0254-6124/2021/41(1)-118–11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHANG Zexu, LI Ruixue. Progress and enlightenment of intelligent on-orbit operation of international space station (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(1): 118-128. DOI:10.11728/cjss2021.01.118

国际空间站智能在轨运行进展及启示 *

张泽旭　李瑞雪

(哈尔滨工业大学深空探测基础研究中心　哈尔滨 150001)

摘　要　空间站作为近地空间的大型平台, 具备长期飞行与空间科学探索能力. 随着在轨任务的不断增加, 高效空间站在轨运行管理成为挑战性的难题. 人工智能与航天技术的深度融合, 使得空间站在轨运行逐步向智能化发展, 航天器在轨运行智能化已成为必然趋势. 本文对国际空间站 (International Space Station, ISS) 在轨智能化发展历程进行了深入分析, 调研人工智能技术在其健康管理、任务规划与调度、任务操作和人机交互中的应用, 以期对未来中国空间站的智能在轨运行提供启示.

关键词　国际空间站, 智能在轨运行, 综合健康管理, 任务规划与调度, 任务操作, 人机交互

中图分类号　V 11

Progress and Enlightenment of Intelligent On-orbit Operation of International Space Station

ZHANG Zexu　LI Ruixue

(*Deep Space Exploration Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001)

Abstract　The mission of a space station that is known as the big platform of near-earth space is to enable long-term flight to explore space. As the ever-increasing number of on-orbit missions, it is a challenge to manage an effective on-orbit project. With the deep integration of artificial intelligence and space technology, the on-orbit operation of a space station has gradually developed to be intelligent. Therefore, the intelligent operation of spacecraft has become an inevitable trend. This paper focuses on the development of on-orbit intellectualization at the International Space Station (ISS) and the application of artificial intelligence technology in its health management, mission planning and scheduling, mission operation and human-computer interaction. It is hoped that the research will contribute to the intelligent on-orbit operation in China.

Key words　International Space Station (ISS), Intelligent on-orbit operation, Integrated health management, Mission planning and scheduling, Mission operation, Human-computer interaction

* 载人航天预先研究项目 (010104) 和载人航天办公室综合论证项目共同资助

2020-11-11 收到原稿

E-mail: zexuzhang@hit.edu.cn; xiaxuetian0807@163.com

0 引言

进入 21 世纪以来, 空间科技领域研究取得了重大进展, 空间科学及探测技术极大地改变了人们的生活, 丰富了对空间环境和宇宙演化的认知. 航天器正常运行是开展空间探索的基础. 为保证航天器在轨正常运行和任务的顺利完成, 需要解决很多问题, 主要包括: 对航天器进行健康管理, 监测航天器状态, 及时发现、诊断、处理故障; 持续进行任务规划和调度, 确保航天器应用效能的发挥; 高效进行常规操作和有效载荷实验, 保证科学任务的顺利执行; 设计更方便、自然的人机交互系统, 提高航天员进行航天器日常维护和任务执行工作的效率等 [1].

随着航天技术的发展, 在轨航天器数量增加, 航天器进入更深更远的太空空间, 在轨运行时间更长, 进行更为复杂的空间探测活动, 为航天器在轨运行管理带来了更多挑战. 人工智能作为 21 世纪信息科技领域最重要的变革力量, 正在深刻地影响和推动各领域的科技创新. 人工智能的巨大潜力为航天器在轨运行管理的发展提供了重要支持. 航天器在轨运行管理智能化已成为必然趋势.

自 1998 年 11 月第一个模块发射升空, 国际空间站 (International Space Station, ISS) 已成功在轨运行二十余年, 为航天器在轨运行管理积累了丰富经验. ISS 作为重要的航天技术开发、验证和应用平台, 有多项人工智能技术被其测试、验证和使用, 对未来中国航天器智能在轨运行具有极高的借鉴意义. 本文以 ISS 为研究对象, 分析人工智能技术在其健康管理、任务规划与调度、任务操作和人机交互过程中的应用, 为未来中国空间站的智能在轨运行提供启示.

1 健康管理

航天器系统健康管理是指航天器能够对自身状态进行监控和感应, 对出现的故障自主进行检测、隔离和恢复. 这是一个综合框架, 涉及的功能主要包括: 异常检测/状态监测, 诊断, 预测, 操作员的综合意识 [2]. 典型的航天器集成式系统健康管理功能如图 1 所示 [3].

基于超限检查的状态监测是最早出现的工程应用最成熟、广泛, 也是 ISS 采用的主要健康管理技术之一. 当待监测参数超出一定范围时, 认为故障已经发生或即将发生. 随着 20 世纪 70 年代末人工智能研究的重大突破, 将人工智能技术应用于航天工程成为航天工作的研究重点和热点之一. ISS 采用或测试过的利用人工智能的航天器健康管理技术大致经历了基于专家系统的故障诊断、数据驱动的异常检测和集成式健康管理几个阶段.

1.1 基于专家系统的故障诊断

随着 20 世纪 70 年代末人工智能研究取得的重大突破, 出现了一批不同用途的专家系统, 其中故障诊断专家系统为其最重要的应用领域之一 [4]. 美国国家航空航天局 (NASA) 开发了一系列较为成熟的故障建模分析工具和平台, 比较典型的有 TEAMS-

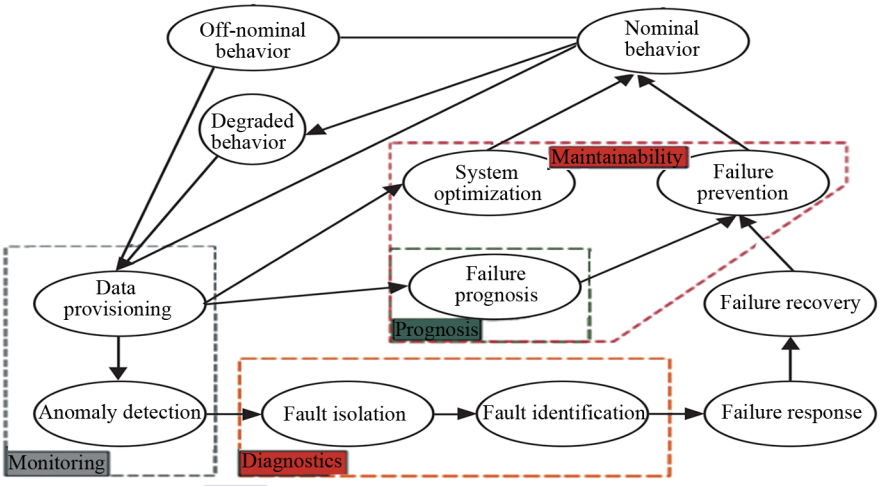


图 1 集成式系统健康管理功能

Fig. 1 Function of integrated system health management

RT[5−7], Livingstone[8,9] 和 HyDE[10,11] (Hybrid Diagnostic Engine), 目前三者均已在 ISS 中得到应用.

