

基于元模型的无人平台系统柔性体系结构设计初探

杨佩¹, 毛可¹, 王慧平², 周献中¹

(1. 南京大学 控制与系统工程系, 南京 210042; 2. 中国兵器工业集团第二〇七研究所, 太原, 030006)

摘要: 多无人平台系统面临着分布式、数量众多、平台异构等困难, 因此设计一种具有良好柔性、可扩展性的无人平台系统成为了一个亟需解决的问题。本文针对无人平台的上述挑战, 提出了任务元模型、逻辑元模型和控制元模型, 利用扩展层级网络任务分配方法、四类 Agent 工作方式建模以及 Agent 功能的服务化架构实现了适应任务变更、物理状态变更、多兵种协同作战和系统功能服务化的柔性重组。最后, 本文总结了该柔性体系结构设计方案的特点和优势。

关键词: 无人平台系统, 元模型, 柔性, 体系结构

0 引言

未来多无人平台的作战系统, 面临着无人作战平台数量众多、平台结构和数据结构不同、各作战平台地域上分散分布等问题, 未来的作战对抗也需要快速整合战场资源, 协调各平台进行有效地协作和协同以获得对抗优势, 因此设计一种具有良好弹性、可扩充性、规范统一的体系结构成为了亟须解决的问题。

无人平台现已成为各国研究的热点, 但主要集中在对多无人平台协同控制的研究上^{[1][2][3]}, 如国内李一波^[4]、王新星^[5]等对无人平台自主特性的建模研究, 而对无人平台系统, 尤其是从柔性体系结构角度研究无人平台系统相对较少。目前柔性体系结构建模方法的研究主要集中在柔性装配系统^{[6][7]}、基于服务化的柔性系统构建^{[8][9]}以及智能决策支持平台构建^[10]等方面。

本文将无人平台系统的体系结构分为逻辑部分、物理部分和控制决策部分, 分别采用有向图、Agent、协作图与序列图来进行描述, 建立了相应的任务元模型、控制元模型、逻辑元模型, 并给出了一种基于元模型的无人平台系统柔性化体系结构设计方案。文章最后对本文所提出的模型与设计进行了分析和小结。

1 基本概念与总体设计思路

1.1 元模型

元模型 (Meta-Model, MM) 集是建模方法中的最小模型子集, 是对所研究论域内的概念、概念实体之间的相互关系的综合抽象。元模型提供了整个建模体系结构的一般性模型, 是不易于再分割的最小模型单元。它可以集成为更大范围的模型, 是构建复杂模型的基础。

在元模型层次, 对模型作了高一层的抽象, 元模型主要描述模型的结构以及相互作用, 对具体的参数和参数操作进行了抽象。元模型的建模方法和模型的建模方法是一致的, 但是它针对更高抽象层次和信息进行的。基于元模型的建模方法, 是忽略系统内部的具体特征和细节描述, 而从系统的需求出发, 通过分析和研究子系统之间的相互作用建立系统的元模型。

1.2 无人平台系统的层次化结构模型

本文将无人平台系统分解为逻辑部分, 物理部分和控制决策部分, 针对系统的三个部分, 建立了相应的任务元模型、控制元模型和逻辑元模型。其中, 任务元模型是整个作战任务的宏观模型, 而对于作战单元的建模 (逻辑元模型) 是微观模型, 在这两层模型中间存在着控制元模型。任务元模型可以对逻辑元模型进行重组, 每个任务元模型中都有特定部分描述参与该任务的作战单元, 以此来选定和重组所有需要建模的作战单元。基于任务元模型、控制元模型和逻辑元模型可以构建若干元任务、控制对象及作战单元, 如图 1 所示。其中, 任务对象层主要为任务的层次化分解结构, 在系统中担任重构的作用; 控制对象和元任务之间是一对一的信息连接, 通过该连接实现任务的实施; 控制对象和作战平台之间则是多对多的连接关系, 通过这些连接实现平台向控制单元报告状态信息、控制单元向平台发送控制指令等功能。

