

文章编号: 1002-0446(2001)01-0085-06

多智能体系统体系结构及协调机制研究综述

薛宏涛 叶媛媛 沈林成 常文森

(国防科技大学机电工程与自动化学院 长沙 410073)

摘要: 多智能体系统体系结构及其协调机制是多智能体理论中的核心问题, 目前在国际上已经发展了许多方法. 本文按照这些方法的研究流派, 分别予以介绍、比较并对它们的优缺点进行评述, 最后简要介绍了我们的研究内容.

关键词: 多智能体系统; 体系结构; 协调机制; 符号推理系统; 基于行为的系统; 协进化

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

A ROADMAP OF MULTI-AGENT SYSTEM ARCHITECTURE AND COORDINATION RESEARCH

XUE Hong-tao YE Yuan-yuan SHEN Lin-cheng CHANG Wen-sen

(Institute of Electromechanical Engineering and Automation, National University of Defence Technology, Changsha, 410073)

Abstract: The issue of multi-agent system architecture and coordination is the main problem of multi-agent theory. Till now many methods have been put forward. In this paper, we simply introduce and compare them according to their genre. The merits and the shortcomings of each theory have been given. At last, we introduce our research work briefly.

Keywords: multi-agent system, system architecture, coordination mechanism symbol reasoning system, behavior-based system, coevolution

1 引言

90 年代以来, 对于多智能体系统(MAS, Multi-Agent System)的研究已经成为分布式人工智能研究的热点. 多智能体理论已经成为继面向对象方法之后出现的又一种进行系统分析与设计的强有力思想方法与工具, 对许多学科与技术的发展起到了很大的指导促进作用. 多智能体理论对于促进经济、工业、社会、军事等方面进步也具有以下深远意义:

(1) 在信息时代的今天, Internet 已经强烈地冲击着人们的生活, 而 MAS 研究成果的最大应用场合正是在 Internet 上的应用, 这无疑会对国家的长远发展产生深远的影响;

(2) 多智能体系统的研究成果已经和正在广泛地应用到工业系统的改造中, 并取得了巨大的经济和社会效益.

(3) 对多智能体的研究直接涉及到社会现象及其规律, 无疑会在社会活动中大有用武之地;

(4) 现代战争表现为多兵种、多武器、多方位的综合协同作战, 对于多智能体系统特别是多智能体协调、合作方法的研究, 无疑可为现代协同作战提供直接的理论支撑和技术支持. 因此, 世界发达国家如美、日、德、英、法等投入巨资支持多智能体理论与方法的研究, 特别指出的是, 发达国家军方对多智能体系统的研究尤为重视.

国际上关于多智能体系统的研究虽然只有很短的时间, 但发展相当迅速. 目前, 主要的研究方向包括: 智能体和多智能体系统的理论、通信和交互技术、智能体体系结构和组织、多智能体系统中的协作和协商、智能体语言、多智能体应用系统设计等. 其应用已经扩展到了工业(包括制造、过程控制、远程

基金项目: 本文获得国防科技预研项目“多智能体系统体系结构及协调机制的协进化模型研究”之资助.

收稿日期: 2000-02-29

通讯、空中交通控制、运输系统等)、商业(包括信息过滤、信息收集、电子商务、商业过程管理等)、娱乐(游戏、交互式剧院和影院)、医疗(病人看护、健康照料等)等相当广泛的各个领域^[1]。目前多智能体系统理论的最重要应用是在 Internet 网上,多智能体理论与 Internet 获得了相得益彰的发展,一方面,多智能体理论在 Internet 上获得了极其广泛地应用(信息过滤、信息收集、电子商务等);另一方面,Internet 网相关业务的迅猛发展也极大地推动了多智能体理论的创新和进步。多智能体理论的另一个典型应用就是国际机器人足球比赛^[2],从 1996 年开始的机器人世界杯足球赛能够十分典型地体现多智能体系统的许多特点,如动态、实时、多人协调、只有不完全的信息等,并具有对抗性及较强的可观性。主要代表球队有:美国 CMU 大学的 CMU United 球队^[2]、德国汉堡大学队、及日本、韩国、荷兰等国的球队,我国也已准备参赛。多智能体理论在国内的研究开始时间大约落后十多年,其中清华大学石纯一、王学军等采用对策论研究了多智能体之间的协作,吉林大学刘大友等对多智能体间的协商进行了研究,中科院计算所史忠植等对智能体认知模型和理论进行了研究,国防科技大学吴泉源等对多智能体协调等问题进行了研究。但总的来说,目前国内的研究与国外有比较大的差距,研究很有限。

