

面向多星协同的卫星自组织自主控制体系结构*

张 健 戴金海

(国防科技大学 航天与材料工程学院 湖南 长沙 410073)

摘 要 针对多卫星系统的自主控制需求,提出了一种面向多星协同的单星自组织自主控制体系结构(SAASO)。分析了多卫星系统自主控制的要求和特点,介绍了 SAASO 的层次化结构,讨论了各层的 Agent 组成、功能及相互联系,阐述了基于 SAASO 的自主控制系统工作原理,并探讨了系统自组织形式。SAASO 面向不同的航天任务、不同自主程度的卫星设计,具有一定的通用性。

关键词 卫星;多卫星系统;自主控制体系结构;多 Agent 系统;自组织

中图分类号 :V423 文献标识码 :A

A Novel Satellite Autonomy Architecture with Self-organization for Multi-satellite Coordination

ZHANG Jian, DAI Jin-hai

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract A novel satellite autonomy architecture with self-organization (SAASO) for multi-satellite coordination is put forward to fulfill the autonomous control demands of multi-satellite systems. The demands and characteristics of the autonomous control are analyzed. The components, functions and relationships of agents are introduced. The mechanism of the autonomous control based on SAASO is expounded, and the form of self-organization is discussed. SAASO is designed for various space missions and various autonomous satellites, thus it has generality to a certain extent.

Key words satellite; multi-satellite system; autonomy architecture; multi-agent system; self-organization

卫星的自主控制体系结构是自主控制各项功能集成的基础,是自主控制的关键所在。目前,基于 Agent 进行卫星自主控制体系结构设计,已成为自主控制领域的一个研究热点^[1-4]。然而,国际上还没有一种既面向多星协同又充分考虑卫星内部自治的自主控制体系结构:文献[1]中的 Remote Agent 是自主控制的雏形;文献[2]基本满足了卫星内部自治的要求;文献[3]实现了卫星自主控制体系结构由内部自治到多星协同的突破,但忽视了卫星内部的自治性和各分系统之间的协调。也就是说,目前国际上还不存在从卫星子系统层自主到卫星系统层自主到多星协同的自主控制体系结构。另外,上述结构均针对具体的空间任务设计,不具有普适性。

1 面向多星协同的卫星自主控制体系结构

1.1 多卫星系统自主控制任务分析

多卫星系统的任务主要包括:航天任务需求决定的总体任务目标,以及总体任务目标实现过程中的构型保持、系统重构、故障检测等任务。其中,构型保持包括各卫星自身的轨道维持以及卫星之间的碰撞规避;系统重构包括故障卫星的移出(系统降级)以及新卫星的加入(系统升级)。系统降级由卫星不可修复的故障引起,故障检测是系统降级的依据,而系统升级是由于总体任务需求增加或改变引起的。对于自主协同工作的多卫星系统而言,上述任务处于不同层次上。轨道维持、故障检测属于卫星系统级

* 收稿日期 2005-04-21

基金项目 武器装备预研基金项目(514200107KG01)

作者简介 张 健(1978—),女,博士生。

任务,而总体任务、系统重构、碰撞规避均需要卫星之间的协同。

围绕上述任务,多卫星系统自主控制要实现的目标有^[2~3]:

自主任务管理与生成;自主任务规划与分配;自主制定飞行指令序列;自主控制并协调各个分系统和有效载荷的工作;自主监控卫星状态和任务执行情况;自主故障检测和系统重构;星上信息自主处理与分析,等等。

1.2 面向多星协同的卫星分层自主控制体系结构

多卫星系统自主实现任务目标,既要求多颗卫星之间相互协同的能力,又要求单颗卫星内部决策、规划以及各个自主分系统之间相互协调的能力。本文从子系统级自主、系统级自主以及多星协同等多个层面上,提出了面向多星协同的卫星分层自主控制体系结构。如图1所示。

