

多 Agent 合作求解^{*}

张新良 石纯一

(清华大学计算机系 北京100084)

Survey on Multi-Agent Collaborative Problem Solving

ZHANG Xin-Liang SHI Chun-Yi

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Multi-Agent Collaborative Problem Solving is one basic issue of the research of Multi-Agent System (MAS). In this paper we summarize some research work of Multi-Agent collaborative problem solving, expound the characteristic of Multi-Agent collaborative problem solving, Model of Multi-Agent collaborative problem solving, process of solving, the application field of Multi-Agent collaborative problem solving and some challenge. Especially we discuss the main models, introduce the representative model including joint-intention, joint-commitment, shared plan.

Keywords Multi-agent collaborative problem solving, Joint-intention, Joint-commitment, Shared plan

1 引言

1.1 问题的提出

分布式人工智能关心的一个基本问题是如何使得复杂的系统通过 Agent 的交互合作来求得问题的解。Agent 是具有自主性的智能实体,每个 Agent 具有自己的信念、愿望、意图等思维属性和承诺、义务等社会属性。群体 Agent 对某个问题进行规划,执行规划,思维属性的变化过程可以看作是群体 Agent 对问题的求解过程。单个 Agent 由于自己能力或者知识的不足等,不能完成某个任务,就会倾向于合作求解。合作求解问题可以表示为:已知:一个任务 $T = \{T_1, \dots, T_m\}$, T_i 为子任务, $i = 1, \dots, m$; 一个 Agent 集合 $A = \{a_1, \dots, a_n\}$, a_i 是 Agent, $i = 1, \dots, n$, 具有一定的思维状态模型(如一种 BDI 模型)以及群体模型; Agent 团体 $A_i \subset A$ 。问题是依 T_i , 动态地形成团队 A_i , 基于 Agent 和群体 Agent 的思维状态模型, 给出 T_i 的解, 从而求解 T 的解。为了完成任务, 由于子任务之间可能存在约束, 因此往往 Agent 还需要制定共同的规划。

1.2 Agent 与多 Agent 系统(MAS)

Agent 是指在某一环境下具有自主性、交互性、主动性、社会性等特征的计算实体。自主性: Agent 具有属于其自身的计算资源和执行自身行为的机制, 能根据外界环境的变化, 由自身的内部状态和感受到的外界环境, 决定自身的行为, 这种转换不需要外界环境的干预, 是由 Agent 自身完成的。交互性: Agent 能够与其他的 Agent 进行多种形式的交互, 能够与其他 Agent 进行协调, 以达到合作求解的目的。反应性: Agent 应该可以主动感知外界环境的变化, 由此作出相应的对自身行为的调整。主动性: 在社会性的意义下, Agent 可以根据其承诺、义务等社会属性, 表现出对目标的主动完成。

目前尚没有关于 Agent 的严格定义, Wooldrige 在 Intelligent Agents 一文中给出了以下几种定义: (1) 自主能力 (autonomy)。Agent 可以在没有人或其他 Agent 直接干预的情况下运作, 而且对自己的行为和内部状态有某种控制能力。(2)

社会能力 (sociability)。Agent 和其他 Agent 通过某种交流语言进行交互。(3) 反应能力。Agent 观察其环境(可能是物理世界、图形世界、或者其他 Agent) 的变化, 并在一定时间作出反应, 以改变其环境。(4) 预动能力 (pre-activeness)。Agent 不仅能够简单地对环境作出反应, 而且能够通过接受某些启示信息, 体现出一种面向目标的主动行为。

目前对 MAS 的研究主要是多 Agent 的认知模型, 即研究如何用符号表示复杂现实世界中的多个 Agent, 以及 Agent 如何根据环境的变化进行推理和决策。对 MAS 合作求解的研究包括 MAS 的组织与联盟, MAS 的形式表示, MAS 中的通信, 以及 MAS 的合作求解等等。

1.3 多 Agent 合作求解特点

多 Agent 合作求解与传统的分布式问题求解 (DPS) 是不同的, DPS 往往事先已经对问题的求解过程与步骤比较清楚, 而多 Agent 合作求解问题, 对问题的求解过程和步骤事先很难或不可能确定, 在求解过程中, Agent 之间需要进行知识、意图等思维状态的交换, 需要 Agent 共同规划、共同执行。求解体现在如何进行合作、任务分配以及规划的共同制定上。