TEAMS-R T (TEAMS-Testability Engineering and Maintenance System) 是由美国 Qualtech 公司开发的实时诊断和在线健康监测工具, 用于 ISS 的指挥和数据处理等系统. 它通过观察不同测试点确定故障原因. 结合数据获取单元、滤波单元和特征提取单元的信息来判断监视点的状态, 这一过程被称为测试 [12]. 通过测试可确定各测试点的状态, 然后利用多信号模型包含的故障传播逻辑确定系统的状态.

Livingstone 是由 NASA 下属 AMES 研究中心开发的基于定性 (离散) 模型的故障诊断通用软件 [12], 当前版本 Livingstone 2 (L2) 已用于 ISS 热控等系统. Livingstone 通过预报行为与观测行为的比较和分析, 确定其中的故障 [12,13]. 系统的观测行为通过传感器实测给出; 定性模型用来预测正常情况下系统应有的观测结果, 即预测行为. L2 通用推理机 (General Diagnostic Engine, GDE) 是固定的, 不会因被诊断对象不同而变化.

混合诊断推理机 (Hybrid Diagnostic Engine, HyDE) 是 NASA 于 2005 年推出的故障诊断工具, 应用于 ISS 电力系统等. 与 Livingstone 系统一样, HyDE 也是基于模型的诊断系统, 利用系统模型预测与传感器观测输出之间的差异来诊断, 不过其可以使用定性 (离散) 与定量 (连续) 混合的模型 [14].

1.2 数据驱动的异常检测

进入 21 世纪后, 以传感器监测数据为基础, 数据驱动的自动异常检测/状态监测技术成为国际研究热点, 各国积极开发数据驱动的异常检测工具, 并在航天领域进行应用. 其中影响最大、应用最广的是 NASA 的 IMS[15−17] 工具. 2007 年基于 IMS 的工具开始用于实时监视 ISS 控制力矩陀螺系统, 随后不断扩展, 截至 2012 年基于 IMS 的状态监测工具已用于 25 个 ISS 子系统的实时监测 [18]. IMS 采用基于距离的聚类算法对系统正常状态的运行数据进行训练, 获得系统健康状态模型. 进行状态监测时, 将运行数据与系统健康模型对比, 判断系统是否正常运行.

1.3 集成式健康管理

2010 年 NASA 开发了下一代载人航天器故障管理系统——高级提醒和警告系统 (Advanced Caution and Warning System, ACAWS[19−21]). 虽然现在尚未在 ISS 等载人航天器上使用, 但是作为自主任务运行 (Autonomous Mission Operations, AMO) 项目的一部分, ACAWS 于 2015 年在 ISS 上进行了测试. ACAWS 系统结合了航天器系统的动态和交互式图形表示、异常检测、自动诊断分析、系统和任务影响评估等, 帮助航天器操作人员 (包括飞行控制员和机组人员) 更有效地理解和应对异常情况 [3]. 图 2 给出了 ACAWS 系统构架. 其中 ACAWS 的 4 个主要组成部分为: 异常检测 (Anomaly Detection), 故障

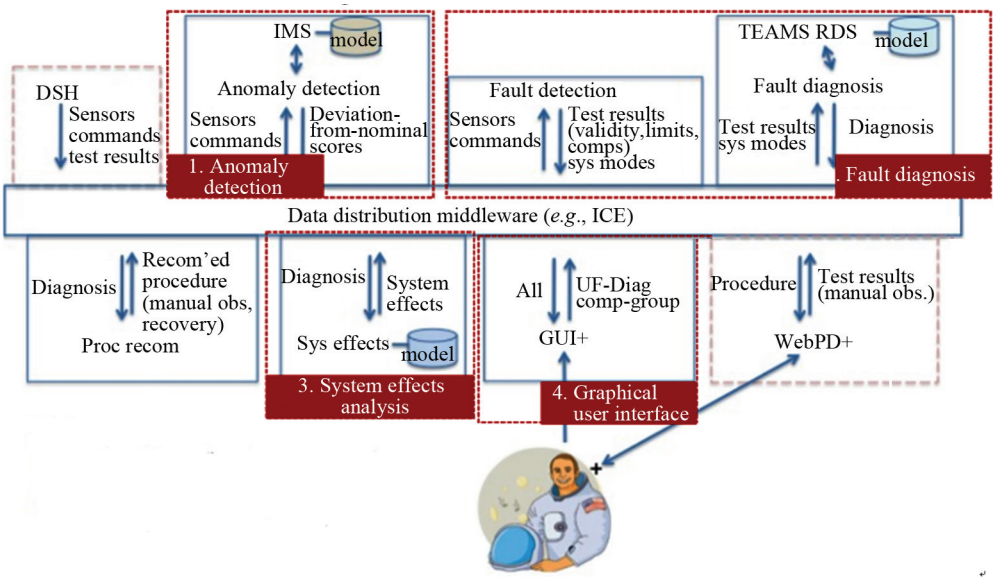


图 2 ACAWS 系统构架

Fig. 2 ACAWS architecture

检测和诊断 (Fault Detection+Fault Diagnosis), 系统影响分析 (SysEffects), 图形用户界面 (GUI)[19]. 这些模块通过面向中间对象的 Internet 通信引擎 (Internet Communications Engine, ICE) 相互通信 [19].

2 任务规划与调度

ISS 是多国合作的长期载人飞行平台, 其运行周期比以往任何载人飞行器都要长. ISS 采用分布式任务规划, 由各国相关机构参与完成, 包括 NASA 的约翰逊航天中心、马歇尔太空飞行中心以及合作国与组织 (俄罗斯、欧空局、日本、加拿大等) 的航天局 [22].

2.1 任务规划流程

图 3 给出的是一个典型的 ISS 任务级规划流程 [23], 其中 Gr&Cs (Generic Ground Rules, Requirements and Constraints) 表示一般性地面准则、要求和约束, 集成式任务规划系统 (Integrated Planning System, IPS) 和有效载荷规划系统 (Payload Planning System, PPS) 是约翰逊航天中心及马歇尔太空飞行中心采用的主要任务规划系统, 被各合作方广泛采用 [22]. 在轨操作概要 (On-orbit Operation Summary, OOS) 是任务级规划最重要的输出数据, 并且是整个任务周期内系统和载荷活动的高层规划概要, 活动规划确切到每一天, 但并不编排到特定时刻 [22].