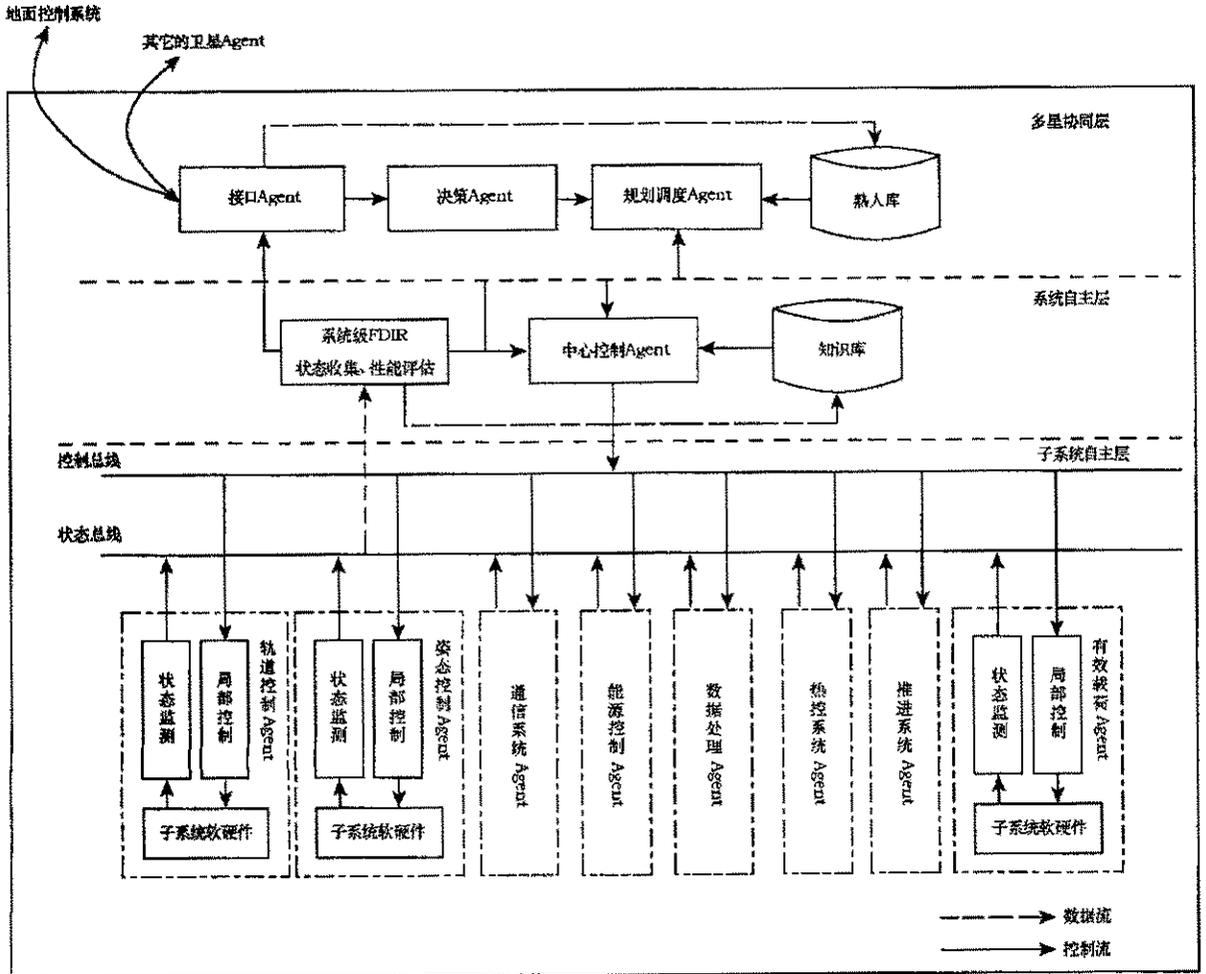


图1 面向多星协同的卫星自主控制体系结构

Fig.1 Satellite autonomy architecture for multi-satellite coordination

卫星自主控制体系结构从逻辑上分为三层:底层针对卫星各分系统,由各个自主的 Agent 完整状态监测和局部控制,并通过总线构成一个实时网络控制系统,在此基础上增加智能控制实现单星自治,再增加星间协同的功能实现多星协同。