在多智能体系统理论中,关于多智能体系统体系结构及其协调机制的研究是处于核心的问题,它研究如何将多个智能体组织为一个群体并使各个智能体有效地进行协调合作,从而产生总体解决问题的能力。多智能体系统的组织结构与控制方法对系统性能的影响极大,如何组织由多个智能体构成的群体,以及在这样的群体中如何实现多智能体的协调合作问题,具有重要的理论和现实意义。

2 多智能体系统体系结构及其协调机制研究的主要流派

对于多智能体系统体系结构及其协调机制的研究目前国际上已经发展了许多方法,并且形成了相对分明的几个流派。根据这些理论方法的流派,大致可以分为三种:基于符号推理系统的体系结构及协调机制、基于行为主义的体系结构及协调机制以及基于协进化方法的体系结构及协调机制等。

2.1 基于符号推理系统的多智能体体系结构及协调机制

这种方法以 Bratman 等提出的 BDI(Brief

Desire Intention)理论为基础,采用传统人工智能中符号推理的基本原理,试图通过建立比较完整的符号系统进行知识推理来使智能体具有自主思考、决策的能力以及与其他智能体和环境进行协调行动的能力。基于符号推理系统的多智能体体系结构及协调机制有三种代表性的理论^[8],下面分别简单介绍并予以评价。

2.1.1 联合意图理论

Cohen & Levesque 基于 BDI 理论进一步提出了承诺(Commitment)和公约(Convention)的概念^[3],又经过 Jennings、Wooldridge 等人的进一步发展^[1,4],形成了一套比较系统的关于多智能体协调的理论框架,这是目前最为系统和成熟的多智能体协调理论框架。它的基本要点是:多个智能体在完成一个共同任务时会形成一个共同承诺,如果不出现下列三种情况之一,智能体就应该遵守公约,即坚持承诺,直到成功完成共同任务。

- 智能体发现共同任务已经完成;
- 智能体发现共同任务是不可能完成的;
- 智能体发现执行该共同任务是不必要的。

否则智能体就会设法通知正在合作执行共同任务的其它智能体,自己将要退出承诺。这样,其它智能体就能够适时做出调整。通过这样的承诺和公约机制,多个智能体就能协调完成一个共同任务。

可见,联合意图理论只是侧重于对智能体在完成一个共同任务时的一致性参与及坚持上面,并没有划定多个智能体如何就完成联合动作的具体分工协作问题,联合意图理论只是提供了一个框架,针对具体应用,还有相当多的领域相关问题需要解决。

2.1.2 共享计划理论

Grosz 等提出了共享计划理论^[5],它是建立在一种联合精神状态之上的,其中最重要的概念就是它引入的概念算子:“打算”(Intention that)和“打算做”(Intention to),它们通过一系列原子操作符定义,引导智能体采取包括通信在内的行动来使得个体、子团体和整个合作团体能够协调一致的执行所赋予的任务。

所有参与联合任务的各个智能体首先要达成一个共享计划,共享计划中包含了要完成联合行动的各种方面细节和具体步骤,每个智能体都彼此相信它们都打算要进行联合行动并接受共享计划。对于共享计划中的每一步,又会有一些智能体形成子团体组合来完成,子团体之外的其他智能体都相信子团体能够完成该步计划,并对该步也有一个共享计

划. 这样通过共享计划的协调, 各个智能体就能合作完成共同任务.

共享计划理论通过一个全队的共享计划实现多个智能体的动态组合及分工协作, 这种思想是很好的, 在这方面它强于联合意图理论, 但它没有涉及到当智能体在不能很好完成共享计划时的保证机制, 这方面又比联合意图理论为弱, 因此, 将二者结合起来研究就能扬长避短, 目前关于二者的结合研究最成功的是 Tambe 的多智能体通用协调模型⁷¹, 在下面将予以介绍.