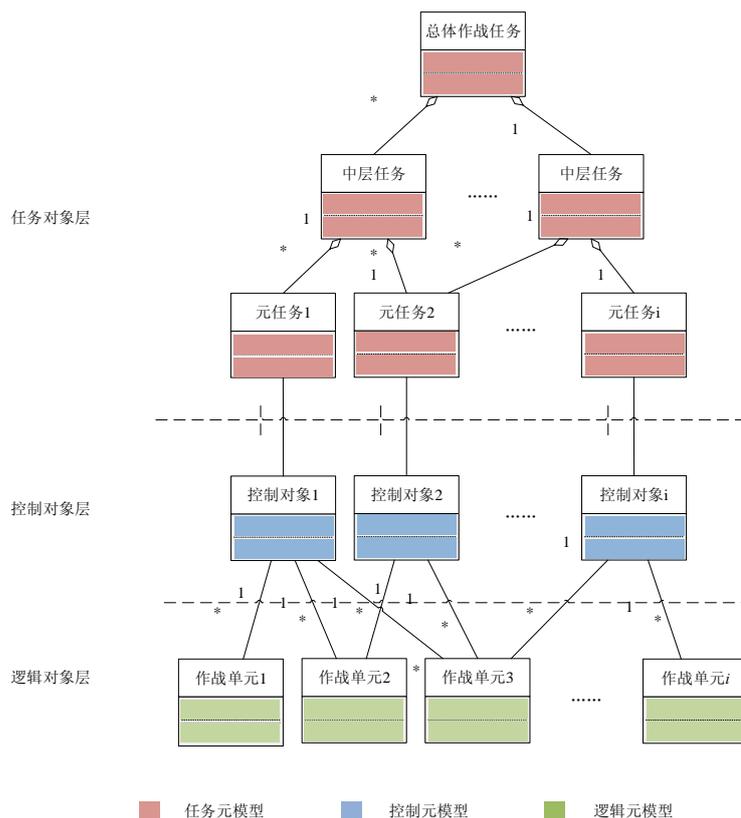


图 1: 层次式无人平台系统模型结构

1.3 柔性结构的形式化描述

基于元模型的无人平台系统是一种能适应外界扰动和内部状态变化的柔性无人平台系统，它能够在现有系统的基础上通过调整系统功能以适应系统面临的变化。它在结构上表现出可伸缩性和可集成性，在行为上表现出智能性和自治性。该系统可以用五元组表示：

$$FOS(\{T_i\}, \{MT_j\}, \{P_k\}, \{DS_l\}, \{AM_m\}, \{S_n\})$$

其中， $\{T_i\}$ 为系统任务集合， $\{MT_j\}$ 为分解后的元任务集合， $\{DS_l\}$ 为任务分解方法集合，是任务向元任务的映射， $\{P_k\}$ 是无人平台集合， $\{AM_m\}$ 代表任务分配方法集合，是元任务向无人平台的映射， $\{S_n\}$ 代表任务分配和分解策略集合，体现了“人在环”的思想。

当任务集合 $\{T_i\}$ 发生变化时，系统能够依据任务分解策略 DS_l 得到新的元任务集合 $\{MT'_j\}$ ，再根据任务分配策略 AS_m 将元任务在无人平台群 $\{P_k\}$ 上进行分配，使无人平台群重新组合得到新编队；当无人平台集合 $\{P_k\}$ 发生改变时，系统依据任务分配策略 AS_m 重新将元任务在无人平台群上 $\{P'_k\}$ 进行分配继而重新组合编队；当分解策略 $\{DS_l\}$ 或分配策略 $\{AS_m\}$ 发生变化时，系统则根据新的算法准确重新分解、分配和组合形成新的编队。

综上所述，基于元模型的柔性体系结构而有效的适应以下四种情况：（1）任务变更的情况。即上级作战命令发生改变而使系统的作战使命发生变化的情况，这种变化会影响系统完成使命的行动策略，导致任务以及任务之间的序列、信息流程和任务的功能需求、行动方案等发生改变。（2）物理状态变更的情况。包括外部物理状态和内部物理状态的变化，即外部战场态势的改变和系统内部参数所变化，包括作战单元受损、单元间链接中断等。（3）多兵种协同作战任务。是指在作战方案生成时不考虑部队编成情况，将兵力部署的对象缩小到作战单元。（4）功能服务化。即通过对单元功能的服务化封装，使得无人平台系统在作战方案生成时的任务分配粒度进一步细化，指挥控制的对象是部署在作战单元上的功能模块。因此，本文提出的方案可有效地解决上述四种情况下的柔性重组难题，从而使得无人平台系统具备了更加灵活的作

战能力。

2 任务分解及任务元模型的构建

任务元模型的建立分为两个阶段，即对作战任务进行逐步层次化分解阶段和对分解的任务之间逻辑约束关系的建模阶段。为了降低系统的复杂程度，本文提出了任务的层次化分解方法，将复杂任务细化为能由作战资源直接执行和完成的元任务序列，并确定元任务优先顺序和资源需求。该过程将一个抽象的复杂任务细化为更加具体的、相对独立的元任务，是一个粒度从粗到细的优化决策过程。

