH R. Artificial intelligence in control: some myths, some fears but plenty prospects[J]. *Computing & Control Engineering*, 2002, 3(4): 153-163.
- [8] ALEKSANDER I, MORTON H. Artificial intelligence: an engineering perspective[J]. *IEEE Proceeding*, 1987, 134(4): 218-223.
- [9] 钟义信. 人工智能的突破与科学方法的创新[J]. *模式识别与人工智能*, 2012, 25(3): 456-461.
- ZHONG Y X. Breakthroughs in artificial intelligence and innovation in methodology[J]. *RP & AI*, 2012, 25(3): 456-461.

作者简介:

邓湘金(1974-), 男, 研究员, 主要研究方向: 飞行器总体设计。

通讯地址: 北京1092信箱(100096)

电话: (010)68114995

E-mail: dengxiangjin@sina.com

金晟毅(1979-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 飞行器总体设计。**本文通讯作者。**

通讯地址: 北京1092信箱(100096)

电话: (010)68114995

E-mail: 13466576618@139.com

Design and Application of Flexible Intelligent System for Sampling on the Extraterrestrial Body

DENG Xiangjin, JIN Shengyi, ZHENG Yanhong, PENG Jing, YAO Meng, SHI Wei

(Beijing Institute of Spacecraft Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Sampling of extraterrestrial bodies is an important development direction for future deep space exploration. Different from low Earth orbit missions, sampling of extraterrestrial bodies is usually restricted by many factors, such as long communication delay, limited energy and unstructured mission execution environment. On the one hand, the ground system cannot support such tasks in real time, which requires the spacecraft to have high autonomy. On the other hand, the limited computing resources of the system on the spacecraft and the high uncertainty of the mission environment lead to the complexity and low reliability of the fully autonomous design on the spacecraft, which still needs the decision support from the ground system to a large extent. The two contradictory aspects affect and hinder the smooth implementation of the task. According to this, in this article, through the analysis of celestial sampling system and its demand for artificial intelligence technology, a celestial sampling flexible system was designed and constructed based on artificial intelligence technology, to systematically support task execution task function modules by flexible configuration of the spacecraft and the ground system in the process, so as to gradually achieve high spacecraft autonomous ability to improve the efficiency of task execution. The system has been verified and applied in Chang'e-5 sampling package test, and the verification results show that the efficiency and reliability of sampling tasks can be significantly improved with the support of the system.

Keywords: agent-ground combination; flexible sampling system; huge time delay; sampling on the extraterrestrial body

Highlights:

- The sampling system of extraterrestrial objects was analyzed, and the direction of intelligentization improvement of the existing system was proposed.
- Based on the above analysis, a flexible intelligent system design method was proposed.
- The effectiveness of the design method is demonstrated by the design and application of flexible system.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]