基于对 ISS 任务规划流程的描述, 归纳空间站任务规划过程如下.

(1) 需求申请: 由空间站系统操作执行者和有效载荷用户分别制定系统操作和有效载荷操作的需求及其约束.

(2) 需求集成: 将收集到的操作需求和约束整理, 形成整体操作需求.

(3) 分布规划: 由相关任务规划机构根据资源分配情况分别进行空间站系统操作规划和有效载荷操作规划.

(4) 规划集成: 集成各单位的规划结果, 形成空间站操作序列, 传送至相应的管理机构和执行机构, 作为空间操作指南.

以 ISS 有效载荷规划系统 (PPS) 为例, 展示规划系统的构架. 如图 4 所示 [24], 有效载荷规划系统软件模块包括用户需求收集模块、数据库、用户需求处理模块、统一规划系统等.

(1) 用户需求收集组件 (URC). 有效载荷开发人员使用一个名为用户需求收集 (User Requirements Collection, URC) 的软件, 通过选择简化表示的 ISS 系统约束来提交其计划需求, 从预先定义的选择列表

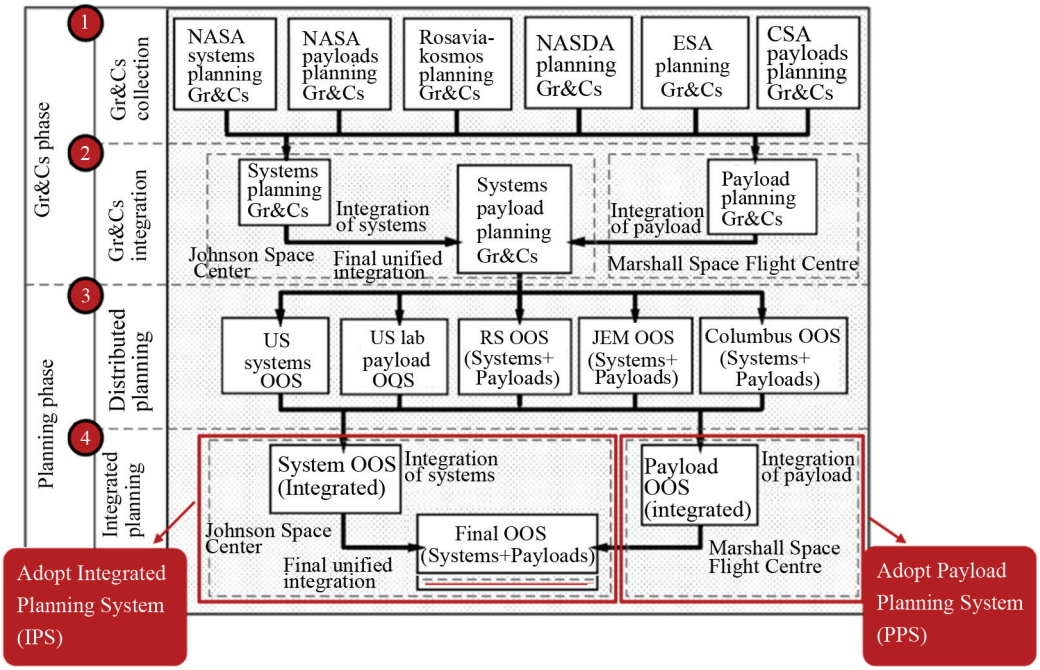


图 3 ISS 任务规划流程

Fig. 3 International Space Station mission planning process

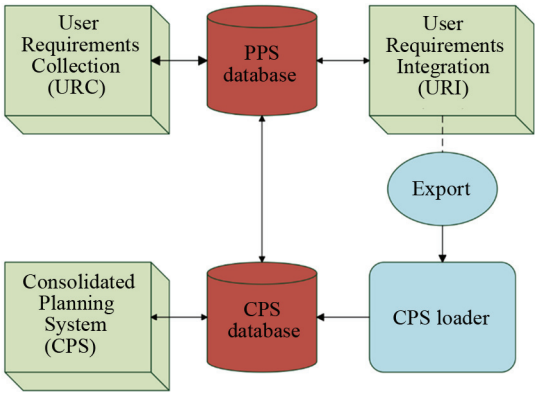


图 4 ISS 有效载荷规划系统构架

Fig. 4 Framework of ISS payload planning system

中选择活动所需约束构建活动. 为了帮助有效载荷开发者定义其科学需求, 在 URC 软件中提供了简化的 ISS 系统约束条件供选择, 例如功率、乘员、水等. 定义后的活动需求提交给有效载荷活动需求协调员以供审查.

(2) 用户需求集成组件 (URI). URC 帮助任务规划人员收集了有效载荷操作所需资源等约束, 有效载荷活动需求协调员需要将 URC 收集到的简化的 ISS 约束转换为详细的 ISS 系统约束, 用以在统一规划系统 (CPS) 中调度有效负载. 这是一个耗时繁琐的过程, 用户需求集成组件 URI 是为自动化 ISS 约束转换过程而开发的. URI 的目标是提供一个软件解决方案, 取代将有效载荷科学需求转换为 CPS 调度需求的手动过程.

(3) 统一规划系统组件 (CPS). 统一规划系统 (Consolidated Planning System, CPS) 是有效载荷任务规划系统 (PPS) 和集成式任务规划系统 (IPS) 的核心部分, 用来产生和分析地面活动与在轨活动的时间及安排, 可实施多项资源编排. CPS 包含用于构建时间线的调度引擎, 为每个需要安排的活动分配开始和结束时间, 同时记录约束的使用和可用性.

另外, 图中 Export 是 URI 的一个功能, 并不是新组件. 其为负载开发人员提交的活动自动执行约束派生过程. Export 启动 CPS 加载器, 将活动加载到 CPS 数据库 [24].

2.2 任务规划核心工具 CPS

集成式任务规划系统 (IPS) 和有效载荷规划系统 (PPS) 的核心部分是统一规划系统 (Consolidated planning system, CPS). CPS 是 NASA 最主要的规划和调度软件工具, 用来产生和分析地面活动与在轨活动的时间和安排, 可实施多项资源编排, 用于 ISS 和航天飞机任务规划. CPS 为规划人员提供活动规划、资源利用调度、时间线开发和分析、核心/有效载荷时间线集成/分离、条件约束调度以及调度冲突检测等功能 [25].

