

人工智能

Multi-agent

王怀民

毛新军

7

Multi-agent 系统的主动合作计算模型^{*}

25-29, 34

The Active Computing Model in Multi-agent System

毛新军 王怀民 陈火旺 刘凤岐

TP18

(国防科技大学计算机系 长沙 410073)

Abstract Nowadays as the further development of the technology and the deeper application of the Internet and Intranet, traditional cooperation computing can not meet the user's requirement and active cooperation computing has become a new and potential application. An active computing model is presented in this paper. Based on the speech act theory and the theoretical framework of multi-agent computing presented by us, the communication acts associated are discussed and presented, how agent responses to the communication acts is investigated, the rigorous whole-hearted satisfactory semantics of the speech acts and the active computing model is defined, the senses of the research are concluded lastly.

Keywords Multi-agent system, Cooperation, Communication, Whole-hearted satisfactory semantics

1 概述

Agent 是近年来计算机科学领域中的一个重要概念,它是指在某一环境下具有自主性、社会性、主动性等特征的计算实体,Multi-agent 系统由一组具有一定资源和能力、相对独立且相互作用的 Agent 组成^[1],现实系统大多属于 Multi-agent 系统如空中交通管制系统、异构信息处理系统、战区导弹防御系统等等。由于 Agent 概念自然、贴切、直观地刻画了现实系统,因而有关 Agent 理论、技术的发展和應用引起了人们的高度重视和关注^[2,3]。

在 Multi-agent 系统中,由于资源、能力的有限性和分布性,合作是 Multi-agent 系统的一个重要特征。Multi-agent 系统的合作方式多种多样,其中请求/服务是 Multi-agent 系统中一类典型的合作方式。一个 Multi-agent 系统被称为具有请求/服务合作方式的 Multi-agent 系统,如果 Agent 间的合作关系仅仅是请求和服务关系即,或者是一个 Agent 向另一个 Agent 提出服务请求,或者是一个 Agent 向另一个 Agent 提供服务。其传统合作计算模型

Client/Server 计算已被广泛应用于分布式信息服务系统的开发,并成为当前分布计算领域的一种主要计算模型。例如在异构信息处理系统中,Agent₁ 请求 Agent₂ 为它提供某种信息,在接到请求后,Agent₂ 在其数据库中查询相关信息,并将结果返回给 Agent₁。

当前随着 Internet、Intranet 技术的不断发展以及应用的不深入,传统合作计算模型已不能满足现有的用户需求并正面临着新的应用问题的挑战,主动合作计算正成为一个新的应用需求点。例如机票代理 Agent 请求拥有飞机航班信息的 Agent₁;一旦飞机航班信息发生改变,就主动地为它提供新的飞机航班信息,对于某些重要电子邮件,邮件发送方 Agent 要求接受方 Agent₁,在确认用户已经阅读了邮件之后,主动地返回一个“确认阅读”邮件。

为了促进 Multi-agent 系统的开发、推动 Agent 间的主动合作计算以及相关问题的解决,有必要严格、形式化地分析和讨论 Agent 间的主动合作关系,构造 Multi-agent 系统的主动合作计算模型,并进一步规范 and 描述主动合作计算模型所涉及的

^{*} 本文得到国家自然科学基金 NO. 69503002 的支持。毛新军 博士,研究方向:Agent 理论,分布计算;王怀民 博士,研究方向:分布计算;陈火旺 教授,研究领域:计算机科学理论,人工智能等。

Agent通讯行为的语义。

2 基本通讯行为

Agent间进行合作的基础是交互,其通讯是实现Agent交互的一种重要方式和手段,为了研究Multi-agent系统的主动合作计算模型,有必要首先研究主动合作计算模型所涉及的Agent通讯行为。

