

# DAI 中多 Agent 协调方法及其分类

Coordination Methods and Their Classification of Multi-agent in DAI

李建民 石纯一

(清华大学计算机系 北京 100084)

**摘要** In this paper, a classification of multi-agent coordinations in distributed artificial intelligence (DAI) is given. In order to have further understanding of the tendency in the research of multi-agent coordination, its early development, current status and those still existing difficulties of each class are also introduced.

**关键词** DAI, DPS, MAS, Coordination, Cooperation

## 1. 引言

分布式人工智能(DAI)是人工智能的一个重要分支,主要研究多个并发的、自治或半自治的智能主体(Agent)的交互、协调、以及合作进行问题求解。

DAI是在传统AI的基础上发展起来的,分为分布式问题求解(DPS)和多Agent系统(MAS)两个方向。DPS研究如何分解某特定问题,并将其分配到一组拥有分布的知识并相互协作的Agent上进行求解。然而DPS对Agent的过多假定限制了DAI更好地模拟人类社会,也无法体现出DPS试图建造的社会系统的特征,为此人们提出了MAS的概念。MAS与协调一组(可能预先存在的)自治或半自治Agent的智能行为有关,研究侧重于这些Agent为了采取联合行动或解决各自问题,如何协调各自的知识、目标、策略和规划。MAS借用对策论与社会科学的原理,假定Agent必须是理性的(即总是致力于使自己的利益最大),研究重点就是如何使这些理性Agent选择有利于整体的行为。

由于MAS比DPS更能体现人类社会智能,更加适合开放、动态的环境,因而越来越受到人们的重视。目前,MAS的研究主要分为Agent认知模型、多Agent规划、冲突消解、多Agent协调与协作等几个方面,而多Agent协调与协作是MAS研究的核心问题。这是因为MAS以自主Agent为研究中心,使多Agent的知识、意图、规划、行为协调甚至达到协作恰恰就是MAS研究的主要目标。

多Agent协调(Multi-agent Coordination)是指具有不同目标的多个智能体对其目标、资源等进行

合理安排,以调整各自的行为,最大程度地实现各自目标。多Agent协作(Multi-agent Cooperation)是指多个智能体通过协调各自的行为,合作完成共同目标。我们认为协作是一种特殊类型的协调。

本文对多Agent的协调方法进行总结、分类,并详细介绍各类协调方法已有的研究成果、目前的研究状况及存在的问题。

## 2. 多 Agent 协调方法的分类

由于MAS中每个Agent具有自主性,在求解过程中会按自己的目的、知识与能力进行活动,常会出现矛盾与冲突,因而必须加以协调。广义上,MAS的协调方法分为显式协调与隐式协调两类<sup>[3]</sup>。所谓显式协调是指Agent被设计成能够对可能的交互进行推理,必要时与其他Agent协商。该方法具有明确、直接的协调机制,当Agent的动作间存在不一致时,调用它来解决。然而这种协调方法需要有足够的时间来支持,在某些动态、实时环境下是不适用的。而隐式协调是指Agent被设计成遵循某局部的行为规则,以明显的协调方式行动。

MAS前期的协调方法大都属于显式协调,已产生了很多有意义的结果,构成了多Agent协调方法的一个分支。而隐式协调是最近才提出的协调方法,它为协调方法的研究开辟了一个新领域。

### 2.1 显式协调

显式协调方法是指系统中的Agent内具有明确的协调机制,用于对Agent潜在的交互进行推理,必要时进行协商。以协调控制行为的执行者在系统中的分布程度来衡量,协调方法可以分成三类:完全集

中的协调方法,集中与分布相结合的协调方法以及完全分布的协调方法。

2.1.1 完全集中的协调方法 是指主控 Agent 完全控制从属者的行为,由主控 Agent 内部的规划器保证各从属 Agent 的行为彼此协调,这种协调方法在机器人世界中已有应用。集中协调方法降低了系统的复杂性,减少了用于协商的通讯开销,但却要求中心规划器有极强的处理能力,要处理各种可能冲突来形成一个全局一致的方案,不适合于动态、开放的环境,因而在 MAS 中应用较少。

2.1.2 集中与分布相结合的协调方法 文[2]中提出了将集中与分布相结合的协调方法。系统中的 Agent 组成层次结构,上层的监控 Agent 对下层的受控 Agent 有部分控制能力,在上下层之间有三种控制关系:

□监控 Agent 产生一个完整的规划并发给受控 Agent(此时同完全集中协调方法);

□监控 Agent 没有(或不能)生成一个完整规划,只能生成部分规划(抽象规划),并发给受控者;