CPS 任务规划器执行一系列步骤, 分析和转换输入数据, 最终创建计划. 主要步骤如下 [26].

(1) 接受活动安排限制. 某些活动需要在特定时间/时间段执行或者不能在某些时间段执行.

(2) 规范化指定规划时间长度中包含的活动执行次数, 例如对于一年要求执行 100 次的活动, 可以将 25 次活动执行分配到特定的三个月规划范围.

(3) 根据资源可用性分析活动需求, 确定可能的关键资源. 任务规划对需求超过可用性的资源最感兴趣, 在进一步的步骤中可能不会考虑非关键资源.

(4) 解决场景需求中包含的一些模糊性, 例如哪些场景必须以特定组合 (场景 A 与场景 B 的数量相等) 或特定顺序 (场景 B 应在场景 A 之后) 出现.

(5) 根据历史进度分析上述活动执行次数和场景需求, 确定未满足的需求.

(6) 检查具有资源锁定需求的活动执行历史时间表. 如果活动指定了资源锁定要求且这些资源锁定要求扩展到多个任务规划范围, 则在所有受影响的规划范围中定义对这些活动规划的附加约束, 以便在锁定需求期间分配相同的资源, 确保跨越规划范围的操作连续性. 除了资源限制之外, 规划员还需考虑活动之间的时间关系要求等. 规划的最终约束是活动安排要求, 这些通常通过指定允许或禁止活动的时间段来进一步限制活动的时间安排. 通过定义时间依赖性, 可以将不同活动分组, 成为活动序列. 活动和活动序列由调度引擎安排在时间线上. 调度引擎使用调度约束验证活动的有效调度, 包括可用资源和条件.

(7) 将分配的活动执行次数分布在整个规划间隔中. 这是在考虑资源可用性的情况下完成的, 但不使用详细的调度方法. 规划人员将规划时间范围内的资源可用性抽象为最大、最小和平均数. 这些数值描述了资源箱的大小. 使用装箱算法 (bin packing algorithm) 将活动按间隔进行规划, 该算法将活动需求描述为一个 n 维的包, 该包将被放入 n 维资源箱中, 该箱表示调度间隔的资源可用性. 这通常会将有效负载活动分配到一周的时间间隔中, 该时间间隔将

发送给调度程序, 进行详细的调度. 装箱算法有很多, 但 ISS 所用算法不得而知. 可充分利用智能算法进行任务规划. 根据调研, 目前用于航天任务中的智能任务规划和调度算法可分为两类: 构成算法和基于修复的算法. 构成算法以逐步增加的方式来构造一个可行的调度时间表, 要求在每个步骤内, 已构造的调度时间表在此范围内是可行的. 形成一个完整的调度时间表时, 其理所当然被证明是可行的. 基于修复的算法运用随机法或贪婪法, 生成一个可能无效的完整调度. 随后, 在每步迭代中, 分析调度时间表, 使用逐步消除调度时间表内冲突的启发式修复方式, 直至发现可行的调度时间表为止. 以下列出了航天器任务规划中使用过的基于修复的搜索算法 [27,28].

①深度优先搜索法: 详尽的构造型可返回算法.

②爬山法: 仅用于修复操作, 提供给系统更好的调度时间表 (怎样才是 "更好" 由用户定义).

③模拟退火法: 类似于爬山法, 不同的是模拟退火算法产生随机修复操作来减少调度的复杂度.

④平衡轴法: 发送试图平衡搜索树的搜索.

⑤深度三轴法: 轴搜索深入至少三个等级深度.

⑥迭代深入 A*: A* 搜索用以反复尝试更深层搜索.

另外, 以下两个构成算法已经实现.

①造性回溯算法 [29]. 最开始仅以活动开始时间为基点, 在时间线上安置所有活动 (例如模拟活动对状态和资源产生的影响).

②前向调度 (forward dispatch), 这是一种贪婪的构造型算法, 首先扩展活动, 然后以前向清除方式, 将其放置在时间线的合理位置上.

2.3 机组人员自主调度

未来空间任务会尝试将人类送到离地球更远的地方进行更长时间的探索活动. 这种情况下, 由于与地球的通信将被延迟 (几秒至几分钟), 机组人员需更加自主地做决定. 机组人员对如何执行任务需要有独特的现场知识, 他们可能无法实时与地面沟通. 允许航天员在这些条件下工作的一个关键因素是提供帮助, 使其能够动态地执行指定任务, 不依赖于来自地球的连续指令. 为了解未来机组人员的需求, 提高机组人员的自主性, NASA 进行了机组人员自主安排活动的测试. 在这种模式转换中, 地面仍为机组人员提供一个时间表, 但与当前 ISS 采用的模式不同, 航天员将能够重新安排一些已规划好的任务, 并添加新的任务. 2016 年 12 月至 2017 年 7 月, 一名机组人员在 ISS 上完成了 5 次不同的机组人员自主调度测试 (Crew Autonomous Scheduling Test, CAST)[30−34].

为能够在长期太空任务中自主安排活动, 航天员需要一种工具, 使其能够在不依赖与任务控制中心交互的情况下管理自己的调度. 为此, NASA 开发了 Playbook 工具. Playbook 是一个用户友好、可移动、全面的软件工具, 使航天员能够操作和执行任务规划. 其核心组成是一个任务时间表, 该时间表显示了在任何给定的任务日所有机组成员的规划活动. 可以选择每个活动以显示该活动的详细信息, 包括相关程序、机组人员执行说明和任务控制操作说明.

与目前 ISS 上使用的其他时间表查看器相比, Playbook 是独一无二的, 具有以下特点 [32,33].

(1) 允许航天员在时间线上直接编辑计划. 航天员可以重新安排预先选定的一些活动, 这些活动被称为 "灵活" 活动 (预先选定的可自由安排的非关键活动, 一般具有较少约束). 当启用自主调度 (编辑计划) 功能时, 可以简单地将 "灵活" 活动拖放到另一个时间或日期; 通过跨时间线的行拖动活动, 可以将 "灵活" 活动重新分配给其他成员. 航天员还可以创建新的活动, 并在时间线内适当安排.

(2) 当某航天员更新时间表时, 其他成员和用户都会在 Playbook 中看到更新.