Agent间的通讯行为是一类特殊的行为,因为它将对交互双方Agent的内部状态产生影响。言语行为理论是研究Agent通讯行为的一个重要理论。言语理论认为:人类交际的语言,不仅仅是为了描述某种状态,而是为了完成一定的行为。例如,“请求”,“通知”,“询问”,“允诺”等等。言语行为的特点是言者通过说一句话或若干句话来执行一个或若干个上述所列举的行为,这些言语行为的实现可能给言者或者听者带来某些后果。我们注意到,逻辑上这种言语行为不能被简单地赋予真值,它的满足涉及到言语行为主体的状态,言语行为是否正确发出等等。为了研究言语行为,人们提出了言语行为理论三分说,即任何规范的会话活动实际上产生了三个概念上互有区别的活动:以言指事,指会话的物理动作;以言行事,指言者传递给听者的意图;以言成事,指言语行为的结果,即以言行事之后言者或听者所采取的动作。

例如“请关门”是一以言指事。它给听者传达了关门的请求(体现了以言行事)。听者接收到这样一种请求后可能采取某些行动把门关上(体现了以言成事)。以言行事由二部分构成:以言行事强度和公式。以言行事强度用于区分一个言语行为是请求还是允诺等等。公式是以言行事的受体,用于描述系统状态。一个言语行为的满足取决于以言行事强度和公式二方面的满足。根据言语行为理论的思想以及对主动合作计算模型的研究和分析,我们提取出“条件请求”,“条件允诺”,“通知”三种通讯行为作为Agent间实现主动合作计算所需的基本通讯行为。

(1)条件请求(Request_c):言者要求听者当约束条件满足时主动地为它提供相应的服务。

(2)条件允诺(Promise_c):Agent₁向Agent₂作出条件允诺Promise_c。是指如果约束条件满足,Agent₁将为Agent₂主动地提供相应的服务,服务的完成预示着Agent₁完成了它对Agent₂作出的允诺。

(3)通知(Inform)。Agent通过inform通讯行为把相关信息通知给其它Agent。

设 φ 为基本通讯行为集合即 $\varphi = \{Request_c, Promise_c, Inform\}$ 。下面我们简单、直观地描述一下Multi-agent系统基于上述基本交互行为的主动合作计算过程。Agent₁(消息发送方)通过条件请求Request_c通讯行为首先向Agent₂(消息接受方)提出主动服务请求,要求Agent₂在条件满足时主动地为它提供相应的服务。Agent₂在接受到条件请求之后向消息发送方Agent₁作出条件允诺Promise_c。允诺一旦条件满足它将主动地为Agent₁提供相应的服务,并通过通讯行为通知Inform将结果返回给Agent₁(见图1)。

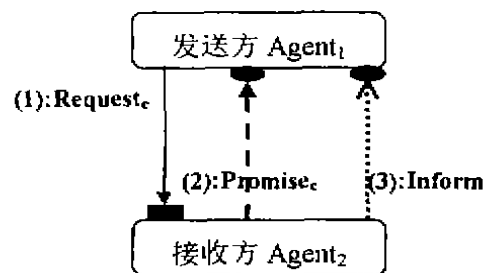


图1 Multi-agent系统的主动合作计算示意图

上面我们介绍了主动合作计算模型所需的通讯行为,那么Agent如何基于这些通讯行为并通过对这些通讯行为的响应来实现主动合作计算?在什么条件下我们可以称一个通讯行为被满足?在什么情形下我们可以说一个Multi-agent系统内存在主动合作计算关系?下面我们将基于我们在[1]中所提出的Multi-agent系统计算的理论框架来解决上述问题。

3 理论框架

我们注意到Agent间由于消息传递而导致的交互特性不仅需要关心消息传递行为的发生,还应关心消息发送者所传递的意图(如“通知”,“请求”,“允诺”等等)以及消息接收者和发送者可能采取的行动以及这些行动所产生的效果。Agent间的通讯行为是一种有意图的行为,其效果主要作用于通讯双方的内部状态上,对物理世界不产生影响。言语行为理论三分说有助于我们全面、准确地认识和分析Agent间的通讯行为,而文[1]中所提出的Multi-agent计算的理论框架则可以帮助我们进一步理解和认识上述通讯行为对Agent内部状态的影响,有助于我们定义言语行为的全心满足语义。

