

文章编号: 1001-0920(2003)02-0203-04

卫星的智能规划与调度

代树武, 孙辉先

(中国科学院 空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

摘要: 以对地观测卫星为例, 分析卫星的结构功能和飞行任务的特点, 并在此基础上建立卫星智能规划与调度系统。规划与调度系统由卫星模型和推理机组成, 其中模型描述卫星结构功能和各种约束条件, 推理机分析并解决这些约束条件, 形成一个没有冲突的飞行计划。规划与调度系统还具有修正计划的能力, 能满足任务删除、更改和新任务插入等需求。

关键词: 智能规划与调度; 计划修正; 卫星; 自主控制

中图分类号: V 525

文献标识码: A

Intelligent planning and scheduling system for spacecraft operations

DAI Shu-wu, SUN Hui-xian

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: An intelligent planning and scheduling system for earth observation satellite is developed. The planning and scheduling system is composed of a spacecraft model and a general reasoning engine. The spacecraft model describes spacecraft's structure, resources, function and all kinds of constraints imposed on the spacecraft. The reasoning engine analyzes these constraints and then solves them to get a rational operation plan. The planning and scheduling system can also iteratively repair the existing plan to get a new one by adding tasks, deleting tasks and changing task of the existing plan.

Key words: Intelligent planning and scheduling; Iterative repair; Spacecraft; Autonomous control

1 引言

在现代航天事业中, 对航天器自主能力的要求越来越高。智能规划与调度是实现航天器自主控制的关键技术之一。在传统的测控方式中, 需要大量航天器设计工程师, 有效载荷设计工程师与航天器的用户合作, 根据用户需求和航天器的各种约束条件, 制定出合理的飞行计划, 这需要消耗大量的人力和物力。因而有必要改进这种传统的飞行计划制定方式, 提高航天器规划与调度的智能化水平。规划与调度智能水平的提高有助于更有效地利用航天器有效载荷, 减轻对地面测控站的要求, 提高完成飞行任务

的机会。

典型的规划系统有基于 F 规则的 STRIPS 系统, 具有学习能力的 PULP 机器人规划系统和分层规划系统等^[1,2]。近年来, 针对航天领域也开发了一些规划与调度系统。例如哈勃望远镜的规划和深空一号的规划等^[3~9]。本文介绍一种规划与调度系统, 它针对对地观测卫星, 能完成规划与调度两项功能, 并具有实时修正飞行计划的能力。

2 对地观测卫星简介

在各种航天器中, 对地观测卫星占了很大比重。对地观测卫星的主要任务是利用卫星有效载荷, 对

收稿日期: 2001-11-27; 修回日期: 2002-03-04。

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向性项目(KGCXZ-JG-07)。

作者简介: 代树武(1973—), 男, 吉林珲春人, 博士后, 从事空间飞行器自主控制的研究; 孙辉先(1946—), 男, 山东青岛人, 研究员, 从事空间综合电子系统的研究。

各种用户感兴趣的地球上的资源进行成像,并把图像传回地面。根据成像机理可以分成可见光成像、红外和微波成像等。典型民用成像卫星有 Ikonos, Quickbird, Obview 以及 Spot 系列等。本文以可见光成像对地观测卫星为例介绍飞行任务的规划与调度。

通常卫星由姿态控制、轨道控制、有效载荷、星务管理、热控和数传等分系统组成,各分系统的功能如下:姿态控制分系统进行姿态捕获,控制卫星姿态;轨道控制分系统通过 GPS 等手段测量卫星的位置,进行轨道计算和轨道维持;热控分系统测量卫星各监控点的温度,并按需求进行温度调节;有效载荷分系统是获取图像数据的分系统,其有效载荷特性决定了观测卫星的种类,卫星上也可能有多个有效载荷,具有多种成像手段;数传分系统负责数据管理和传输;星务管理分系统负责整星任务管理。

另一方面,卫星是一个整体,各个分系统必须相互协同,才能有效地完成任务。例如有效载荷工作时会对姿态指向提出一定要求,同时需占用一定的星上资源,这需要规划与调度系统综合考虑。