(3) 活动约束可视化展示. 任务规划的关键之一是管理任务安排中的约束和冲突. 在 ISS 上进行的实验种类多、数量大, 同时站上资源 (如机组人员时间、电源、视频通道) 有限, 这些不同类型约束通常由地面任务规划处理. 由于航天员不具备数十名任务规划人员掌握的操作知识, 不能进行专业的约束和冲突处理, 因此 Playbook 在时间轴上提供了 "禁行区", 即在界面中显示为灰色区域. 某区域为灰色表明由于现有的限制, 某些活动无法安排在该时间区域. 这种活动约束的可视化展示极大减少了航天员进行自我调度时的认知负荷.

(4) 重规划后冲突的特殊展示. Playbook 不能阻止机组人员重新安排活动. 但是, 如果发现活动不遵守建模的调度约束, 则会显示冲突. 不正确的规划在视图中显示为红色轮廓、红色点和警告. 通常, 一个或多个活动处于冲突状态时, 其所有依赖活动都显示出违规行为.

3 任务操作

ISS 任务操作的发展历程如图 5 所示. 早在 1992 年, Timeliner 被 NASA 选为 ISS 的用户界面语言, 后来 ISS 通过 Timeliner 系统编译并在 ISS 多路复用器 (Multiplexor/Dimultiplexors, MDMs) 上解释执行脚本, 实现了科学实验和一些核心操作的自动执行 [35,36]. 2005 年 4 月 ISS 上首次装载 HAL 系统, 管理在 ISS 多路复用器上解释执行的许多独立、复杂的 TimeLiner 脚本 [37]. 在此阶段航天器的飞控管理主要还是在地面执行的. 2015 年在 ISS 上进行了两个航天员自主任务操作 (Autonomous Mission Operations, AMO) 演示实验: AMO-Express[38,39] 和 AMO TOCA-SSC[40−42], 在软件帮助下实现了航天员自主管理 ISS 的某些硬件和软件. AMO-Express 实验展示了航天员一键激活或停用 ISS 7 号机架 (Express rack) 的能力. 在 AMO TOCA-SSC 实验中, 航天员利用 AMO 软件自主管理了 ISS 上水中有机碳的分析实验.

在中国航天工程中已实现了一些科学实验和核心操作的自动执行, 本文主要介绍在 ISS 上进行的航天员自主任务操作 (Autonomous Mission Operations, AMO) 演示实验. AMO 项目展示了通过先进软件帮助航天员在较少的地球援助下操作航天器. 通过自动化航天器功能以及将职责从任务控制中心转移到机组人员, 实现航天员的自主管理.

3.1 AMO-Express 演示实验

AMO-Express 演示实验开发了专用的 Timeliner 自动程序, 展示了航天员或地面飞控人员一键激活或停用 ISS 7 号机架的过程. ISS 的 7 号机架上装有有效载荷, 但是这些有效载荷不需要一直通电运行. 7 号机架的激活和停用耗时且操作密集, 需要协调三个飞行控制位置、47 个步骤、57 个命令、276 个遥测检查以及多个 ISS 系统 (动力、热、生命支持) 和有效载荷 [38]. 该功能主要通过 Timeliner 脚本封装实现, 封装后 Timeliner 自动程序由 2 个脚本共 9 个序列组成, 由运行在 ISS 命令和控制多路复用器以及有效载荷多路复用器上的 TimeLiner 软件完成.

2014 年 3 月至 9 月, 在 ISS 上进行了 AMO-Express 实验, 演示了地面飞控人员通过单个命令为 ISS 7 号机架通电和配置的过程. 2015 年 3 月至 2017 年 4 月, 在 ISS 上进行了 AMO-Express 2.0 实验, 演示了 ISS 机组人员在空间站上一键操作, 为 7 号机架自动通电和配置的过程. NASA 计划 2021 年 4 月至 2021 年 9 月在 ISS 上进行 AMO-Express 2.5 实验, 演示机组人员启动软件自动为 7 号机架通电和配置过程, 并在软件帮助下处理各种模拟故障 [39].

3.2 TOCA-SSC 演示实验

2015 年 NASA 自主任务行动 (AMO) 项目在 ISS 上进行了 AMO TOCA-SSC 演示实验, 将选定的 ISS 系统的操作和管理移交给空间站机组人员. ISS 机组人员管理两个不同的航天器系统, 即总有机碳分析仪 (TOCA) 和站支持计算机 (SSC). 在每次 TOCA 分析之后, 机组人员利用 AMO 软件判断 TOCA 是否正常工作, 以及水中总有机碳是否在趋势内. 如果机组人员有任何关于该演示实验的问题, 他们被要求首先咨询 AMO 软件, 由软件回答机组人员的问题而不必呼叫地面工作人员. 如果水质或硬件性能被认为是不正常的, 机组人员被要求使用 AMO 软件提供下一步建议.

图 6 给出 AMO TOCA-SSC 演示实验中 AMO 的服务器框架 [41]. AMO 软件包括任务规划 (图中④)、异常检测 (图中①和②)、故障诊断 (图中③) 等模块, 这些模块处理完数据后会调用 JSON 编写器 (图中⑤) 将处理结果生成大量的动态内容, 最后在用户界面显示.

收到一个 TOCA 数据文件时, AMO 体系结构处理数据过程如下 [41].

(1) TOCA 示例文件将传递到共享文件系统.