2.1.3 计划的队行为

Kinny 提出了计划的队行为方法⁶¹, 其要点是, 计划是事先由设计者赋予的, 而不是由多智能体动态产生的, 智能体在行动之前就被赋予了关于完整计划的详细信息, 这种方法适合于对智能体的行为环境事先能够确切把握并且精细计划的场合, 不适合于动态环境, 因此应用比较有限.

以上三种理论是基于符号推理系统的多智能体体系结构与协调机制的最典型代表, 它们已经形成各自比较完整的方法体系, 并且都有自己的典型应用. 上面已经提到, Tambe 在联合意图理论和共享计划理论的基础上, 提出了一种多智能体协调的通用模型 STEAM⁷¹, 并且在应用上获得了很大的成功. 它的要点是, 对于参与协调的各个智能体按照角色进行组织, 并且引入集体行为操作符, 根据任务划分子团体, 每个智能体保留团体或子团体的集体精神状态的一个拷贝, 对于团体或子团体的共同任务, 采用集体行为操作符对集体精神状态进行操作, 对于智能体的个体任务, 则采用个体行为操作符对个体精神状态进行操作. 多智能体间信用的维持采用联合意图理论的承诺方法. 在 STEAM 中还引入了其它一些手段, 如用推测等方法促进多智能体协调一致地行动.

基于符号系统的多智能体体系结构与协调机制虽然在目前已经形成了几种有代表性的比较系统的理论, 但是在实际系统中也遇到了许多的问题. 基于符号的系统强调智能体对外界有一个比较完整和复杂的模型表示, 因此如何保持智能体自身模型的计算和推理与外部环境的同步便是一个比较棘手的问题. 复杂的模型计算和推理往往使得智能体适应环境的能力变差, 而且很难满足模型与领域无关性的要求. 况且, 构造复杂的智能体符号模型表示也是一项任务繁重、效率低下的工作, 对于大型的复杂动态系统尤其如此.

2.2 基于行为主义的多智能体体系结构与协调机制

基于行为主义的多智能体系统以 Brooks 提出的基于行为的系统分析与设计方法为基础, 实际上, 最初的自主智能体概念(Autonomous Agent)就是从基于行为的系统中演化发展起来的. Barry 等提出了设计基于行为的系统的三个基本原则: 最小性、无状态性和强壮性⁹¹.

其中, 最小性指保持系统的尽量简单以便与环境快速反馈; 无状态性指基于行为的系统本身没有一个外部环境模型的状态; 强壮性指使得系统能够与在实际环境中所遇到的不确定性并存而不是去除不确定性.

基于行为的智能体设计的一般过程是, 首先选定一些基本行为(basis behavior), 基本行为是一些能够组合起来完成所要求任务的最小行为单元. 基本行为的选择通常需要反复多次才能完成, 基本行为选定以后, 最重要的工作就是对行为选择机制(ASM, Action Selection Mechanism)的研究了, 即研究如何组合调度基本行为以完成复杂任务, 使得智能体能够自主行动并与其它智能体和环境相协调. 关于动作选择机制的研究, 是基于行为主义的多智能体协调研究的热点和核心问题, 已经发展了许多良好的算法和理论并应用于不同的领域. 其中比较系统和深入的一个方向是关于行为网(behavior network)的研究, Maes 提出了一种著名的行为网结构 - MASM (Maes Action Selection Mechanism)¹⁰¹, 这种行为网结构的要点是, 将各种基本行为组成一个网状结构, 网结构的结点是基本行为模块, 各个基本行为之间通过行为的活性(Activation)相联结. 所谓行为的活性即是指该行为对于实际目标的贡献和效能的一种度量, 若该行为能够促使目标的实现, 则它的活性值为正, 反之为负. 促使目标实现的效能越大, 其活性值就越大. 各种行为之间会产生相互影响, 包括激励或抑制, 相应的活性值也就会在行为网中进行传播, 通过一定的活性传播控制算法就可以将行为进行有效地组合调度, 从而完成复杂任务并产生协调行为. MASM 有一套比较严密的数学理论作为支撑, 并且在行为网的稳定性、收敛性等方面作出了证明. 德国的 Klaus Dorer 将 MASM 进行扩展和改进, 得到 REASM¹¹¹, 使之能够充分利用连续状态所能提供的附加信息, 并应用到机器人足球赛中, 获得了良好的效果, 在 1998 年的 RoboCup 仿真比赛中取得了第二名的好成绩.