在文[1]中我们提出了Multi-agent系统中

Agent 计算的理论框架。该理论框架认为 Agent 基于 BICC 体系结构进行计算,即 Agent 是由信念 (Belief)、意愿 (Intention)、能力 (Capability)、承诺 (Commitment) 四个成份所构成的意向系统 (Intentional System)。Agent 的信念是 Agent 进行计算的基础,它刻画了 Agent 对自身以及外界环境的认识,Agent 的意愿对应于 Agent 的任务和目标,它是 Agent 计算的起因。Agent 的能力是 Agent 进行计算的前提,也是 Agent 成功地实现其意愿的一个重要条件。Agent 的承诺则体现了计算本身,它刻画了 Agent 对其未来行为的一种决策。

为了严格、形式化地介绍 Multi-agent 系统计算的理论、研究和描述 Multi-agent 系统主动合作计算模型,下面我们将首先提出 Multi-agent 系统计算的逻辑框架。该逻辑框架主要包括三个部分:语法、模型和语义。

语法部分是一个一阶的分枝时序逻辑 L 。L 的公式集由状态公式集 L_s 和路径公式集 L_p 二部分组成,为简化说明,文中具有下列符号约定:(1)常数符号集合 $Const$,包括 Agent 符号集合 $Const_{Ag}$;原子动作符号集合 $Const_{Ac}$;规划符号集合 $Const_p$;其它常数集合 $Const_{Ob}$;(2)变量符号集合 Var ,包括 Agent 符号集合 Var_{Ag} ;原子动作符号集合 Var_{Ac} ;规划符号集合 Var_p ;其它变量集合 Var_{Ob} ;(3)可枚举的谓词符号集合 Φ 。对于任意 $q \in \Phi$ 都对应有一个常数 $arity(q)$ 称为 q 的元。上述符号集合均非空、可枚举且互不相交,设 p, q, \dots 表示谓词符号; $\varphi, \psi, \nu, \dots$ 表示公式符号; i, j, \dots 表示 Agent 符号; a, b, \dots 表示原子动作符号; α, \dots 表示规划符号; x, \dots 表示变量符号。

定义 3.1 语言 L 的语法形成规则定义如下:

- R1: $p \in L_s$
- R2: 如 $\Psi, \varphi \in L_s$ 且 α 为规划表达式,则 $\neg\varphi, \Psi \wedge \varphi, \lambda x\varphi, W(\varphi), Can(\alpha, \varphi), Committed(\alpha, \varphi) \in L_s$
- R3: 如果 $\varphi \in L_s$, 则 $A\varphi, R\varphi \in L_s$
- R4: 如果 $\Psi, \varphi \in L_s$, 则 $\rightarrow\varphi, \Psi \wedge \varphi, \Psi U \varphi \in L_s$
- R5: $L_p \subseteq L_s$

其中,规划表达式定义如下:

- R6: 如果 $\varphi \in L_s$, 则 $confirm(\varphi), a$ 是规划表达式;
- R7: 如果 α, β 是规划表达式, 则 $\alpha; \beta, \alpha | \beta$ 也是规划表达式