(2) AMO 监视器组件检测到此文件, 确定是新

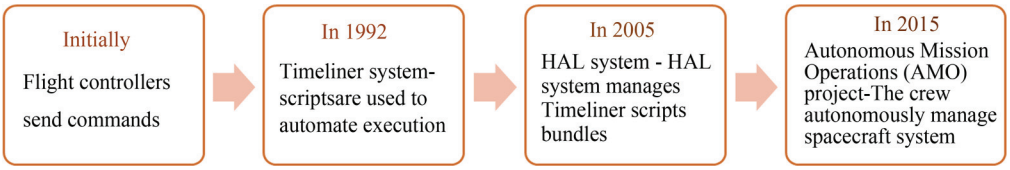


图 5 空间站任务操作发展历程

Fig. 5 Development history of space station mission operation

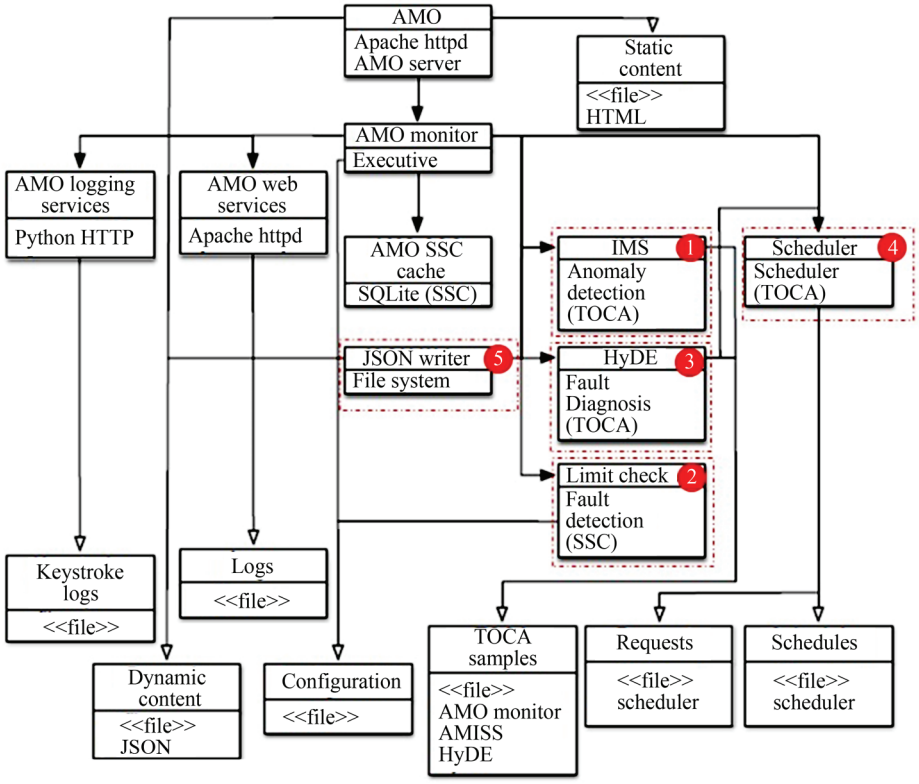


图 6 AMO 服务器构架

Fig. 6 AMO server architecture

文件, 执行一些检查.

(3) AMO 监视器调用 IMS.

(4) 一旦 IMS 完成, AMO 监视器调用 HyDE.

(5) 一旦 HyDE 完成, AMO 监视器调用 JSON 编写器.

(6) 一旦 JSON 编写器完成, 动态创建的内容已准备好由 Web 服务器和用户界面显示.

4 人机交互

在载人航天工程中, 面对恶劣的空间环境, 如何保障航天员的生命安全和正常工作是最先需要考虑的问题. 近年来各国宇航局开始对智能交互技术进行研究, 包括使用穿戴式医疗设备监测航天员健康, 利用增强现实 (AR) 技术辅助航天员完成在轨任务操作, 将虚拟现实 (VR) 技术应用于航天员训练等, 航天工程中的人机交互正在向智能化方向发展.

基于可穿戴设备的智能交互技术以提升用户体验为核心, 提升用户对环境的感知能力以及设备对用户操作的反馈能力. 可穿戴设备采用的智能交互技术涉及多点触控、语音识别、手势识别、眼球识别等技术. 人机交互输出界面或回馈包括文字显示、数据分析、语音反馈、动态或虚拟影像等, 这些输出界面的呈现均需通过内容运算系统分析, 因此 AR, VR 及混合现实 (MR) 等技术也逐渐应用于智能穿戴设备.

早在 2004 年 NASA 艾姆斯研究中心的 Astrobionics 团队和斯坦福大学国家空间生物技术中心联合研制了一种轻便小巧、坚固并易于使用的传感器和电子设备, 称为 Lifeguard[43], 其可用于航天员在空间站的日常以及出舱活动中, 连续数小时记录航天员生命体征并通过无线技术按需实时传输数据. Lifeguard 由生理传感器 (心电图/呼吸电极贴片、脉搏血氧仪、血压监测仪), 小型可穿戴计算机 (CPOD) 以及一个小型显示器组成.

2009 年欧洲航天局 (ESA) 设计研发了 WEAR (Wearable Augmented Reality)[44,45] 可穿戴 AR 系统, 并验证了 AR 技术在 ISS 上应用的可行性. 该系统使用空间站上的工作计算机, 集成了头戴跟踪与显

示系统, 在一只眼睛的视场中添加了三维图形与指示数据. 当航天员佩戴该系统帮助其进行在轨工作任务时, 可以通过语音交互对系统进行控制, 不影响双手操作, 同时能够通过位置跟踪与目标识别确定航天员的目视方向, 提示信息可逐步显示在航天员眼前的穿透式显示屏上, 辅助航天员执行任务. 2009 年 9 月, 航天员在哥伦布实验舱内进行了 AR 技术应用试验, 试验内容是在 AR 系统辅助下进行空气过滤器检查, 包括设备识别与操作指导, 舱内噪声环境下语音交互试验以及 AR 系统与 ISS 设备管理目录系统数据库的集成功能等.

2014 年 11 月意大利航天局在 ISS 测试了 MagIC Space[46] 新型智能服装, 该服装可以测量航天员心电图、呼吸、体温, 包含了三轴加速度计, 并对航天员睡眠期间的监测数据进行了医学分析, 探究航天员在微重力环境下睡眠质量差的原因.

ESA 设想将一些商用设备用于 ISS 人机交互中, 设计了 mobiPV 系统, 用于提高航天员自主任务和天地协作任务的效率 [47]. 2015 年 9 月在 ISS 上进行了为期 10 天的 mobiPV 测试实验. 该系统将智能手机固定于航天员手腕上, 结合谷歌眼镜、iPad 和电脑来为航天员提供显示. mobiPV 系统可为航天员和地面操作人员提供语音交互, 天地通信, 航天员实时工作视频, 天地任务进程同步, 任务操作步骤提示.

2015 年 12 月两台 Hololens 头盔被发射到 ISS 上 [48]. 这是 NASA 和微软合作的 Sidekick 项目的一部分, 该项目旨在使用微软的虚拟 Hololens 头盔协助航天员在远离地球的地方工作. 在 ISS 上使用 HoLolens 的远程专家模式, 通过 Skype 在航天员与地面飞行控制团队的技术人员之间建立联接, 使地面技术人员能够看到航天员所看到的景象, 并提供相应建议. HoLolens 还具有程序模式, 可以播放本地存储的全息动画.