任务层级分解的基本思想是综合考虑任务的结构特征、环境约束、分解方式、求解主体的求解能力以及子任务间的联系等因素，以任务求解为驱动把总体任务细化成若干具体的、层次清晰明确的、相互独立的（同层子任务间无直接消息传递）、易执行的子任务，且上一层次的子任务对下一层次的全部或某些子任务起着支配作用，最后并经综合整理得到一种递阶的树状层级结构。一个复杂任务可以划分为多个子任务，子任务则再进一步细化为元任务，形成分层的树状结构，其顶层根节点即复杂任务。子任务之间有四种关系，即串行关系、并行关系、选择关系和循环关系。

本文采用层级任务网络（HTN）规划作为作战任务分解的指导方法和技术手段，并对其进行扩展和改进以引入领域知识。HTN 规划语言主要由项、动作等经典规划共用定义以及任务网络、任务、方法和操作算子等组成，其中的任务分为三类：目标任务，元任务和复合任务。

HTN 规划的基本思想是寻找一种完成任务网络的规划方案，规划过程是通过任务分解和解决威胁（或冲突）来进行的。基本的规划步骤是递归地将任务网络中的复合任务分解成越来越小（即粒度越来越细）的子任务，并在分解过程进行威胁检查和解决，直到出现那些可以直接执行规划动作就能完成的元任务为止。这些元任务构成一个具有时序特性的任务网络，可以直接执行的规划动作就构成了问题的规划解。将规划领域表示为 $\mathcal{D} = (Ops, Mes)$ ，其中 Ops 是所有操作算子的集合， Mes 是所有方法的集合。HTN 规划问题是一个四元组 $\mathcal{P} = (s_0, w, Ops, Mes)$ ，其中 s_0 是初始状态， w 是初始任务网络， Ops 和 Mes 构成规划领域。规划的目标是寻求规划问题 P 的解，即存在一种将任务网络 w 推演得出 π 的方法，按照此方法可实现 w 的顺利分解，并且分解得到的 π 是可执行的。

通过建立任务层的逻辑层次结构，可以明确任务之间的详细逻辑和层次关系。而每个任务元模型的建模则分为以下几个部分分别进行：

（1）信息监控部分：包括监控前导任务的完成状态、任务开始的时间限制以及任务开始所必须的资源状态等，其中前导任务完成状态的监控依靠在任务之间建立通信通道实现，时间限制状态通过读取系统仿真时间比较任务的时间限制条件实现，而资源状态通过任务和相应作战单元之间的通信通道完成。

（2）任务实现的作战单元动作序列部分：任务实体通过消息驱动相应的作战单元对象，完成本部分的作战任务的动作序列。

（3）状态报告部分：将本部分任务的工作状态报告给整个系统，以及把任务完成的信息传递给上一层受其影响的其他作战任务。这部分也要依靠任务之间的通信通道完成。

（4）任务的数据记录部分：记录作战过程中任务的推进状况以备分析之用。

3 逻辑元模型构建及其服务化实现

本文根据作战单元（平台）功能的不同，提出了不同的逻辑元模型：（1）反应式 Agent。具有与周围环境信息的交互性、与系统内其它单元的协作性以及对外来消息做出适当反应的性能。（2）思考式 Agent。具有与周围环境信息的交互性、维护着一个由信念（战场态势、兵力编成）、愿望（当前目标）、规划（打击预案）、意图（战术使命）组成的心智模型，并能在此基础上进行推理。（3）混合式 Agent。能在一定的使

命背景下, 根据具体任务同时面对多个目标的作战行动。作战单元不但需要对战场态势进行分析推理、对作战行动进行规划决策、相互通信协调作战行动, 还能在紧急情况下不需进行思考, 迅速反应采取相应对抗措施。(4) 复合式 Agent。一个复杂的作战单元往往可以分解为若干子单元, 这些子单元可分别构造为不同的 Agent, 因其具有协作特性和紧耦合的整体特性, 可将这样的单元构造为复合 Agent。

Agent 的能力可以用一个能力向量 (c_1, c_2, \dots, c_m) 来描述, 其中 c_i 是对 Agent 具有第 i 类能力的一种模糊描述。在系统中多个 Agent 形成一个团队, 而团队的能力则依赖于团队中各个 Agent 成员的能力以及相应能力的特点, 根据能力特点的不同, Agent 团队的能力可以由下面三种运算得到:

(1) 并运算:

$$c_i^s = \bigcup_{i=1}^m c_i^a = \max\{c_1^a, c_2^a, \dots, c_m^a\}$$

(2) 交运算:

$$c_i^s = \bigcap_{i=1}^m c_i^a = \min\{c_1^a, c_2^a, \dots, c_m^a\}$$

(3) 有界和运算:

$$c_i^s = c_1^a \oplus c_2^a \oplus \dots \oplus c_m^a = \min\{1, c_1^a + c_2^a + \dots + c_m^a\}$$

Agent 的能力(即逻辑元模型的内部基本模块集)可以用服务来实现, 以便实现基于服务化功能的指挥控制柔性重组。本文提出一种用来描述任务执行过程的 Agent 模型, 加入了与调度 Agent(或指控中心)实现通讯的服务, 并在 Agent 内部结构中增加了任务规划模块和用来实现不同 Agent 模型之间的直接通讯的信息存储单元, 使其具有了良好的交互接口和描述任务动态变迁的能力。将 Agent 定义为二元组 $\{\text{GSP}, \text{IST}\}$, 分别用来表示 Agent 的结构和功能。

(1) AGENT.GSP 的结构

AGENT.GSP 可用二元组 (Aid, FS) 表示, 其中, Aid 是 Agent 的唯一标识, 而 $\text{FS}=\{f_i | i=1, \dots, n\}$ 是 Agent 的服务集合, 一般来说包含四个可供调用的服务, 分别是:

- ① $\text{inq_Proc}()$: 返回 Agent 模型任务执行状况;
- ② $\text{inq_Ability}()$: 返回 Agent 所描述的作战任务执行能力;
- ③ $\text{task_Assign}(\dots)$: 接受调度 Agent 下达的作战任务;
- ④ $\text{inq_Attribute}()$: 返回 Agent 的属性, 如整体描述、类型等。

(2) AGENT.IST 的结构

AGENT.IST 可用四元组 $(\text{MTHD}, \text{PLA}, \text{IP}, \text{OP})$ 表示, 其中, MTHD 是用来描述任务执行方法的集合, 即 Agent 的功能模块集; IP 和 OP 是信息输入存储单元和信息输出存储单元; 而 PLA 则是 Agent 的规划模块, 其任务是:

- ① 根据作战任务, 形成任务执行调用方案, 各 Agent 行动任务的下达是通过调度 Agent 对其 $\text{task_Assign}()$ 服务的一系列激活及其形参的初始化而完成的。
- ② 通过 $\text{inq_Ability}()$ 和 $\text{inq_Proc}()$ 的激活调用, 向调度 Agent 报告任务执行 Agent 的能力和任务完成状态。

4 控制元模型的构建

控制元模型的主要工作如下: (1) 接受任务元模型的指令, 开始任务的执行过程; (2) 通过信息连接, 监测并记录在任务的执行过程中每个作战单元的状态行为以及相应的数据; (3) 结合实际指挥控制策略和作战单元的状态信息, 不断向每个作战单元发送控制信息, 以驱动作战单元; (4) 判断任务执行的结束, 通过与当前任务模型的信息连接完成, 并释放相应的作战单元, 设置作战单元为闲置状态, 以便其他的控

制单元使用。

其建模分为四步：(1) 首先以 UML 协作图方式表达一个基本任务内作战单元之间的交互过程；(2) 将该协作图转换为 UML 序列图方式；(3) 然后将作战单元之间的信息流转换为作战单元与控制元模型之间的信息控制序列；(4) 最后按上文所提的控制元模型结构建立相应的信息接口和内部函数。

控制元模型可以表达为一个六元组：

$$Ob_c = \{T, Q, I, F_q, F_a, F_p\}$$

由时间域 T 、数据 Q 、消息接口 I 、数据记录函数 F_q 、任务分配函数 F_a 及过程处理函数 F_p 组成。其中，控制元模型的接口主要分为控制单元与元任务的消息接口和控制单元与作战单元对象的消息接口。

控制单元和元任务之间是一一对应的信息连接，通过这个连接实现作战任务向作战单元的下达。控制单元与元任务对象的接口的工作分为相应的两部分：把从元任务对象的输出信息转换为控制单元的输入消息；将控制单元输出消息表达为元任务对象的输入信息。元任务对象到控制单元的消息，是任务对象将任务指令下发给作战单元的信息，应通过接口转化为与作战平台相兼容的数据格式。控制单元到元任务对象的消息，是控制单元将作战单元对象完成作战任务的状态报告给任务对象的信息，控制单元的输出消息，应该通过接口函数转化为报告任务完成状态的输入信息。