除了通常的命题连接词,形式化语言 L 还引进了其它算子如:“until”时序算子 U , 全称路径算子 A , 实际路径算子 R , 以及其它一系列算子分别表示

Agent 的信念、能力、承诺等等。语言 L 中的一个项或者是一个常数或者是一个变量。

定义 3.2 语言 L 的一个模型 M 是一结构 $\langle T, <, U, \pi, Act, R, C \rangle$,

其中: T 是时刻集, T 中的每一时刻对应于世界的一个状态。 $< \subseteq T \times T$ 是 T 上的偏序关系且满足过去线性, 因而整个模型呈图 2 所示的树形结构。 $U = U_{Ag} \cup U_{Ac} \cup U_p \cup U_{Ob}$, 这里 U_{Ag} 是 Agent 集合; U_{Ac} 是原子动作集合; U_p 是规划集合; U_{Ob} 是其它对象集合。 $\pi: \Phi \times T \rightarrow \text{powerset}(U^n)$ 是对谓词符号的解释且满足: $\forall p \in \Phi; \forall t \in T; \forall n \in \mathbb{N}; (arity(p) = n) \Rightarrow (\pi(p, t) \in \text{powerset}(U^n))$ 。时刻 t 的一条路径是指始于该时刻, 由 t 的将来时刻构成的一条线性分枝, 在形式化模型中, 不同的路径对应于不同的 Agent 动作执行事件与环境事件的组合, 反映了世界的不同发展轨迹。

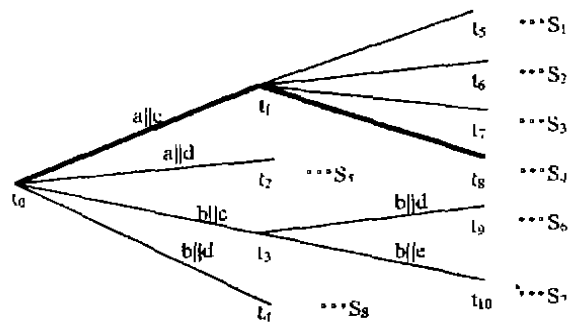


图 2 形式化模型示意图

定义 3.3 设 $t \leq t'$, 则 $[t, t'] = \{t'' \mid t \leq t'' \leq t'\}$ 为一路径子区间。

设 S_t 表示时刻 t 的所有路径的集合, S_s 是所有路径的集合, $Act: U_{Ag} \times U_{Ac} \rightarrow \text{powerset}(T \times T)$ 定义了原子动作的发生, $[t, t'] \in Act(t, a)$ 表示 Agent 在 $[t, t']$ 路径子区间中执行原子动作 a 。 $C: Const \rightarrow U$ 是对常数符号的解释, $R: T \rightarrow S_s$, 对于任一时刻 $t, R(t)$ 定义了在该时刻的实际路径即世界在该时刻的实际发展轨迹(如图 2 粗线条所示)。在形式化模型中, 任一时刻世界有多种发展轨迹, 在这些发展轨迹中我们可以标识出一条实际路径以描述模型在该时刻的实际发展轨迹。变量的一个指派 V 是映射 $V: Var \rightarrow U$ 。

Multi-agent 系统是个动态、不确定的系统。系统中各个 Agent 的动作并发、异步地发生。在任一时刻 Agent 可能执行各种动作并通过动作的执行来影响和控制世界的发展,然而这种影响和控制是有限的,世界发展轨迹还受其他 Agent 动作执行事件和环境事件的影响,所有 Agent 动作执行事件和环境事件共同确定世界的发展。考虑图 2 所示由二个 Agent 构成的 Multi-agent 系统计算的形式化模型。图中的结点表示时刻,边表示多个 Agent 的动作并发地发生。我们假定“||”左侧符号表示 Agent₁ 的动作,右侧符号表示 Agent₂ 的动作。在 t₀ 时刻 Agent₁ 通过执行动作 a 使得世界沿 t₁ 或 t₂ 方向发展,但世界发展的将来时刻是 t₁ 还是 t₂ 还取决于 Agent₂ 的动作,当 Agent₂ 执行动作 c 时则世界沿 t₁ 方向发展。当 Agent₂ 执行动作 d 时则世界沿 t₂ 方向发展,因而上述形式化模型刻画了 Multi-agent 系统中多个 Agent 行为的并发发生,Agent 行为对世界发展的影响和控制以及这种影响和控制的有限性。

定义 3.4 一个项的解释定义如下:如果 $\tau \in \text{Const}$ 则 $[\tau]_i = C(\tau)$ 否则 $V(\tau)$ 。