2016 年 ESA 完成了为期二年的 EdcAR (Engineering data in cross platform AR) 项目研发. EdcAR 项目开发了一个新的 AR 系统, 该系统运行在 Microsoft HoloLens 平台上, 通过给航天员提供操作演示步骤, 在减少航天员错误操作的同时, 提高任务执行速度. 该系统在 ESA 的航天员中心进行了实验测试, 目前已完成对 ISS 中机舱过滤器更换的机载培训和 ISS 维修工作远程支持两项功能的验证. ESA 计划将该系统与 ISS 上的 mobiPV 软件集成, 用于 ISS 未来的运行, 特别是飞行维护任务.

5 启示

人工智能技术在 ISS 上已得到一定应用, 并且智能化程度不断加深. 在健康管理方面, ISS 沿用了专家系统进行故障诊断, 广泛采用数据驱动的异常检测技术, 并且向综合健康管理方向发展. 在任务规划与调度方面, ISS 采取分层级、分布规划, 降低了系统设计复杂性, 采用智能算法生成活动时间线, 并且积极探索机组人员参与调度, 部署在轨远程规划终端, 让航天员具有一定自主安排活动的能力, 满足航天员个人需求. 在任务操作方面, ISS 积极尝试由航天员进行管理, 对于步骤较多较复杂的实验或日常操作, 进行脚本集成和封装, 实现一键操作, 自动执行; 同时尝试将任务规划、异常检测、故障诊断等功能集成, 通过一键操作和功能集成, 减少航天员的认知负荷和工作难度, 提高航天员工作效率, 避免人为执行的错误, 提高安全性和可靠性. 在人机交互方面, 积极推动跨媒体智能交互, 通过智能穿戴设备采集航天员生理参数, 为航天员提供语音、手势等新的交互方式, 进行多维信息整合, 在为航天员提供更全面的信息和支持的同时, 使交互更加高效、自然.

当前中国正在积极开展和推进空间站建设, 空间站在轨运行面临着重大的机遇和挑战, 对人工智能技术的应用存在迫切需求. 积极推进空间站在轨运行智能化, 可以实现空间站在轨管理能力跃升, 进而提升中国在航天领域的科技实力.

参考文献

[1] WANG Zhonggui. Theory and Practice of Manned Space Flight Control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 15-28 (王忠贵. 载人航天飞行控制理论与实践 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 15-28)

[2] FIGUEROA J F, WALKER M G. Integrated System Health Management (ISHM) and autonomy [C]//2018 AIAA Information Systems — AIAA Infotech. Florida: Aerospace, 2018: 1152

[3] LI Ruixue, ZHANG Zexu. Enlightenment of ISS health management system on construction of China Space Station [J]. *Manned Spaceflight*, 2020, **26**(1): 120-127 (李瑞雪, 张泽旭. 国际空间站健康管理系统对我国空间站建设的启示 [J]. 载人航天, 2020, **26**(1): 120-127)

[4] JI Changwei, HUANG Wenhu, RONG Jili. Fault diagnosis technology for foreign manned spacecraft [J]. *Chin.*

Space Sci. Technol., 1995, **15**(1): 23-29 (纪常伟, 黄文虎, 荣吉利. 国外载人航天器故障诊断技术 [J]. 中国空间科学技术, 1995, **15**(1): 23-29)

[5] DEB S, PATTIPATI K R, SHRESTHA R. QSI's integrated diagnostics toolset [C]//1997 IEEE Autotestcon Proceedings Autotestcon'97. IEEE Systems Readiness Technology Conference. Systems Readiness Supporting Global Needs and Awareness in the 21st Century. Anaheim: IEEE, 1997: 408-421

[6] PATTIPATI K R, RAGHAVAN V, SHAKERI M, *et al.* TEAMS: testability engineering and maintenance system [C]//Proceedings of 1994 American Control Conference-ACC'94. Baltimore: IEEE, 1994: 1989-1995

[7] MATHUR A, DEB S, PATTIPATI K R. Modeling and real-time diagnostics in TEAMS-RT [C]//American Control Conference, 1998. Proceedings of the 1998. Philadelphia: IEEE, 1998: 1610-1614

[8] HAYDEN S, SWEET A, SHULMAN S. Lessons Learned in the Livingstone 2 on Earth Observing One Flight Experiment [M]. Infotech Arlington: Aerospace, 2004: 7000

[9] HAYDEN S, SWEET A, CHRISTA S. Livingstone model-based diagnosis of Earth observing one [C]//AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference. Chicago: AIAA, 2004: 6225

[10] NARASIMHAN S, BROWNSTON L. HyDE-a general framework for stochastic and hybrid model based diagnosis [J]. *Proc. DX*, 2007(7): 162-169.

[11] LI Bo, WANG Xinsheng, ZHOU Kaixing, *et al.* Fault diagnosis based on hybrid model reasoning [J]. *Space Electron. Technol.*, 2014, **1**: 116-122 (李博, 王新升, 周开兴, 等. 基于混合模型推理的故障诊断研究 [J]. 空间电子技术, 2014, **1**: 116-122)

[12] MA Lei. Advanced aircraft fault diagnosis tools abroad [J]. *Qual. Reliab.*, 2009, **5**: 54-58 (马磊. 国外先进的飞行器故障诊断工具 [J]. 质量与可靠性, 2009, **5**: 54-58)

[13] Diagnosis of Complex Dynamical Systems, NASA.gov [OL]. [2008-03-29]. https://www.nasa.gov/centers/ames/research/technology-onepagers/diagnosis_complex_systems.html

[14] SOOTS S, BURCHETT B. Dynamic fuzzy models of the fastrac startup sequence for fault detection [C]//46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 2008: 882

[15] IVERSON D J. System and method for outlier detection via estimating clusters [P]. US Patent No.9, 336, 484. 2016-5-10

[16] IVERSON D L, MARTIN R, SCHWABACHER M, *et al.* General purpose data-driven monitoring for space operations [J]. *J. Aerospace Comput. Inform. Commun.*, 2012, **9**(2): 26-44

[17] SPIRKOVSKA L, IVERSON D, HALL D, *et al.* Anomaly detection for next-generation space launch ground operations [C]//SpaceOps 2010 Conference Delivering on the Dream Hosted by NASA Marshall Space Flight Center and Organized by AIAA. Huntsville: AIAA, 2010: 2182

[18] NASA Administrator. ODVEC Monitoring System Certified and Deployed in JSC Mission Control Center [EB/OL]. [2013-08-16]. https://www.nasa.gov/centers/ames/orgs/exploration-tech/tech-updates/tech-update-o-dvec.html