许多基于行为主义的智能体系统研究者们都极力鼓吹行为主义的好处,他们倡导采用纯行为主义的方法,反对将基于符号的方法与基于行为的方法结合起来构造混合系统(Hybrid System)。实际上,尽管基于行为的方法在某些方面的应用上产生了良好的效果,并且在系统设计实现上要比基于符号系统的方法简单快捷。但是应该看到,基于行为的智能体系统目前所能够产生的所谓复杂行为还是比较简单和初级的,如避碰行为,而且往往系统设计缺乏卓有成效的理论指导,导致基于行为的系统设计算法与风格千差万别,难以产生更为复杂的、高级的智能行为。

基于符号系统和基于行为主义的智能体体系结构和协调方法各有优缺点,二者是互补的,因此将二者结合起来研究是必然的趋势,目前将二者结合的混合系统是多智能体系统体系结构的一个热点,一般是在上层采用基于符号系统的方法,对复杂行为进行推理、决策,而在底层则采用基于行为主义的反应式系统,处理比较简单的、能够与环境快速交互的行为,将二者有机结合起来。如何将二者结合又是一个比较困难的课题,目前虽然有一些比较成功的系统,但仍然缺乏构造混合系统的比较系统的方法。构造结构良好的混合系统来实现多智能体之间的协调,往往比较困难,任务也比较繁重,而且效果不一定良好。因此,寻找其它途径简单而有效地实现多智能体系统体系结构与协调行为便呼之欲出,基于进化机制的方法便是这其中十分有意义和卓有成效的一种尝试。

2.3 基于协进化方法的多智能体体系结构与协调机制

基于自然界中生物间“自然选择、适者生存”的进化机制,人们提出了遗传算法,并发展成为含义更为广泛的各种进化计算方法。由于进化算法的众多良好特性,至今已经获得了很大发展并得到广泛应用。但是,传统的进化算法存在着一些内在的问题:

(1) 传统进化算法中的物种群体具有很强的收敛性,这导致算法到最后只保留了最“强壮”的个体,这对于那些需要给出更多信息而不是只给出峰值的问题就无能为力了。

(2) 传统进化算法中的每个个体都代表了所求解的完整解决方案,并且个体之间是彼此孤立的。

由于没有建立群体成员之间的交互模型,十分不利于群体产生共同适应环境的行为。在自然界中,各种生物和物种共存于一个生态系统中,每个物种都在这个生态系统中有自己的生存环境或称为“生境”。在生态环境中,只有有限的资源,各种物种必须通过竞争与合作才能获得自己生存所需的资源。通过这些竞争与合作的交互,物种们不断进化和改变,并相互影响彼此的进化过程,这个相互适应的过程称为协进化(Coevolution)。

为了克服传统进化算法的不足,解决一类更为广泛的机器学习、共同适应以及多智能体间的协调问题,人们模仿自然界中的协进化机制,提出了协进化计算(CEC, Coevolutionary Computing)的思想^[12]。在协进化计算中,通常存在多个物种群体,每个物种群体都有自己的物种个体类型,各个物种群体都采用进化算法实现进化过程,而在对个体进行适应度评价时,则加入对群体间交互协调的处理。对那些有利于群体间协调的个体赋予较高的适应度,而不利的则赋予较低的适应度,这样各个群体就会向着有利于相互协调适应的方向进化,从而产生协调行为。

在协进化计算中,交叉和变异在一个物种内进行,而选择操作可以在一个或多个物种的个体中进行。可以根据生物学中物种间的关系将协进化进行分类^[13]:

<p>协进化类型:</p> <ul style="list-style-type: none"> 共生型(sym biosis) 互惠共生型(mutualism) 偏利共生型(commensalism) 寄生型(parasitism) 竞争型(competition) 竞争型(competition) 偏害竞争型(amensalism)
--