对多 Agent 合作求解的研究, 一般有基于逻辑的模型描述以及基于对策论的方法。基于逻辑的方法, 可以建立 Agent 的思维状态模型, 分析 Agent 在求解过程中意图、承诺等思维属性的变化。基于对策论和经济学的的方法, 可以讨论理性 Agent 行为的原因, 在不同环境下采取动作的变化等。但这种方法很难找到合适的计算模型, 具体实现比较困难, 一般来说还是仅仅作为一个分析工具。大部分研究者还是采用逻辑的方法, 对 Agent 合作求解过程进行描述。

2 多 Agent 合作求解

2.1 Agent 群体、组织与联盟

Agent 联盟是 Agent 的一种合作方法。通过联盟可以提高 Agent 求解问题的能力, 获得更多的报酬, 因而联盟是 MAS 的重要合作方法。文[13]讨论了联盟演化问题, 给出了

^{*} 本课题受国家自然科学基金资助(60173011)。张新良 博士研究生, 主要研究方向为分布式人工智能与多 Agent 系统。石纯一 教授, 博士生导师, 主要研究领域为人工智能应用基础。

基于对策论的联盟等价的定义和相应的命题,依联盟等价给出了联盟的基本过程,匹配方法,策略调整等演化机制;从人类社会组织理论的思想出发,对基于对策论的联盟演化机制进行了扩充。联盟并没有提出一种群体的思维模型表示,可以认为是一种在约束关系上相对来说比较弱的形式。

Agent 组织是一种结构和求解目标明确的、为求解同一类问题长期存在的 MAS 形式。基于 Agent 组织的问题求解通常以角色为中心,有显式的组织结构,组织中的 Agent 有共同的利益和求解目标,Agent 组织的存在不依赖于具体的问题,一个求解任务的完成不会使组织解体,Agent 组织可以重复用于同一类问题的求解。在文[14]中,讨论了 Agent 组织模型,组织的形成,组织规则,组织演化等问题。Agent 组织是多 Agent 系统研究的三个关键问题(组织、交互、语言)之一,也是一种有效的多 Agent 求解方式。

Agent 群体研究的是如何表示 Agent 的共同信念、意图等思维属性,这些思维属性构成了 Agent 群体模型的基础。Agent 如何进行交互,形成群体,如何进行任务的分配,制定规划,执行规划等。从 Agent 之间依赖关系上来讲,Agent 主要通过互相之间的承诺和一些社会规范进行保证,参与合作的 Agent 在社会规范和承诺的约束下,一般不允许 Agent 退出合作。

从 Agent 合作过程中的依赖关系上来讲,Agent 组织是最紧密的,有着显式的组织结构,组织中的 Agent 有共同的利益。Agent 群体可以认为是比较松散的,只有互相之间的承诺和社会规范对其约束。Agent 联盟可以认为是介于二者之间。但反过来说,Agent 群体又可以看作是比较灵活的一种合作求解模式,Agent 在合作求解过程中可以方便地进行交互,甚至可以转变自己的角色等。而 Agent 组织却是相对来说比较固定的模式,一旦确定,求解过程中不容易改变。

2.2 Agent 群体模型

目前已经提出了多种 Agent 群体模型,比较典型的有 Cohen 和 Levesque 联合意图模型、Wooldridge 和 Jennings 的联合承诺模型、Grosz 和 Sinder 的共享规划模型。除此以外,还有 Kinny 的群体规划模型等。这些模型一般是通过 Agent 群体思维状态的描述,Agent 对共同的目标或规划作出承诺等,依此来保证 Agent 在任务完成过程中的合作关系等。

Levesque 和 Cohen 早在1990年就描述了 Agent 合作求解模型,给出了一个形式化的理论模型。这个模型以理性 Agent 作为基础,其基础是单个 Agent 或群体 Agent 意图在 Agent 思维状态转变中的作用。Agent 意图被认为是 Agent 承诺做某个动作,而承诺是 Agent 在一段时间内要达到的目标。群体意图模型的一个结论是合作过程中如果某个 Agent 发现或相信某个信念是属于自己所知,而其他合作成员不知道,那么这个 Agent 就有义务通知其他 Agent 这个信念,使得其他 Agent 也相信这个事实。也就是说,如果某个 Agent 和其他 Agent 形成了联合意图,那么也暗示着 Agent 同意和其他 Agent 进行通信,交换自己的信念。而在其他一些模型里,并不存在 Agent 必须进行通信,达到一种共同的信念。尤其是在共享规划模型里,甚至认为 Agent 之间的通信是不可预知的,是依赖于其他 Agent 的信念和意图。