状态公式的可满足语义定义由模型 M、指派 V 和时刻 t 给出。M, V $\models \varphi$ 表示在指派 V 下公式 φ 在模型 M 的 t 时刻被满足。路径公式的可满足语义由模型 M、指派 V、路径 S 和时刻 t 加以定义。M, V $\models_{S,t} \Psi$ 表示在指派 V 下公式 Ψ 在模型 M 的路径 S 的时刻 t 被满足。

定义 3.5 语言 L 的语义定义如下:

- M, V $\models_p (r_1, \dots, r_n)$ iff $([r_1]_i, \dots, [r_n]_i) \in \pi(p, t)$
- M, V $\models A\varphi$ iff $\forall S \in S_i, M, V \models_{S,t} \varphi$
- M, V $\models R\varphi$ iff M, V $\models_{R_i, t, \varphi}$
- M, V $\models_{S,t} \Psi U \varphi$ iff $\exists t' \in S: M, V \models_{S,t'} \varphi$ 且 $\forall t'': t \leq t'' \leq t' \Rightarrow M, V \models_{S,t''} \Psi$
- M, V $\models_{S,t} \varphi$ iff M, V $\models_t \varphi$, 其中 $\varphi \in L$

根据上述语义定义我们可以派生出其它算子。F $\varphi = \text{true } U \varphi$ 是“必然”时序算子。G $\varphi = \neg F(\neg \varphi)$ 是“always”时序算子。A 是全称路径算子。E $\varphi = \neg A \neg \varphi$ 是存在路径算子。

4 Multi-agent 系统的主动合作计算模型

定义 4.1 设“Says-to(i, j, (if, cond, m))”是一个参数化的通讯行为。其中, i 是消息发送方 Agent, j 是消息接收方 Agent, if $\in \emptyset$ 表示以言行事强度(如“条件请求”,“通知”等等), cond 是一条件(如“飞机航班信息发生变化”),对于通知通讯行为

而言, cond 部分为空 Null, m 是消息的内容(如“提供新的飞机航班信息”)。

根据言语行为理论的思想, Agent 间的通讯行为是一动作,因而它必定在某一路径子区间上发生。 $[t, t'] \in \text{Act}([i], [Says\text{-to}(i, j, (if, cond, m))])$ 是指 Agent_i 在路径子区间 $[t, t']$ 中执行并完成言语行为“Says-to(i, j, (if, cond, m))”。由于“Says-to”是一动作描述符,为了在公式中描述 Agent 间的通讯行为,我们引进了一个特定谓词 comm, 公式 comm(i, j, (if, cond, m)) 表示言语行为“Say-to(i, j, (if, cond, m))”的发生,其语义定义如下:

定义 4.2 M, V $\models_{S,t} \text{comm}(i, j, (if, cond, m))$ iff $\exists t' \in S: [t, t'] \in \text{Act}([i], [Says\text{-to}(i, j, (if, cond, m))])$ 。

为了便于定义和描述 Agent 所需的服务,我们引入了 λ -表达式,同时我们引进一个特定的算子 answer($\lambda x \varphi, Ans$) 以表示 Agent 提供服务的结果。谓词 answer($\lambda x \varphi, Ans$) 是指 Ans 的 $\lambda x \varphi$ 的结果。

定义 4.3 谓词 answer 的语义定义:

M, V $\models \text{answer}(\lambda x \varphi, Ans)$ iff $(\forall r: (r \in Ans) \Rightarrow M, V \models_r \varphi)$

基于上述 Multi-agent 系统计算的逻辑框架,我们在文[1]中着重研究了构成 Agent 体系结构的四个成分之间的相互关系,分析了 Agent 是如何基于其内部状态进行计算的。我们得到一个重要结论: Committed(α, φ) \wedge Can(α, φ) $\rightarrow RF\varphi$ 即如果 Agent 承诺执行某一规划 α 以实现 φ 并且 Agent 具有能力通过规划 α 的执行以实现 φ , 则 φ 必将在系统实际发展轨迹的某一将来时刻被满足。在这种情况下我们称 Agent 全心地实现了 φ 。在本文,通讯行为的语义被解释为该通讯行为被满足的条件。这些条件的满足并不是偶然的,而是相关 Agent 具有相应的内部状态、采取了某些行为而实现的,因而是全心的。下面我们将基于承诺和能力二个抽象概念来给出上述通讯行为的全心满足语义定义。为了描述通讯行为对 Agent 产生的影响,我们引入二个算子:(1) Can(α, φ), 表示 Agent_i 具有能力通过规划 α 的执行以实现 φ ;(2) Committed(α, φ), 表示 Agent_i 承诺执行某一规划 α 以实现 φ 。(有关承诺、能力等概念的语义定义以及上述结论的证明请参阅文[1])。