[19] COLOMBANO S P, SPIRKOVSKA L, BASKARAN V, *et al.* A system for fault management and fault consequences analysis for NASA's Deep Space Habitat [C]//AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition. San Diego: AIAA, 2013: 5319

[20] MCCANN R S, SPIRKOVSKA L, SMITH I. Putting integrated system health management to work: development of an advanced caution and warning system for next-generation crewed spacecraft missions [C]//AIAA Infotech Aerospace (IA) Conference. Mountain View: AIAA, 2013: 4660

[21] SPIRKOVSKA L, AASENG G, IVERSON D, *et al.* Advanced Caution and Warning System, Final Report-2011 [R]. California: NASA, 2013

[22] LUO Yazhong, LIN Kunpeng, TANG Guojin. Review of space station operation mission planning technology [J]. *Manned Spaceflight*, 2012, **18**(2): 7-13, 20 (罗亚中, 林鲲鹏, 唐国金. 空间站运营任务规划技术评述 [J]. 载人航天, 2012, **18**(2): 7-13, 20)

[23] POPOV A. Mission planning on the international space station program, concepts and systems [C]//IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Public, 2003: 3427-3434

[24] MUERY K, FOSHEE M, MARSH A. Automated derivation of complex system constraints from user requirements [C]//IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology. California: IEEE, 2006

[25] TORRES C M, GRETHEN M. Planning Space Operations-Past, Present & Future [C]//SpaceOps 2002 Conference. Houston, Texas.: AIAA: https://doi.org/10.2514/6.2002-T3-08

[26] MAXWELL T, HOWELL E. Planning as a precursor to scheduling for Space Station payload operations [C]//Space Programs and Technologies Conference. Huntsville: AIAA, 1995: 3535

[27] NASA Technology Transfer Program, Innovator Spotlight: David Iverson [OL]. https://technology.nasa.gov/features/dave-iverson.html

[28] FUKUNAGA A, RABIDEAU G, CHIEN S, *et al.* Aspen: A framework for automated planning and scheduling of spacecraft control and operations [C]//Proc. International Symposium on AI, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS), Tokyo, Japan, 1997

[29] MUSCETTOLA N, FRY C, RAJAN K, *et al.* On-board planning for New Millennium Deep Space One autono-

my [C]//Aerospace Conference Proceedings IEEE. Snowmass: IEEE, 1997

[30] HEALY M, MARQUEZ J, HILLENIUS S, *et al*. Progress of Crew Autonomous Scheduling Test (CAST) on the ISS [C]//Annual Technical Symposium: AIAA Houston-Human Systems Integration ERG Technical Symposium. Houston, Texas. NASA Technical Reports Server, 2017:JSC-CN-39290-1 https://ntrs.nasa.gov/citations/20170005534

[31] MARQUEZ J J, HILLENIUS S, HEALY M. Increasing Human Spaceflight Capabilities: Demonstration of Crew Autonomy through Self-Scheduling Onboard International Space Station [R]. San Francisco: International Space Station Research & Development Conference, 2018

[32] MARQUEZ J J, HILLENIUS S, KANEFSKY B, *et al*. Increasing crew autonomy for long duration exploration missions: self-scheduling [C]//2017 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2017: 1-10

[33] MARQUEZ J J, HILLENIUS S, HEALY M, *et al*. Lessons Learned from International Space Station Crew Autonomous Scheduling Test [R]. Berkley: International Workshop on Planning and Scheduling for Space, 2019

[34] HILLENIUS S, MARQUEZ J, KORTH D, *et al*. Evaluation of Crew-Centric Onboard Mission Operations Planning and Execution Tool: Year 2 [R]. Galveston: NASA Human Research Program Investigators Workshop, 2018

[35] BROWN R, BRAUNSTEIN E, BRUNET R, *et al*. Timeliner: automating procedures on the ISS [C]//Spaceops Conference. Cambridge: AIAA, 2002

[36] STETSON H K, DEITSCH D K, CRUZEN C A, *et al*. Autonomous payload operations onboard the international space station[C]//Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2007

[37] CORNELIUS J R. International Space Station (ISS) Payload Autonomous Operations [C]//International Conference on Space Operations. Moffett Field: AIAA, 2016

[38] Stetson H K, Haddock A T, Frank J, *et al*. AMO EXPRESS: A Command and Control Experiment for Crew Autonomy Onboard the International Space Station[C]// AIAA Space Conference & Exposition. 2013

[39] Autonomous Systems and Operations, NASA Ames Research Center, Moffett Field, California, United States [OL]. https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/explorer/Investigation.html?#id=7582

[40] FRANK J, SPIRKOVSKA L, MCCANN R, *et al*. Pohlkamp and L Morin, Autonomous mission operations [C]//2013 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2013: 1-20

[41] POHLKAMP K M, MAULDIN J, FRANK J D. Demonstrating autonomous mission operations onboard the international space station[C]//AIAA Space Conference & Exposition. Houston: AIAA, 2015

[42] Autonomous Mission Operations TOCA Autonomous Operations Project. NASA Ames Research Center, Moffett Field, California, United States [OL]. [2012-03-3]. https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/1248.html

[43] MONTGOMERY K, MUNDT C, THONIER G, *et al*. Lifeguard-a personal physiological monitor for extreme environments [C]//Conference of the Proceeding IEEE Engineer Medicine and Biology Society. California: IEEE, 2004

[44] TINGDAHL D, DE WEERDT D, VERGAUWEN M, *et al*. WEAR++ 3D model driven camera tracking on board the International Space Station [C]//International Conference on 3d Imaging. Liege: IEEE, 2013

[45] SCHEID F, NITSCH A, KOENIG H, *et al*. European SDTO Operation at Col-CC [C]//SpaceOps 2010 Conference Delivering on the Dream Hosted by NASA Marshall Space Flight Center and Organized by AIAA. Huntsville: AIAA, 2010: 2259

[46] RIENZO M D, VAINI E, LOMBARDI P. Wearable monitoring: a project for the unobtrusive investigation of sleep physiology aboard the International Space Station [C]// Computing in Cardiology Conference. Nice: IEEE, 2016

[47] BOYD A, FORTUNATO A, WOLFF M, *et al*. mobiPV: a new, wearable real-time collaboration software for Astronauts using mobile computing solutions [C]//International Conference on Space Operations. The Netherlands: AIAA, 2015

[48] The Hololens device launched to the International Space Station. Jet Propulsion Laboratory [OL]. [2015-06-25]. https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4642