群体思维状态模型以个体思维状态模型为基础,但群体模型并不是个体模型的简单迭加。Agent 的群体意图是以单个 Agent 的意图与承诺为基础的。如果某个 Agent α 相信某

个目标 Δ 目前并没有实现,并且这个目标可以实现,那么就会得到一个目标直到相信这个目标已经实现或不能实现或是不相关的。这可以形式描述如下:

$$(PGOAL \alpha \Delta \zeta) = \text{def } (DEL \alpha \rightarrow \Delta) \wedge (GOAL \alpha \diamond \Delta) \wedge (KNOW \alpha (UNTIL [(BEL \alpha \Delta) \vee (BEL \alpha \rightarrow \square \Delta) \vee (BEL \alpha \rightarrow \zeta)] (GOAL \alpha \diamond \Delta)))$$

(PGOAL $\alpha \Delta \zeta$) 可以看作是群体意图模型里一个核心的算子,它保证了 Agent 不能任意无故地放弃目标,KNOW 算子说明了在什么条件下 α 可以放弃目标。PGOAL 相当于将参加合作的 Agent 绑在了一起。

个体 Agent 的意图为 Agent 以某个 Δ 作为目标并且相信可以通过完成某个动作来实现 Δ

$$(INTEND \alpha \Delta \zeta) = \text{def } (PGOAL \alpha (DONE \alpha \{BEL \alpha (DOES \alpha \Gamma)\} | \Gamma) \zeta)$$

Agent 的联合目标即可定义为 Agent 共同相信某个目标 Δ 目前并没有实现,并且这个目标可以实现,那么就会得到一个目标直到相信这个目标已经实现或不能实现或是不相关的。

$$(JPG \alpha \beta \Delta \zeta) = \text{def } (MB \alpha \beta \rightarrow \Delta) \wedge (MG \alpha \beta \diamond \Delta) \wedge (MK \alpha \beta (UNTIL [(MB \alpha \beta \Delta) \vee (MB \alpha \beta \rightarrow \square \Delta) \vee (MB \alpha \beta \rightarrow \zeta)] (WMG \alpha \beta \diamond \Delta)))$$

联合目标以 Agent 共同信念(MB),共同知识(MK),共同目标(MK)为基础。其中 WMG 是弱目标(MG, WMG 可参看文献)。

上述的联合意图模型表明,一旦参加合作的某个 Agent 相信这个目标已经达到或无法达到或不相关,则联合意图解散,而保留一个弱目标 WMG。Agent 有义务通知合作的其他 Agent 自己的信念,也就暗示着这个模型里存在着通信过程,只不过这种通信是跟领域有关的。但至少应该保证 Agent 之间可以交换信念。

Wooldridge 和 Jennings 在文[5]中分析了联合承诺模型采用多值模态逻辑表示,也可看作是分枝时序逻辑的基础上增加了一些模态算子。在这个模型里,控制着 Agent 行为的核心思维状态是 Agent 的联合承诺

$$(J_Commit \ g \ \varphi \ \psi \ \chi \ c) = \text{def } \forall i (i \in g) \Rightarrow \chi \wedge \Lambda ((p \wedge q) \text{Ur})$$

其中, χ 是 Agent 组 g 实现目标 φ 的初始条件, ψ 是实现目标的动机, $p = \text{def } (Goal \ i \ \varphi)$

$$q = \text{def } \wedge (Bel \ i \ \rho_k) \Rightarrow A[(Goal \ i \ \gamma_k) \text{Ur}]$$

$$r = \text{def } \vee \gamma_k$$

$c = (\rho_k, \gamma_k)$ 是一个协定,当 Agent 相信条件 ρ_k 成立时,就接受 γ_k 作为当前目标。

A, U 分别是分支时序逻辑中在所有路径上成立的 Until 算子。这个联合承诺算子成立需要满足条件:

(1) 初始条件需要成立。

(2) 每个 Agent i 都将 φ 作为自己的当前目标,直到结束条件成立。

(3) 在结束条件成立之前,每个 Agent 如果发现当前条件 ρ_k 成立,就会将 γ_k 作为当前目标,同时,仍将原有的 φ 作为自己的目标,直到结束条件成立。

因此,一组具有联合承诺的 Agent 应该处于如下的思维状态:

(1) 最初,每个 Agent 相信目标 φ 不成立,但相信 φ 是可能成立的。

(2)在结束条件成立之前,每个 Agent 都将 φ 作为自己的目标。

(3)在结束条件成立之前

•如果 Agent i 相信 φ 是成立的,那么它就有个通知所有 Agent 使它变成一个共同信念的目标,直到结束条件成立;