1.2.1 子系统级自主层 Agent 组成及功能

卫星通常由多个分系统组成,它们具有相对独立的功能,能完成各自的子任务。子系统级自主层由自主的分系统 Agent 组成,各分系统 Agent 的功能如下:

轨道控制 Agent 进行轨道确定和轨道控制;

姿态控制 Agent 进行姿态捕获,控制卫星姿态;
通信系统 Agent 实现星上链路的按需分配;
能源控制 Agent 管理星上能源;
数据处理 Agent 负责数据管理和传输;
热控 Agent 测量温度并进行温度调节;
推进系统 Agent 提供推力,用于调整轨道和姿态等;
有效载荷 Agent 对有效载荷进行监测和控制。

各分系统 Agent 的结构相同,均包含状态监测、局部控制、系统软硬件三个部分。各分系统 Agent 一方面接受上层控制指令并完成相应的功能;另一方面对外部环境的变化做出反应,处理异常情况,实现自我管理。

1.2.2 系统级自主层 Agent 组成及功能

卫星本身是一个整体,各个分系统必须相互协同,才能有效完成任务。为此,自主控制必须能够有效地对各分系统进行协调和控制。中间层完成卫星系统级自主,包括中心控制 Agent 和系统级故障检测与重构(FDIR)Agent。系统级 FDIR Agent 从整体上对卫星进行状态监测、性能评估和故障诊断,并在出现故障时给出解决方案;中心控制 Agent 是卫星内部独立自主的控制中心,也是多星协同层与子系统级自主层连接的纽带,其功能有:

(1)协调各个自主的分系统,解决各个分系统自主工作引起的资源冲突;

(2)作为多星协同层与子系统自主层之间的信息通道,接受上层发送的指令,并且将卫星整体的状态信息如位置速度信息、健康状态信息等反馈给上层 Agent;

(3)将多星协同层分配的飞行任务分解为具体的飞行计划时间序列,然后根据知识库中的知识,如卫星模型、各子系统的动态模型、资源使用情况等产生一个详细的控制指令序列,并传递给特定的分系统 Agent。

1.2.3 多星协同层 Agent 组成及功能

多卫星系统在完成任务的过程中,卫星之间的交互与协同起着关键的作用。系统顶层为多星协同层,包括接口、决策、规划调度等三类 Agent。

接口 Agent 负责星间信息的传递,一方面接收系统中其它 Agent 的信息,另一方面将自身信息传递给其它的卫星 Agent。为了保证地面系统任意层面的控制介入能力,交互 Agent 还要接受地面命令,包括使命级任务、整体飞行计划以及控制指令等。

多卫星系统信息保存在熟人数据库(acquaintance database)中,包括卫星数目、各卫星完成特定任务的能力、卫星之间的相对位置关系,等等。

决策 Agent 针对多卫星系统的任务,分为总体任务决策 Agent 和子任务决策 Agent。总体任务决策 Agent 确定完成总体任务目标需要的卫星及有效载荷的类型和数目;子任务决策 Agent 的决策依据是熟人数据库中的信息,当卫星之间的相对位置小于某阈值时,做出碰撞规避决策;根据卫星状态信息以及故障检测 Agent 的信息,在故障无法处理情况下,做出系统重构的决策;根据系统总体任务要求以及待加入卫星的状态信息,做出系统升级的决策。