3 规划与调度实现

一般情况下,规划与调度需要完成两类任务,一类是根据轨道覆盖情况确定拍摄图像(飞行任务)的时间,另一类是将飞行任务分解成比较具体的飞行计划。这两种任务所需要的知识不同,采用的方法也不同,因此将两种任务分开处理。当对地观测任务确定后,首先根据观测任务的重要性、图像分辨率精度要求、任务完成期限、日照情况等条件和轨道覆盖情况,确定各观测任务的执行时间,得到飞行任务序列。第2步工作是将这样一个飞行任务序列,按卫星的结构功能和约束条件分解成详细的控制指令序列。这一工作涉及到卫星结构功能的描述、各种约束条件的表达、推理机设计和计划的表示方式等多方面内容。下面介绍如何完成这一功能。

3.1 智能规划与调度系统结构

智能规划与调度系统由卫星模型和通用模块两大部分组成^[10],如图1所示。卫星模型是智能规划

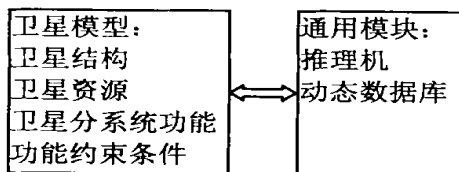


图1 智能规划与调度系统结构

与调度系统的知识库,它由卫星结构、卫星资源、卫星分系统功能和卫星功能约束条件等组成。通用模块主要由推理机和动态数据库组成,其中推理机具有制定计划和实时修正计划两大功能。规划与调度系统工作时,推理机接收飞行任务,从卫星模型中调用知识,利用各种算法和启发知识制定飞行计划,制定计划时的中间结果、最终结果和计划修正结果等均存放在动态数据库中。

3.2 卫星模型

为了自主制定卫星飞行计划,规划与调度系统必须了解卫星的构造与功能,以及完成各种功能所需要满足的各种约束条件。例如在完成拍摄图像任务时,要求相机必须指向拍摄目标,存储器有足够的存储空间,以及有足够的电源可用等,这些知识统称为卫星模型知识。在规划与调度系统中,这些知识必须表示成计算机可以理解的语言。

1) 卫星结构:可见光成像对地观测卫星由多个分系统构成,每个分系统具有一定的功能和特性。例如分系统的动作、状态、资源使用情况和健康情况等,这些功能特性能用一组特征变量表示。因此,卫星结构可以分层表示,先用分系统描述卫星,然后用特征变量描述分系统。特征变量按分系统的功能选取,将那些需要同时描述的功能都设为一个单独的特征变量。例如照相机拍摄时要求系统处在打开状态,健康状态良好,因此相机分系统至少有3个特征变量,一个表示动作,一个表示状态,第3个监测相机的健康状态。

2) 卫星资源:卫星上有多种资源,这些资源为卫星实现各种功能提供保障。例如为星上的仪器供电的电源系统,储存数据的大容量存储器,为姿态改变提供动力的推进剂等。为保证卫星正常工作,在规划与调度系统中必须对这些资源的特性进行清晰的描述,保证在任意时刻卫星不过度调用资源。卫星资源描述为^[6,8,9]: resource { 资源所属分系统, 资源名称, 容量, 占用特性, 再生特性}。其中:占用特性是指分系统为了执行动作而调用资源时,是永久占用资源还是执行完动作后立即释放资源;再生特性是指能否通过一系列动作来再生资源。在再生资源中有一个相关项,描述哪些功能可以使资源再生。

3) 卫星功能与约束条件:卫星分系统用特征变量描述,其中的动作和状态特征变量仅描述分系统具有哪方面的功能特性,而具体的功能则用特征变量的取值来描述。特征变量在某种条件下可以取一个动作值或状态值,代表分系统能完成这个动作或

处于这种状态。这些取值联合在一起对卫星进行功能描述。例如照相机动作特征变量的取值为 turnoff, turnon, takepicture, 分别代表关闭相机、打开相机和拍摄图像。此外, 对每一类飞行任务, 都由一些特定的分系统特征变量取值完成, 这也在卫星功能模型中描述。

特征变量的取值受卫星的各种特性所约束, 执行时有一定的前提条件。动作取值主要有状态限制、协同限制、准备工作要求、后续工作要求、资源约束、健康状态约束和执行时间约束等。这些约束条件用一个结构框架描述, 如图 2 所示。

```

action (分系统名称, 特征变量, 动作取值,
      [state (状态约束),
      coordination (协同约束),
      before (准备工作),
      after (后续工作),
      monitor (监测需求),
      resource (资源需求),
      duration (持续时间),
      resultstate (状态影响)])
  