□监控 Agent 无法生成或发送并发或完整的规划(由于知识或通讯的限制),只发给受控者一个高层目标。

由于监控 Agent 对具体环境的知识的缺乏,形成的完整规划可能有错误,此时,以及在上述后两种情况中,受控 Agent 必须依靠自己更为精确的知识生成完整的规划,而这个规划又不能偏离监控 Agent 的原有意图太多。当存在较大的差异时,很可能有一方的知识有错,需通过通讯来加以纠正。否则即按受控 Agent 的规划执行。

文[2]以积木世界为例,详细讨论了将规划间差异表示为状态集合间的差异,并给出了若干衡量量子。

X. Miao<sup>[7]</sup>通过对人类群体行为的研究指出,在群体协作中一定程度的中心协调有助于提高整体性能和效率。其背景是海军战斗群中各部门间的资源协调问题。通过实验表明:有主动领导 Agent 的群体优于无主动领导 Agent 的群体;领导 Agent 的主要贡献在于提高协调的效率和性能;在高负载条件下,无领导 Agent 的群体会分解为互不协调的个体;领导 Agent(资源协调者)可以降低其属下的平均负载。

X. Miao 等认为,平行结构群体中协调的困难在于各部门有“自我中心”的倾向,即过分强调自己任务的重要性,因而不愿将自身资源让给别的部门使

用,并且在获得资源后不愿将它交出去。领导 Agent 的存在就可以消除这种现象,促进资源的最佳使用。

在人类社会中,“自我中心”倾向是人的特点,我们可以推测,由人类所开发的智能机器中的认知模型也有这种倾向。Agent 一般总是更信任自己的知识,更考虑自己的效用,更强调自己的任务,因为这正是维持其自主性的条件。

集中与分布相结合的协调方法是完全集中协调与完全分布协调两个极端的折衷,与完全集中协调方法相比,更接近人类社会的特征。

2.1.3 完全分布的协调方法 其中,各 Agent 处于平等地位,彼此行为的协调通过各 Agent 内部的推理机制或 Agent 之间的多次交互,必要时进行协商实现。这种协调方法适合于研究理性 Agent 的多智能体系统,更好地模拟了人类社会。有代表性的工作有基于对策论的协调方法、基于规划的协调方法及各种协商方法。

#### 2.1.3.1 基于对策论的协调方法

对策论被认为是研究人类社会交互的有效数学工具,八十年代被引入 MAS 研究领域以来,有效地解决了多 Agent 交互与协调的许多问题,其中以 Rosenschein, Zlotkin, Kraus 等人的工作最有代表性。

1)无通讯的协调。J. S. Rosenschein<sup>[8]</sup>首次以对策论的方法阐述了理性 Agent 协调、协作的条件,并指出,即使在没有通讯的情况下,Agent 也可以根据对方及本方的效用模型,选择适当的行为,使各 Agent 的行为就象经过通讯协商了一样。

Rosenschein 的 Agent 合理交互理论开创了运用对策论解决多 Agent 协调问题的先河,使 DAI 界认识到,使用已有知识进行推理可以取代通常很昂贵的通讯。但是,该理论也存在如下缺陷:①完备知识假设,认为各 Agent 的效用矩阵为公共知识;②单遇假设,认为只存在一次交互,不考虑交互历史信息的影响;③诚实假设,假定 Agent 对各自的承诺完全信任。

Gmytrasiewicz 与 Durfee 使用六十年代末出现的元对策方法,研究了当对方效用模型不确定时,使用元递归建立对方效用概率模型的方法,在一定程度上解决了完备知识假设的局限,这一方法称为递归模型方法 RMM(Recursive Modeling Method)。但是,RMM 经无限层次递归却不能收敛到一个固定点上。虽然 S. Sen 提出一种通过对上次行为结果进行反馈学习来调整自身行为的 Reinforce 学习协调

机制,使 Agent 在不知对方知识的情况下,逐渐收敛到正确协作,但并不能保证在任何情况下都收敛。

2)基于对策论的协商方法。在无通讯的协调中,许多协作解是无法通过单遇实现的,因为在无通讯的情况下,单个 Agent 无法知道其他 Agent 是选择协作还是选择平衡解。但是,协作解在对策论中可以通过协商获得。基于对策论的协商是 MAS 协调方法的重要组成部分,是 MAS 系统中的各 Agent 借助通讯,交换各自的目标,直到各 Agent 达成一致或因不能达成一致而失败的过程。