•如果 Agent i 相信 φ 是不成立的,那么它就有个通知所有 Agent 使它变成一个共同信念的目标,直到结束条件成立;

•如果 Agent i 相信实现目标 φ 的动机 ψ 已不成立,那么它就有个通知所有 Agent 使它变成一个共同信念的目标,直到结束条件成立。

(4)结束条件是所有 Agent 具有如下的共同的信念:

•目标 φ 已经成立;

•目标 φ 不可能达到;

•实现目标 φ 的动机 ψ 已经不存在了。

通过 Agent 之间的联合承诺,就可以形成一个联合意图,Agent 群体 g 具有动机 ψ 做动作 α , 定义成

$$(J\text{-Intend } g \alpha \psi) = \text{def } (M\text{-Bel } g(\text{Agt } \alpha g)) \wedge (J\text{-Commit } g \alpha \psi) \wedge (\text{Happens}(M\text{-Bel } g \alpha(\text{Does } \alpha)); \alpha) \psi \chi_{\text{soc } c_{\text{soc}}}$$

联合意图的含义就是如果 g 有一个联合承诺要达到目标,并且相信动作 α 在下一步要执行,那么下一步就执行这个动作。可以将个体承诺和个体意图看作联合承诺与联合意图的特殊形式。

Grosz 和 Kraus 在文[8]中分析了联合规划模型。与上述模型不同的是,联合规划模型的核心 SharedPlan(SP)并不是基于个体 Agent 的意图 Intention 的,而是基于 Intention that。Intention that 是通过一些用来规范控制合作 Agent 或整个 Agent 团体的行为的公理来定义的。SP 可分为全局共享规划(FSP)和局部共享规划(PSP)。对行为 α 的一个 FSP 代表这样一个状态,合作行为 α 的每一个条件都已经确定,包括共同信念和对执行动作 α 的规划步骤 R 。达成了一致。FSP $(P, GR, \alpha, T_p, T_e, R_e)$ 代表一个 Agent 组 GR 在 T_p 时刻制定了规划 P 在 T_e 时刻执行这个动作 α 的规划步骤 R_e , 在如下条件下,可形成这个 FSP

(1)成员共同相信都有 $\text{Do}(GR, \alpha, T_e)$ 的信念

(2)所有的组成员共同相信 R_e 是实现动作 α 的规划步骤

(3)在 R_e 的每一步 β

•存在一个 Agent 子组 $GR_k (GR_k \subseteq GR)$ 具有通过规划步骤 R_k 来实现 β 的 FSP

•其他 GR 成员共同相信上面这个事实

•其他 GR 成员中具有 Intend that GR_k 来完成 β

事实上,由于环境的变化,知识的局限,能力的不足等因素,参与合作的 Agent 一般来说只能达成局部共享规划(PSP)。

Tambe 在文[12]中提出了 STEAM 主要是基于联合意图模型,结合了共享规划的优点。在 STEAM 里,Agent 之间的通信是通过联合意图驱动的,Agent 在建立和解散联合承诺过程中通过通信实现共同的信念。联合承诺为 STEAM 提供了一个基本的框架。同时,STEAM 借鉴了共享规划的优点。如果某个 Agent 在完成自己的子任务过程中失败了,或者发现一个新的任务无人负责,合作的团队就需要重新建立,这个过程同样是由联合意图驱动的。

在文[11]中,着重分析了由于环境的动态变化,如某个

Agent 在执行动作失败的情况下,如何重新进行组织合作的问题。采用 Rao 和 Georgeff 的联合意图与联合承诺模型,提出了一个四层框架模型,来解决重新进行组织的问题,并给出了一个重组算法。

文[6]提出的 Agent 合作模型中,讨论在 Agent 之间存在相同或不同目标的情况下,如何发现它们之间的相互依赖,通过言语行为如何进行收益的交换,最后形成一种社会的互锁的承诺的过程。

2.3 通信与基于对话的协商

在 MAS 中,为了让多个 Agent 进行协商,合作求解,就需要有一个有效的通信机制。通信的目的就是为了让 Agent 之间互相交流,Agent 与外部环境之间交流,以及 Agent 之间共享知识。一个 Agent 对环境变化进行预测时,要考虑到其他 Agent 的活动一般不是受自己控制的,难以预测的。为了更好地预测环境变迁和增强自身的行动能力、实现自身需求、实现它们之间的合作求解,Agent 之间必须进行通信。通信能力可以看作是 Agent 社会属性的体现。通信动作也是一种特定的规划行动,是在完成 Agent 需求的过程中进行预定的。从语义层来看,通信交互就是 Agent 间思维状态的传递和求解策略的交流。