```

图 2 动作约束条件

状态取值的约束与动作取值约束稍有不同, 它一般不需要其他系统配合, 不会改变飞行器的状态, 但它需要一个描述项, 描述从其他状态变成当前状态的方法(通过执行动作)。

3.3 规划推理机

卫星模型建立以后, 规划与调度系统便具有了卫星功能、资源状况以及各种约束条件等知识。在这个基础上, 推理机选择各个飞行任务, 对它们进行分解, 解决各种约束问题, 完成计划。

1) 飞行计划的表示形式: 飞行计划按上述卫星分系统特征变量来组织。在飞行计划中每一个特征变量都是一个独立的描述项, 它在时间轴上取不同的值, 代表卫星控制状态的变化。这些特征变量在时间轴上的取值称为一个 timeline^[9], 飞行计划由所有这些 timeline 组成。在本规划与调度系统中, 有多种类型的 timeline。例如动作 timeline 由多个动作取值和执行时间组成; 状态 timeline 记录不同时间对分系统的状态要求; 资源 timeline 描述不同时刻各个动作对资源的使用情况; 监测 timeline 记录不同时刻需要监测的变量。

从另一个方面看, 在执行每个飞行任务前, 卫星各分系统处在一定状态, 这个状态称为初始状态。在飞行计划中每个飞行任务由 timeline 中多个动作取

值、状态取值、资源调用及其执行时间组成, 它们相互配合, 使卫星能在初始状态下完成飞行任务。完成飞行任务后, 卫星处在一个新的状态, 称为该任务的结束状态。在飞行计划中每个任务的初始状态、结束状态以及为完成这个任务而采取的动作、状态、资源调用等都被标上相应的标号, 以便推理机处理。

2) 推理过程: 飞行计划的制定过程是一个满足各种约束的过程。推理机从飞行任务序列中选取一个任务后, 按如下步骤进行处理:

Step 1: 读取卫星系统的当前状态, 作为本任务的初始状态。一般情况下这个状态就是系统正常执行上一个任务后的结束状态。

Step 2: 从卫星模型中找一个可以完成当前任务的动作, 并读取它的约束条件。在卫星功能模型中描述了哪些特征变量的取值可以完成这个飞行任务。

Step 3: 将约束条件当作操作符, 通过不停地操作处理完成约束传递的过程, 将约束传递的结果作为飞行计划的一部分。

Step 4: 检查约束传递的结果是否满足任务的初始状态, 如果满足, 则表明当前的结果已经符合初始状态要求, 继续 Step 5; 否则继续 Step 3 的约束传递。

Step 5: 进行时间约束检查, 如果有冲突, 则进行修正; 否则继续下一步。

Step 6: 资源使用检查。主要检查资源是否超量使用, 当资源过度调用时, 通过修正时间和前后移动动作执行时间等来消除冲突。如果没有冲突, 当前飞行任务处理完毕, 继续选择下一个飞行任务, 直到任务列表中所有任务都处理完毕。

在时间约束检查和资源约束检查时, 有时会出现通过修正仍无法满足约束的情况, 此时需调整飞行任务。总之, 飞行计划的制定过程就是一个为飞行任务选择合适的动作、状态、执行时间和资源分配的过程。

4 规划实时修正

在对地观测卫星飞行过程中, 飞行任务不是一成不变的。飞行计划的变更主要包括: 由于对观察目标失去兴趣或由于环境原因无法完成, 而取消这个任务; 用户有时会对某些目标产生新的兴趣或希望了解突发事件, 这时需添加新的任务, 而在添加新任务的同时往往造成其他任务的相应改变; 对目标和轨道覆盖特性进一步了解后希望调整飞行任务的执行时间, 以获取更高质量的图像。许多情况下, 飞行