图1 根据物种之间的关系对协进化进行分类

协进化概念是基于物种间两种最基本的交互方式而得到的,即合作与竞争,因此,在这个意义上,协进化可以分为合作型协进化(Cooperative Coevolution)和竞争型协进化(Competitive Coevolution)。在多智能体协调问题中,针对不同的领域背景,可以选择合作型或竞争型的协进化方法。

一般地,对于需要多智能体合作完成共同任务的场合,合作型协进化方法很常用。

合作型协进化注重于群体之间的合作关系,通过对群体间有利于合作的个体进行适应度加强,促使群体向着有利于产生相互合作和共同适应(Coadapted)行为的方向进化。因此,将合作型协进化用于在多个智能体之间产生合作行为是一种极佳的方法,其思想是为参与合作的每个智能体都构造一个自身采用进化算法的群体,这样通过各个群体间的协进化就能产生智能体之间的协调合作行为。对于协进化的研究,目前已经有一些成功的范例可以借鉴。Toshio F. 等采用一种细菌感染协进化算法,解决智能机器人运动规划的决策问题^[13];Eiji 等用合作型协进化算法获取足球机器人的协作行为^[14];S. Luke 等人则用协进化方法训练得到了一个完整的机器人足球队^[15];Thomas 等对著名的“捕食者-猎物”问题进行了全面研究^[16],并采用合作型协进化方法研究了由 k 个异类智能体组成的团如何获取合作策略的问题;Puppala N. 等则进一步提出了一种“共享记忆”(Shared Memory)的方法^[17],用于存储协进化过程中成功合作的个体对,通过与随机选取个体对的方法相比,共享记忆方法具有较高的效率,他将这种方法应用到两个房屋粉刷机器人的协调控制中,获得了较好的效果;对合作型协进化进行比较系统研究的是 M. A. Potter,在他的博士论文中,综合以往协进化方法研究的各种问题,提出了一种通用的合作型协进化模型^[18],并对这个模型的性能进行了综合分析。他提出的合作型协进化模型如下所示:

```

gen= 0
对于每个群体 S, 进行如下操作:
    对群体进行随机初始化操作
    计算初始群体中每个个体的适应度
    结束
直到满足终止条件之前, 进行如下操作:
    gen= gen+ 1
    对每个群体 S, 进行如下操作:
        基于适应度数值从上一代群体中选取新一代群体
        将遗传算子(交叉、变异)应用到群体的个体中
        对群体的每个个体, 评价其适应度
    结束
结束

```

图 2 Potter 的合作型协进化模型

其中,对于个体适应度的评价是这个协进化算

法的核心,采用如下方法:

```

从其它群体中选择代表个体
对于群体 S 中的每个需要评价的个体 i 进行如下操作:
    将个体 i 与从其它群体中选出的代表个体组合形成协作
    行为通过将这种协作行为应用到目标问题而评价其适应
    度对个体 i 赋予协作的适应度
结束

```

图 3 个体适应度评价方法

在对协进化方法的研究上,目前的大多数方法是针对具体问题领域而采用不同的个体适应度控制策略,针对具体问题也提出了不少改进措施,如“共享记忆”方法等,这些都已经获得试验上的成功验证。但是,它们缺乏一种比较通用和概念化的方法指导和评价,尤其是在利用合作型协进化方法产生协作行为的问题上更是如此。M. A. Potter 的通用模型虽然在一定程度上解决了这个问题,但他的模型又过于简化。由于采用了传统的遗传算法,使得该模型在对问题的描述和构造方案的解决上缺乏灵活性和更强的能力,在遇到实际问题时还必须面对相当多的领域相关处理才能获得应用。而作为遗传算法进一步发展的遗传编程(Genetic Programming)则正好克服了这个问题,在这方面具有显著的优点,具有符号描述、规则表达和算术表达等较为灵活的描述能力。因此,采用遗传编程来解决协进化模型在灵活性和描述能力方面的不足,是一个很好的选择。目前,在国际上这方面也有个别成功的例子^[16],但还很不成熟,需要深入研究。

3 结束语

多智能体体系结构与协调机制在国内的研究水平还远远落后于世界发达国家,应用更加有限。国防科技大学立足于机器人研究,较早进入多智能体理论的研究,尤其是机器人足球比赛的研究,在全国机器人足球比赛中获得良好成绩并取得了一系列研究成果^[19,20],目前,正在进行基于合作型协进化方法的多智能体体系结构及协调机制研究。希望本文能对国内在多智能体体系结构与协调机制的研究方面起到抛砖引玉的作用。