在 Agent 合作团队形成过程中,Agent 之间需要交互发现潜在的合作。合同网协议是比较常见的用于 Agent 之间交互的协议。但由于在 MAS 中,环境是动态变化的,而合同网协议一般是求解前事先指定好的,因此并不太适合。Frank Dignum 提出了基于对话理论的协商。协商可看作 Agent 之间通过交换信息,在某个问题上达成共识。在 Dignum 的基于对话的协商方法中,采用分支时序逻辑,描述了 Agent 在合作求解过程中的思维状态的变化,以及对话在其中的作用。Dignum 的理论,与上述模型的不同,重点侧重于描述 Agent 之间的交互过程,以及在这个过程中思维状态的变化。

2.4 Agent 合作求解过程

Agent 如果要合作求解,首先必须对一个问题来说形成一个团队是 Agent 合作求解的主要过程。虽然上边介绍了几种不同的合作求解模型,它们描述的侧重点也不尽相同,但对于 Agent 合作求解过程,一般来说都是认为可分为四个方面:(1)发现潜在的合作 (2)团队形成 (3)规划形成 (4)团队规划执行。也有人认为应该先形成规划,后形成团队。Agent 合作求解的过程,是以上述一些群体 Agent 模型为基础的。在合作求解的不同阶段,Agent 需要形成不同的群体思维状态模型,如在发现潜在的合作以后和团队形成之前,Agent 需要形成共同的信念 M-Bel。Agent 团队形成以后,Agent 之间就会形成联合承诺。在规划形成之后,Agent 又需要制定联合规划等。因此,在合作求解的不同阶段,Agent 的目标也可以看作要形成不同的群体思维状态模型,群体思维状态的转换,就可以认为是 Agent 合作求解的过程。

Agent 合作求解以发现潜在的合作开始。这可以是某个 Agent 有一个任务要完成,但自己不能完成,也可能是 Agent 需要完成一个共同的任务。Agent 之间通过交互,发现可能的合作伙伴。一般存在一个发起合作的 Agent,由它进行发现潜在的合作伙伴。Agent 在发现了潜在的合作以后,通过协商,进行利益交互等,形成一个合作的团队。如果 Agent 合作团队形成成功,就会形成联合承诺或联合意图。联合承诺或联合意图保证了参与合作的 Agent 不会无故脱离团队。Agent 团

队形成以后,就需要共同进行规划的制定。规划指定的过程就是对任务进行分解,同时找到合适的 Agent 来承担子任务,并制定任务的执行步骤。如果这个过程成功,那么参与合作的 Agent 应该知道自己承担的子任务与执行步骤,同时也应该知道其他 Agent 的任务。规划制定以后,Agent 团队根据任务之间的约束关系,共同执行已经制定好的规划步骤,完成自己的任务。

在 Agent 合作求解过程中,重要的包括如何发现潜在的合作、Agent 冲突的消除、任务的分解以及规划的共同制定。在 Wooldridge 等的联合承诺模型里,定义了 $(pfc\ i\ \psi)$ 表示一个 Agent i 对一个任务 ψ 存在可能的合作。文[10]对 Agent 规划过程中可能存在的信念上的冲突,给出了一种基于协商的解决办法,并且在冲突出现以后,说明了如何解决这些冲突。文[9]讨论了在周期团队通信的情况下,Agent 利用单向低带宽的通信,如何形成灵活的团队。利用角色,Agent 可以灵活地交换任务,进行任务的分解。Magnus Ljungberg 给出了一种用来描述团队规划的语言,并对团队规划过程中 Agent 的联合思维状态给出了可能世界语义解释。利用 Ljungberg 的模型,可以形成比较灵活的团队规划。

除了对 Agent 合作求解模型以及求解过程的研究以外,Agent 合作求解还涉及到了 Agent 模型的形式语义解释,Agent 通信语言(ACL),面向 Agent 的程序设计语言(AOP)等内容。对这方面的内容,也有不少研究者作了研究。