计划的变更仅仅需要作一些修正,因此要求规划与调度系统能在原计划基础上进行修正,以提高反应速度^[3,4,7]。

1) 任务删除: 在飞行计划中, 飞行任务是用动作、状态以及资源调用表示的。在飞行计划中它们都有一个相应的标号, 这个标号与飞行任务的标号一致。删除某个飞行任务时, 这些相应的动作也一起删除。但任务删除不是简单的删除几个动作和状态, 还要考虑其他影响。删除任务主要影响后续飞行计划的系统状态和资源使用情况。记3个连续排列的任务分别为 F, D 和 S , 假设现在需要删除任务 D 。在删除任务 D 之前, 任务 S 是以任务 D 的正常结束状态为初始状态的, 删除任务 D 后, 任务 S 需要以任务 F 的结束状态为初始状态。一般情况下, 任务 F 和 D 的结束状态是不相同的, 这需要重新考虑任务 S 的执行条件。在飞行计划中为每个飞行任务记录了一个执行时的初始状态和结束状态, 比较任务 F (S 新的初始状态)和任务 D (S 原来的初始状态)的结束状态, 找出差异, 然后通过增加或删除动作来满足任务 S 的初始条件。

同时, 对资源占用情况也需重新计算, 检查是否存在过度调用, 并计算动作取消后对再生资源的影响。

2) 任务添加: 如果在添加位置有适当的时间间隔, 能够插入新的飞行任务, 此时可以按照制定飞行计划时采用的方法, 以添加新任务前的状态作为初始条件, 完成飞行任务的动作、执行时间和资源调用的选择; 然后调整后面的计划, 使它们满足由于添加任务导致的状态变化和资源调用的改变。如果添加位置没有充裕的时间间隔, 需要移动前面和后面的任务或删除某个任务为新任务提供足够的空间, 删除任务时尽量选择任务重要性低的任务。

3) 任务更改: 飞行任务在许多情况下不需要删除或添加, 而是在小范围内调整执行时间。如果有充足的空间, 只需将飞行任务相应的动作整体平移一下即可; 如果空间不够, 也可以将被修正任务的前面和后面任务的执行时间修改一下。

5 结 语

智能规划与调度系统是卫星自主控制的主要方面, 它涉及卫星模型描述、推理机设计和规划的实时

修正等技术。本文通过特征变量描述卫星的结构功能, 用框架结构表示功能约束, 建立了卫星的功能和约束模型。这种模型表示方法结构清楚, 易于工程师进行检查和修改。推理时把约束条件作为操作符, 通过约束传递来满足各种约束条件, 有效地实现了规划与调度。通过状态比较和重新计算资源使用情况实现了飞行计划的修正。

参考文献(References):

- [1] 蔡自兴, 徐光祐 人工智能及其应用[M] 北京: 清华大学出版社, 1996
- [2] Nils J Nilsson *Artificial Intelligence: A New Synthesis* [M] 北京: 机械工业出版社, 1999
- [3] Monte Zweben, Brian Daun, Eugene Davis, et al *Scheduling and Rescheduling with Iterative Repair, Intelligent scheduling* [M] San Francisco: Morgan Kaufmann, 1994
- [4] Estlin T, Rabideau G, Darrem Mutz, et al Using continuous planning techniques to coordinate multiple rovers [A] *IJCA 1999 Workshop on Scheduling and Planning* [C] Stockholm, 1999. 1-7.
- [5] Chien S, Stechert A, Mutz D. Efficient heuristic hypothesis ranking [J] *J of Artificial Intelligence Research*, 1999, 10(6): 375-397.
- [6] Muscettola N. *HSTS: Integrating Planning and Scheduling, Intelligent Scheduling* [M] San Francisco: Morgan Kaufmann, 1994
- [7] Steve Chien, Russell Knight, Andre Stechert, et al Using iterative repair to increase the responsiveness of planning and scheduling for autonomous spacecraft [A] *IJCA 1999 Workshop* [C] Stockholm, 1999. 1-8
- [8] Chien S, Rabideau G, Willis J, et al Automating planning and scheduling of shuttle payload operation [J] *Artificial Intelligence*, 1999, 114(1-2): 239-255
- [9] Nicola Muscettola, Pandurang Nayak P, Barney Pell, et al Remote agent: To boldly go where no AI system has gone before [J] *Artificial Intelligence*, 1998, 103(1-2): 5-48
- [10] 代树武, 孙辉先 卫星运行中的自主控制技术[J] *空间科学学报*, 2002, 22(2): 146-151.
(Dai S W, Sun H X. Autonomous control for spacecraft [J] *Chinese Journal of Space Science*, 2002, 22(2): 146-151.)