在控制单元的消息序列中，每一条消息对应一定的作战指令，这些消息的收发过程，体现了控制单元对作战过程的控制，而控制单元的消息和已经建立起来的作战单元对象的输入和输出信息并不是完全一致的，因此需要将消息序列中的每条消息转化为作战单元对象的输入和输出信号。这部分是控制单元与作战单元对象之间的信息接口的工作。

控制单元与作战单元对象的接口需要处理的消息分为两类，一是从作战单元对象发送到控制单元的信息，二是从控制单元发送到作战单元对象的消息。因此接口的工作分为相应的两部分：把从作战单元对象的信息转换为控制单元的输入消息；将控制单元输出消息表达为作战单元对象的输入信息序列。作战单元对象到控制单元的消息用于汇报当前作战单元动作执行状态，控制单元到作战单元对象的消息用于控制单元驱动作战单元对象的动作，完成作战任务的方式。

5 设计方法特点与结论

5.1 设计方法的特点

(1) 本文创新性地提出了任务元模型、控制元模型、逻辑元模型分别对无人平台系统的逻辑部分、物理部分和控制决策部分进行描述，并给出了详细的形式化定义，为无人平台系统进行了准确定义和界定提供了基础。其中任务元模型中的扩展的 HTN 任务层级规划算法与其他任务分解算法相比，引入了本体、语义和领域知识，同时增加了对任务分解的变粒度支持，使得本系统的任务分解方法能达到更好的效果，具有更强的实用性。

(2) 本文提出的基于元模型的柔性体系结构，将柔性体系结构引入到无人平台系统中，使采用本文方法设计的无人平台系统与传统的指挥信息系统相比，更能适应复杂多变的战场环境，能满足对于战场突发情况的处理而不用重新设计或开发无人平台系统。同时该结构能充分考虑战场环境的动态变化，如发现新的敌情、任务的新增或取消、某些平台功能突发故障，灵活的将任务分配给各无人平台，突破了传统的兵力编成限制，能够有效适应在任务变更、物理状态变更、多兵种协同作战和系统功能服务化四种情况下的系统柔性重组，使得无人平台系统具有良好的结构柔性和开放性。

(3) 本文将服务架构引入到无人平台系统中，使得无人平台系统具有了服务的可重用性和分布式等特性，同时还解决了各平台、各系统数据和协议不统一的问题，将所有的服务和功能进行了统一的描述和规范，使得系统具有了良好的可扩展性。

5.2 结论

本文所提出的基于元模型的柔性体系结构，可实现基于任务变更的、基于物理状态变更的、基于多兵种作战任务的和基于功能服务化的柔性重组，能够对未来的无人平台系统进行有效的组织、整合战场资源协调各平台运作，使得无人平台系统具备更加灵活的作战能力，以适应于未来的新型快速战争，满足分布式协同作战的需要。

参考文献:

- [1] US-OSoD, Unmanned systems integrated roadmap FY2011- 2036. *Office of the Secretary of Defense*. 2011.
- [2] 牛铁峰, 沈林成, 戴斌, 等. 无人作战系统发展. 国防科技. 5: 004, 2009.
- [3] 石章松, 左丹. 无人作战平台智能指挥控制系统结构. 指挥信息系统与技术. 3(4): 12-15, 2012.
- [4] 李一波, 王新星, 姚宗信, 等. 无人平台自主能力分级的四指标模型. 电光与控制. 19(10): 34-37, 2012.
- [5] 王新星. 无人平台自主能力分级模型研究. 沈阳航空航天大学. 2012.
- [6] 赵春霞, 杨静宇, 王树国, 等. 基于多 AGENT 的机器人装配系统结构. 系统仿真学报. 12(3): 252-255, 2000.
- [7] 刘维来. 柔性装配系统的规划和建模方法研究. 中国科学技术大学. 2006.
- [8] 周晓明, 初宁. 指挥控制系统服务化研究. 指挥控制与仿真. 32(3): 12-14, 2010.
- [9] 韩丹. 基于柔性体系结构的 ERP 系统. 哈尔滨理工大学. 2011.
- [10] 陈希林, 肖明清, 吴志强. 智能决策支持平台的柔性体系结构研究. 计算机工程与应用. 43(17): 236-240, 2007.