规划 Agent 针对多卫星系统任务,完成不同层次上的规划任务,主要包括:任务分配规划、系统重构规划,等等。任务分配规划包括总体任务目标的分解,以及系统重构过程中的任务重新分配;系统重构规划主要完成多卫星系统成员移出或进入时位置的重新分配。编队重构规划大致包含两种情况:一是期望构型中的每个位置由指定的卫星占据;二是期望构型中的每个位置由指定类型的卫星占据。调度 Agent 对多卫星系统的任务进行调度,特别是当多个相互冲突的任务同时发生时,调度 Agent 根据任务优先级进行排序,达到消解冲突的目的。

卫星的分层自主控制体系结构在逻辑上将卫星内部自治与星间协同分离,各卫星之间只在多星协同层之间发生信息交互,卫星子系统层自主为私有部分,仅与自身的中心控制 Agent 发生信息交换,这样既保证了各卫星之间能够互操作并及时交换信息,又保证了各卫星内部的自治性,可以实现快速反应

和智能性的统一。自主控制根据环境和任务变化动态组织 Agent 来完成任务目标,体现了体系结构的自组织性^[5]。

2 SAASO 的自组织形式

SAASO 的自组织主要表现在两个方面:一是多卫星系统整体组织结构发生变化以及卫星角色功能发生变化时,需要进行动态组织;二是环境或任务变化时,需要进行动态组织。

多 Agent 系统是一个组织,组织中的各个 Agent 通过扮演不同的角色来发挥其功能和作用,通过构成不同的组织结构来实现任务目标^[6]。目前,多卫星系统的自主控制主要有四种组织结构^[7]。多卫星系统要具有组织重构的能力,表现为不同控制结构之间的转换,也可表现为某种组织结构下卫星角色的调整,这都将引起卫星角色的变化,进而要求卫星内部结构的相应调整和重新组织。自主程度最低的卫星接收并执行来自其它卫星或地面的命令,为此其自主结构只包含交互 Agent 以及各个自主的分系统 Agent;自主程度较高的卫星具有局部规划的能力,为此要增加中心控制 Agent 的规划功能;自主程度最高的卫星能为整个多卫星系统进行整体规划,为此要增加多星协同的功能,需要包含所有的交互、决策、规划、调度、执行 Agent。

另一方面,从多卫星系统的任务分析可以看出,各任务的复杂程度不同,需要的 Agent 也不同。针对具体的任务,进行动态配置,合理地组织相应的 Agent,组成“交互——决策——规划调度——执行”回路,在保证任务完成的同时避免系统资源的浪费。

针对具体的任务目标和控制结构,SAASO 的自组织既取决于卫星的角色,又取决于当前任务,是两者的组合。篇幅所限,不能展开讨论。

3 结 论

针对多卫星系统自主控制的星间协同和内部自治的要求,提出了一种通用的面向多星协同的卫星自组织自主控制体系结构 SAASO。给出 SAASO 的基本框架和功能描述,简要讨论了 SAASO 自组织形式。Agent 的具体设计、体系结构的实现、自组织机制以及进一步的仿真分析等,还需要进一步地研究。

参 考 文 献:

- [1] Muscettola N, Nayak P P, Williams B C. Remote Agent To Boldly Go Where No AI System Has Gone Before [J]. Artificial Intelligence, 1998, 103: 5-47.
- [2] 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): 147-153.
- [3] Schetter T. Intelligent Multi-Agent-Systems for Autonomous Control of Multiple Satellite Clusters [D]. Master thesis, University of Washington, 1999.
- [4] Schetter T, Campbell M, Surka D. Multiple Agent-based Autonomy for Satellite Constellations [J]. Artificial Intelligence, 2003, 145: 147-180.
- [5] 许国志. 系统科学 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000: 173-202.
- [6] Zambonelli F, Nicholas R J, Michael Woodridge. Organizational Abstractions for the Analysis and Design of Multi-Agent Systems [A]. Wooldridge Ciancarini P. Agent-Oriented Software Engineering [C], Lectures Notes in AI, Berlin: Springer Verlag, 2001.
- [7] Campbell M, Schetter T. Comparison of Multiple Agent-based Organizations for Satellite Constellation [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2002, 39: 274-283.