基于对策论的协商一直是 MAS 研究者们关注的热点,主要工作有:Rosenschein 的“告知”理论<sup>[5]</sup>, Zlotkin 的面向领域的两 Agent 协商理论, Kraus 的最佳平衡协商理论。但这些工作仍有以下不足:①基本上未超出文[8]的理论模式,而所依赖的对策论也仍局限于传统理论;②基本以完全信息作为全局假设;③“单遇”假设几乎贯穿了所有理论;④封闭性、静态性;⑤协商的实用性;⑥缺乏实验系统。

### 2.1.3.2 基于观察的协调方法

基于观察的协调方法也称基于规划识别的协调方法,通过对 Agent 动作的观察及动作间关系的推理,每个 Agent 可获得其他各 Agent 规划的模型,通过将自己的规划和目标与各个 Agent 规划模型比较,找出潜在的冲突或合作关系,从而达到协调或协作的目的。

基于观察的协调方法具有美好的发展前景,这是因为:①规划方法多年的研究成果为基于观察的协调提供了坚实的基础;②避免了 Agent 说谎的欺骗行为,更适合于理性 Agent 之间的协调或协作,因而可应用于 MAS 系统;③可降低通讯代价,在通讯开销昂贵的系统中具有应用价值。

基于观察的协调方法的研究还处于初级阶段。M. J. Huber 在文[4]中借用 MICE 的实验环境,对基于观察的协调方法进行了研究,结果表明:将规划识别方法用于多 Agent 的协调是可行的,并指出该领域的长期目标是建立通过观察进行协调的概念,从而使 Agent 能成功地运用规划识别的过程获得协调所需的信息。

基于观察的协调方法尚存在很多问题,它的研究涉及规划方法、概率理论、不确定性推理等技术,由于不完全的观察和推理引入的不确定性、额外的计算时间、运行规划和目标推理的代价以及将新的动作和目标纳入已有的 Agent 模型并对其进行识别等问题,都使得 MAS 系统要在通过通讯协调与基

于规划识别协调之间就代价和风险进行权衡。

### 2.1.3.3 其他协调方法

除了基于对策论和对 Agent 动作进行观察的研究以外,还存在其他的完全分布的协调方法。

Sycara 以劳资谈判为背景,研究了具有不同目标、偏好的两个 Agent 的协商问题,使用启发式与约束满足技术解决分布式搜索问题,使用异步回溯恢复不一致的搜索决策,缺点是需要一个“仲裁器”解决冲突。

在多 Agent 协调方法的理论研究异常活跃的同时,多 Agent 协作方法正朝着可实现的方向发展。Lux 等<sup>[6]</sup>构造了一个协作应用的多 Agent 环境 MECCA,将各 Agent 的内部行为与 Agent 间的协作统一起来。并首先提出了 Agent 行为形式化的观点,将 Agent 行为归纳为目标激活、规划、调度、任务执行的循环过程,并假设 Agent 间传递的消息支持协作,进而基于 Agent 的行为循环,建立了协作机制的语义表示。所提出的协作机制的形式化语义独立于协作协议,对各个消息赋予了意义,从而各 Agent 就可以根据交换的消息进行推理,理解协作。

在文[5]中 Agent 模型与文[6]中 Agent 的模型相同,在带有形式化语义的协作机制的基础上,结合 AOP,建立了 Agent 协作语言 Cool,并详细介绍了 Cool 的知识表示和处理功能。文[6]和[5]的研究使多 Agent 的协调与协作向实用化方向迈进了一步。

## 2.2 隐式协调

MAS 中各 Agent 的行为只依照自己的目标和知识进行指导,在互不通讯和没有相互知识的情形下会产生冲突,因而需要进行仲裁的协商。在事先不对 Agent 施加任何约束的情形下,这种交互通讯的频率可能会很高,从而使系统求解效率降低,使用中心规划器是解决冲突的一个方法,但这需要中心规划器有很强的处理能力,要处理大量的可能冲突来形成一个全局一致的方案。为此,多 Agent 系统中出现了关于社会规则、标准和惯例的研究。

2.2.1 社会规则 Y. Shoham 等在[10]中提出为人工 Agent 社会规定一套规则,每个 Agent 必须遵守,同时相信别的 Agent 也会遵守。这些规则一方面会限制每个 Agent 所能采取的行动,另一方面也可以确保其他 Agent 的行为方式,从而保证本 Agent 行为的可实现性,实现了整个 Agent 社会行为的协调。Shoham 认为,生成这样一套规则的方法一一是为每个应用领域手工编写规则。另外,还可以自动地从各 Agent 能力和系统整体目标中抽取合适