根据言语行为理论三分说,我们认为通讯行为的全心满足包括三方面的内容:(1) 通讯行为的发生;(2) 通讯行为对言者或者听者产生的影响;(3) 言者或者听者所采取的动作。公式 comm(i, j, (if,

$\langle \text{cond}, m \rangle$ 仅描述通讯行为的发生, 为了描述通讯行为是否被满足, 我们通过引入算子 W 来定义通讯行为的全心满足语义。算子 W 应用于形如 $\text{comm}(i, j, \langle \text{if}, \text{cond}, m \rangle)$ 的公式。 $M, V \models W(\text{Comm}(i, j, \langle \text{if}, \text{cond}, m \rangle))$ 是指在 t 时刻“Says-to($i, j, \langle \text{if}, \text{cond}, m \rangle$)”通讯行为被全心满足。

在主动合作计算模型中, Agent_1 首先向消息接收方 Agent_2 发出条件请求, 要求 Agent_2 在条件满足之时主动地为它提供相应的服务, Agent_2 接收到 Agent_1 的条件请求之后向 Agent_1 作出条件允诺, 即当条件满足时它将主动地给 Agent_1 提供相应的服务。在 Multi-Agent 系统中由于 Agent 的行为以及环境事件的发生, 当约束条件被满足时, Agent_2 将根据其作出的允诺主动地为 Agent_1 提供服务并将相应的结果返回给 Agent_1 , 服务的完成意味着合作的终止(见图 1)。

在主动合作计算模型中, Agent 间的交互涉及三种不同性质的通讯行为: 条件请求通讯行为、条件允诺通讯行为和通知通讯行为。下面我们给出上述三种通讯行为的全心满足语义定义, 分析 Agent 是如何基于上述通讯行为并通过对这些通讯行为的响应来实现主动合作计算的, 在此基础上我们给出 Multi-agent 主动合作计算模型的定义。

定义 4.4 Request _{t_c} 通讯行为的语义定义:

$M, V \models W(\text{comm}(i, j, \langle \text{Request}_{t_c}, \text{cond}, \lambda x \varphi \rangle))$
iff $\exists t_c \in R(t): [t, t_c] \in \text{Act}([i], [\text{Says-to}(i, j, \langle \text{Request}_{t_c}, \text{cond}, \lambda x \varphi \rangle)]_c) \wedge [\exists t' \in R(t): t_c \leq t' \text{ 且 } M, V \models W(\text{comm}(j, i, \langle \text{Promise}_{t_c}, \text{cond}, \lambda x \varphi \rangle))]$

条件请求通讯行为 Request_{t_c} 被全心满足, 如果: (1) 言者成功地执行了该通讯行为; (2) 听者在 Request_{t_c} 通讯行为完成之后的某一将来时刻向言者作出条件允诺 Promise_{t_c} , 且听者全心地满足了其允诺。在此处, 我们将条件允诺 (Promise_{t_c}) 通讯行为称为条件请求通讯行为 Request_{t_c} 的伴随通讯行为。

定义 4.5 Promise _{t_c} 通讯行为的语义定义:

$M, V \models W(\text{Comm}(i, j, \langle \text{Promise}_{t_c}, \text{cond}, \lambda x \varphi \rangle))$
iff $\exists t_c \in R(t): [t, t_c] \in \text{Act}([j], [\text{Says-to}(j, i, \langle \text{Promise}_{t_c}, \text{cond}, \lambda x \varphi \rangle)]_c) \wedge ((\exists t' \in R(t): t_c \leq t' \text{ 且 } M, V \models_{\text{cond}} \Rightarrow (\exists t \in R(t): t_c \leq t' \text{ 且 } M, V \models_{\text{cond}} \wedge (\exists [\alpha], M, V \models_{\text{cond}} \text{Committed}(a, \lambda x \varphi) \wedge \text{Can}(a, \lambda x \varphi)) \wedge (\exists [\text{Ans}], t'' \in R(t): t' \leq t'' \text{ 且 } M, V \models_{\text{answer}}(\lambda x \varphi, \text{Ans}) \wedge M, V \models W(\text{comm}(j, i, \langle \text{Inform}, \text{null}, \text{answer}(\lambda x \varphi, \text{Ans}) \rangle))))$

一个条件允诺通讯行为 Promise_{t_c} 被全心满足,

如果: (1) 言者成功地执行了该通讯行为; (2) 如果约束条件在某个将来时刻 t' 被满足, 则在 t' 时刻言者将承诺执行某一规划以实现 $(\lambda x \varphi)$ 且言者能通过该规划的执行来实现 $(\lambda x \varphi)$; (3) 在 t' 时刻的某个将来时刻 t'' , 言者实现 $(\lambda x \varphi)$ 且将结果通知给听者。在此处, 我们将通知通讯行为称为条件允诺通讯行为 Promise_{t_c} 的伴随通讯行为。

定义 4.6 Inform 通讯行为的语义定义:

$M, V \models W(\text{comm}(i, j, \langle \text{Inform}, \text{null}, \varphi \rangle))$ iff $\exists t_c \in R(t): [t, t_c] \in \text{Act}([i], [\text{Says-to}(i, j, \langle \text{Inform}, \text{null}, \varphi \rangle)]_c) \wedge M, V \models_{\varphi}$

通知通讯行为 Inform 被全心满足, 如果: (1) 言者成功地执行了该通讯行为; (2) 在该通讯行为完成之时 φ 被满足。

定义 4.7 Multi-agent 系统的主动合作计算模型:

一个 Multi-Agent 系统具有主动合作计算模型, 如果: (1) $M, V \models \text{comm}(i, j, \langle \text{if}, \text{cond}, m \rangle) \Rightarrow \text{if} \in \{\text{Request}, \text{Promise}, \text{Inform}\}$, 即 Agent 间的通讯行为只能为条件请求或者条件允诺或者通知通讯行为; (2) 存在某一时刻 t , 使得 $M, V \models W(\text{comm}(i, j, \langle \text{Request}_{t_c}, \text{cond}, \lambda x \varphi \rangle))$; (3) 存在某一时刻 t , 使得 $M, V \models W(\text{comm}(i, j, \langle \text{Promise}_{t_c}, \text{cond}, \lambda x \varphi \rangle))$, 并且 Agent_i 向 Agent_j 发出的条件允诺通讯行为是 Agent_i 的条件请求通讯行为的伴随通讯行为; (4) 存在某一时刻 t , 使得 $M, V \models W(\text{comm}(j, i, \langle \text{Inform}, \text{null}, \varphi \rangle))$, 并且 Agent_i 向 Agent_j 发出的通知通讯行为是 Agent_i 的条件允诺通讯行为的伴随通讯行为。

主动合作计算模型的上述定义表明: (1) Agent 间的通讯行为只能为条件请求或者条件允诺或者通知行为; (2) 在该 Multi-Agent 系统中, 至少有一个条件请求通讯行为被全心满足; (3) 在该 Multi-Agent 系统中, 至少有一个条件允诺通讯行为被全心满足且该条件允诺通讯行为只能为条件请求通讯行为的伴随通讯行为; (4) 在该 Multi-Agent 系统中, 至少有一个通知通讯行为被全心满足且通知通讯行为只能为条件允诺通讯行为的伴随通讯行为。