3 应用领域

3.1 RoboCup

机器人足球赛(RoboCup)是多 Agent 合作求解的一个典型例子,很多研究者都以 RoboCup 做为测试平台来衡量已有的 Agent 合作求解模型。在机器人足球赛里,Agent 之间存在合作、对抗、通信、协商、群体形成等多 Agent 合作求解中的影响因素。在 RoboCup 里,存在一个最终目标,就是要赢得比赛,在这个大目标下,Agent 需要对任务进行分工,每个 Agent 应该担任不同的角色。为了完成一个小的任务比如过人,多个 Agent 之间需要合作,进行一些合作行为,Agent 之间还可能存在一个事先的规划比如比赛的打法,在比赛过程中为了完成任务对规划就可能存在修正。参与比赛两个队伍的 Agent 之间还存在个体与群体的对抗。基于上述一些特点,RoboCup 可以看作是一个非常合适的多 Agent 合作求解研究背景。

3.2 电子商务领域

电子商务是多 Agent 合作求解的另外一个常见领域,尤其是物品拍卖。在拍卖过程中,Agent 可以是卖方 Agent 或者买方 Agent。在拍卖过程中,根据不同的拍卖规则,Agent 之间可以是合作或对抗的关系。Agent 可以选择合作,形成小的团体,从而达到买卖成功。也存在竞争对手,需要了解对方的意图。对拍卖的理解,除了用在电子商务领域,也在资源分配等领域内,也可以采用拍卖的方式解决。

在其他一些领域,例如交通管制、智能自动化,数字化图书馆/空中管制系统、异构信息处理系统等多 Agent 合作求

解也有广泛的应用。

结语 多 Agent 合作求解是 MAS 研究的重要内容。已有的工作主要包括 Agent 合作求解模型、求解过程的研究以及任务分配、Agent 之间的冲突检测与消除等方面,还涉及到了 Agent 通信、面向 Agent 的软件工程等方面。本文主要是对 Agent 合作求解模型做了一些介绍,包括已有的联合承诺、联合意图、共享规划等,这些模型基本上是基于 Agent 之间存在共同的信念。Agent 之间共同信念的形成,如何相信自己的合作伙伴是将要研究的问题。针对任务的分解、规划形成的表示,并没有一个有效的表示方法,Agent 群体思维状态的模型描述,包括群体意图、信念、承诺等,虽然已有了一些表示,但是还没有比较系统的描述与解释。最后,上述合作求解模型大部分是基于非自利的 Agent,并没有讨论私有目标与公共目标之间的冲突。解决自利的理性 Agent 在存在私有目标的情况下,如何参与合作实现共同目标也是一个研究问题。

参考文献

- 1 Panzarasa P, Jennings N R. Negotiation and Joint Commitments In Multi-Agent Systems, 2003
- 2 Wooldridge M, Jennings N R, Fatima S S. Multi-issue negotiation under time constraints. In: Proc. 1st Int Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Bologna, Italy, 2002. 143~150
- 3 Wu* D J, Sun Yanjun. Cooperation in multi-agent bidding. Decision Support Systems, 2002, 33: 335~347
- 4 Dignum F, Dunin-Keplicz B, Verbrugge R. Dialogue in Team Formation. In: F. Dignum, M. Greaves, eds. Issues in Agent Communication(LNCS-1916), Springer-Verlag, 2000. 264~280
- 5 Wooldridge M, Jennings N R. The Cooperative Problem Solving Process. Journal of Logic & Computation, 1999, 9(4)
- 6 Alonso E. An Individualistic Approach to Social Action in Multi-Agent Systems. Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, 1999, 11: 519~533
- 7 Cohen P R, Levesque H R, Smith I. On team formation. In: Hintikka J, Tuomela R, eds. Contemporary Action Theory. Synthese, 1997
- 8 Grosz B J, Hunsberger L, Kraus S. Planning and Acting Together. AI Magazine, 1999, 20(4)
- 9 Stone P, Veloso M. Task Decomposition, Dynamic Role Assignment, and Low-Bandwidth Communication for Real-Time Strategic. Artificial Intelligence, 1999, 110(2): 241~273
- 10 Chu-Carroll J. Conflict Resolution in Collaborative Planning Dialogues. International Journal of Human-Computer Studies, 1999
- 11 Dunin-Keplicz B. Collective Motivational Attitudes in Cooperative Problem Solving, CEEMAS'99
- 12 Tambe M. Towards Flexible Teamwork. Journal of Artificial Intelligence Research, 1997, 7: 83~124
- 13 徐晋晖. 多 Agent 模型与联盟机制研究:[清华大学博士论文]. 2000
- 14 张伟. Agent 组织理论研究:[清华大学博士论文]. 2002