参考文献

- Nicholas R, Jennings, Katia Sycara, Michael Wooldridge. A Roadmap of Agent Research and Development. In: Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 1998, 1, 7, 38

- 2 Manuela Veloso, Peter Stone, Kwun Han, Sorin Achim. Cm united: A Team of Robotic Soccer Agents Collaborating in an Adversarial Environment. In Proceedings of the The First International Workshop on RoboCup, Nagoya, Japan, August 1997, IJCAI97
- 3 Cohen P, Levesque H. Confirmations and Joint action, 1991, IJCAI-91: 951- 957
- 4 Nicholas R, Jennings Commitments. Conventions: The Foundation of Coordination in MultiAgent Systems. The Knowledge Engineering Review, 1993, 8(3): 223- 250
- 5 Grosz B. Collaborative System s. AIMagazine, 1995. 17(2): 67- 85
- 6 Kinny D, Ljungberg M, Rao A, Sonenberg E, Tidhar G, Werner E. Planned Team Activity. In 4th European Workshop on Modeling Autonomous Agents in a MultiAgent World (MAAMAW), 1992
- 7 Tambe M. Towards Flexible Teamwork. Journal of Artificial Intelligence Research, 1997, 7
- 8 Burt Wilsker. A Study of MultiAgent Collaboration Theories. Information Science Institute Research Report# ISI/RR-96-449, November, 1996
- 9 Barry Brian Werger. Cooperation without Deliberation: A Minimal Behavior-based Approach to Multi-robot Teams. At <http://www-robotics.usc.edu/~barry/ullanta>
- 10 Maes P. Learning Behavior Networks from Experience. In Varela, F. and Bourgine, P. In Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, 48- 57, MIT-Press, Paris
- 11 Klaus Dorer. Behavior Networks for Continuous Domains using Situation Dependent Motivations. In Proceedings of 16th IJCAI, Morgan Kaufmann, Stockholm
- 12 Paredis J. Coevolutionary Computation. Artificial Life, 1995, 2 (4): 355- 375
- 13 Toshio Fukuda, Naoyuki Kubota. Learning, Adaptation and Evolution of Intelligence Robotic System. In Proceedings of 1998 IEEE ISIC/CIRA/ISAS Conference, 1998: 14- 17
- 14 Eiji Uchibe, Masateru Nakamura, Minoru Asada. Cooperative Behavior Acquisition in A Multiple Mobile Robot Environment by Co-evolution. In Proceedings of the The First International Workshop on RoboCup, Nagoya, Japan, 1997, IJCAI97
- 15 Luke S, Hohn C, Farris J, Jackson G, Hendler J. Co-evolving Soccer Softbot Team Coordination With Genetic Programming. In Proceedings of the RoboCup-97 Workshop at the 15th IJCAI, 1997: 115- 118
- 16 Thomas D. Haynes, Sandip Sen. Co-Adaptation in a Team. In Proceedings of International Journal of Computational Intelligence and Organizations (IJCIO), 1997
- 17 Puppala N, Sen S, Gordin M. Shared Memory Based Cooperative Coevolution. In Proceedings of The IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1998: 570- 574
- 18 Mitchell A, Potter. The Design and Analysis of a Computational Model of Cooperative Coevolution. PhD thesis, George Mason University, 1997
- 19 薛宏涛, 冯庆堂, 沈林成, 常文森. 多 Agent 系统的一个研究平台: 基于 SoccerServer 的机器人足球赛仿真系统. 计算机应用研究, 1999
- 20 薛宏涛, 沈林成, 常文森. PTS 领域中的 Agent 体系结构设计与实现. 计算机工程与应用, 已录用

作者简介:

薛宏涛 男, 博士研究生. 研究领域: 多智能体系统, 分布式人工智能, 多机器人系统, 协进化.

叶媛媛 女, 硕士研究生. 研究领域: 多智能体系统, 不完全规划.

沈林成 男, 博士, 副教授. 研究领域: 导航与规划, 智能控制, 分布式人工智能.