结论 在 Multi-agent 系统中, 由于资源、能力的有限性和分布性, 因而合作是 Multi-agent 系统的一个重要特征。当前随着计算机技术的不断发展以及 Internet、Intranet 应用的不断深入, 传统合作计算模型已不能满足现有需求, 主动合作计算正成为

(下转第 34 页)

其次,我们还要求 Agent 有良好的反应性和面向目标的特性,但这些要求不在 OOP 模型的要求之列。另外,在 MAS 中的每个 Agent 均有它们各自的控制线程,而在标准对象模型中整个系统只有一条控制线程(新开发的并发 OOP 也可以有多条控制线程),这其实也是 Agent 和对象二者自治程度不同的一种体现。但 OOP 常常作为 AOP 开发的有效工具,即用 OOP 技术实现 AOP 的思想。AOP 还是一个较新的领域,借鉴 OOP 的某些成熟特性(如封装、继承、多态等)对 AOP 的研究和发展有很大的意义。

参考文献

- 1 Coen M. Available at: <http://www.at.mur.edu/people/sodabor/slideshow/total/p001.html>.
- 2 Finn T, et al. The KQML information and knowledge exchange protocol. In: *Third Intl. Conf. on Information and Knowledge Management*, 1994
- 3 Foner L. Available at: http://www.foner.www.media.mit.edu/people/foner/Julia/subsection3_4_1.html which is titled as What's an agent? Crucial notions
- 4 Jennings N R, et al. A Roadmap of Agent Research and Development. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 1998(1): 275~306
- 5 Jennings N R, et al. *Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets*. Springer-Verlag Heidelberg, 1997
- 6 Maes P. *Designing Autonomous Agents*. Cambridge, MA: MIT Press, 1990
- 7 Rao A S, Georgeff M P. BDI Agents. From Theory to Practice. In: *Proc. of the First Intl. Conf. on Multi-Agent Systems (ICMAS-95)*. San Francisco, USA, 1995
- 8 Russell S, Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice-Hall, 1995
- 9 Shoham Y. Agent-Oriented Programming. *Artificial Intelligence*, 1993, 60(1): 51~92
- 10 Wittig T. ARCHON: An Architecture for Multi-Agent Systems. Ellis Horwood, 1992
- 11 Wooldridge M J. Agent-Based Software Engineering. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1997, 144(1): 26~37
- 12 Wooldridge M J, Jennings N R. Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey. In: *Proc. of ECAI-Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages*. Amsterdam, Netherlands, 1994 1~32
- 13 Franklin S, Graesser A. Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents. In: *the Proc. of the Third Intl. Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages*. Springer-Verlag, 1996

(上接第 29 页)

一个新的应用需求点。本文提出了一个主动合作计算模型,基于言语行为理论以及我们所提出的 Multi-agent 系统计算的理论框架,本文讨论了该合作计算模型所涉及的 Agent 通讯行为,分析了 Agent 如何基于这些通讯行为并通过对这些通讯行为的响应来完成主动合作计算,并进一步给出了主动合作计算模型的定义。

Multi-agent 系统的主动合作计算模型的提出,有助于我们进一步理解和认识 Multi-agent 系统的主动合作关系和主动合作计算,分析和评估 Multi-agent 系统中的不同合作计算模型;同时有关交互行为的全心满足语义的定义可以帮助我们深层次地理解和分析 Agent 如何参与合作、如何对各种交互行

为作出响应以指导 Agent 的设计,并给我们提供了一种有效的方法和手段用于规范和描述复杂、庞大的 Multi-agent 系统。

参考文献

- 1 毛新军. Multi-Agent 系统中 Agent 计算的理论框架. [博士学位论文]. 国防科技大学研究生院, 1998. 4
- 2 Haddadi A. *Communication and Cooperation in Agent Systems: A Pragmatic Theory*. Springer-Verlag, 1996
- 3 Singh M P. *Multi-agent System: A Theoretical Framework for Intentions, Know-how, and Communications*. Springer-Verlag, 1994