

Agent 交互层次模型

The Hierarchical Model on Agent Interaction

高波 费奇 陈学广

(华中科技大学系统工程研究所 武汉430074)

Abstract The interaction problem is at the core position of researches on multi-agent systems. So the research on agent interaction mechanism is very important and fundamental. To this end, the hierarchical model on agent interaction (HMAI) is proposed on the basis of studying the characteristics of agent interactive behaviors. There are four main layers in HMAI which contains the layer of computer network protocol, the layer of communication protocol, the layer of interaction protocol and the layer of interactive strategy. The latter three layers are the emphases of this paper. Their concepts, theories and present status of research will be analyzed in detail. At the end of the paper, some notes on comprehending HMAI and some work that should be carried on are discussed.

Keywords the Hierarchical Model on Agent Interaction (HMAI), Agent, Multi-agent system, Interaction, Communication, Coordination

1 引言

Agent 的交互机制是 Agent 社会性的重要表现,也是 Agent 区别于传统 AI 系统的重要属性,更是多 Agent 系统研究的核心问题^[1,2]。理性、完善的交互机制是多 Agent 之间进行协调、协作和协商的基础。哲学和社会学的研究表明,人与人之间的沟通和交流是人类社会发展的根本动因。同样,对 AI 系统来说,构造具有交互能力的分布式 AI 系统是应对分布、时变、异质、大规模等复杂问题的重要手段^[2]。对多 Agent 系统来说,交互作用的重要性具体体现在下面一些方面^[3,4]。

1) Agent 之间的交互作用是产生智能的重要手段。传统 AI 系统大都采用独立的内部推理机和 Von Neumann 的控制结构,企图体现出足够的智能。但是现代 AI 认为,智能并不会在独立的环境中起作用,它们必须成为所处环境的一部分,而且这样的环境中常常包含有其他的智能系统。这样就构成了多 Agent 系统。因此,智能应该以“社会”的形式体现,具体就表现为智能体的交互作用。

2) Agent 必须通过交互作用来解决经验、能力、资源和信息的有限性。在多 Agent 系统中,由于空间的分布性和各种资源的有限性,在面对复杂问题时,单个 Agent 很难获得整个问题的全局模型。因此,为了促进问题求解,每个 Agent 必须维护两种模型,一个是有关自身的领域化模型,一个是有关其他 Agent 的广域

性模型,而这两种模型的形成和完善必须通过交互来实现。

3) 交互作用是解决依赖、冲突和竞争等关系的重要途径。在多 Agent 环境下,Agent 之间的行为和目标或于目标之间具有某些依赖关系,并有可能造成某些冲突和竞争。为此,不管是出于协作或竞争的目的,Agent 之间都需要协调彼此的行为,而协调的基础就是交互。

总之,由于客观世界的无限丰富性和处于其中的个体的资源有限性之间存在着绝对的矛盾,任何智能体的进化和发展都必须建立在社会性的基础上,对多 Agent 系统也不例外。因此,研究交互机制对多 Agent 系统的发展,甚至对人类社会自身的认识都有基础性的重要作用。

但是由于交互问题本身的复杂性和多样性,人们很难对 Agent 交互机制获得一个清晰和完整的认识。为此,我们根据 Agent 交互行为的特点,提出了 Agent 交互层次模型,并重点分析了其中的通信协议、交互协议和交互策略等概念,以期较全面地反映 Agent 交互机制的特点。

2 Agent 交互层次模型

首先,在介绍 Agent 交互层次模型之前,有必要对交互和交互机制的概念作进一步的说明。我们这里的交互是一个比较广泛的概念,它泛指 Agent 之间以任何形式和任何深度进行的交往行为,这样,Agent 之

高波 博士研究生,研究方向为分布式人工智能及智能决策支持技术,费奇 教授、博导,系统工程研究所所长,陈学广 教授、博导。

间进行的任何通信、协作或协商行为都属于这个范畴。Agent 的交互机制则是对 Agent 交互行为的内在因素的刻画,它主要解决三个问题:一,为什么交互?二,和谁交互?三,怎样交互?

Agent 交互层次模型正是在分析了 Agent 交互行为触发的动因以及 Agent 交互行为的具体实现过程的基础上,根据 Agent 在信息传递过程中表现出来的固有的层次性,结合计算机网络的层次性协议结构提出来的。在 Agent 交互层次模型中,整个交互行为主要分为四个层次,处于下层的交互行为为上层交互行为服务,上层交互行为的实现建立在下层交互行为实现的基础上,从而构成一种层次式的服务关系,图1以假想的两个交互中的 Agent 为例(Agent A 和 Agent B),给出了 Agent 交互层次模型的结构。

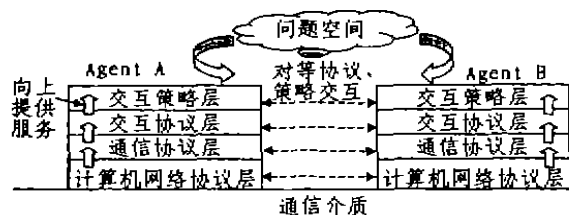


图1 Agent 交互层次模型结构示意图

其中,处于第一层(最底层)的是计算机网络协议层,这是一个面向最终应用的层次,它负责将通信协议层的信息通过某种具体的计算机网络协议来表达,从而保证 Agent 之间各种交互行为的最终实现。这里的网络协议可以是 TCP/IP、X.25 或 IPX/SPX 等等,应该根据具体的 Agent 应用来决定。关于这一层的理论和实现不是我们这里讨论的重点,因此在下面的讨论中我们都假设这一层的交互是已经实现的。

处于第二层的是通信协议层。它主要用于保证 Agent 之间能够相互交换和理解消息,这里的消息大都蕴涵有明确的意图,比如指示、承诺、提议、拒绝等等,能够反映 Agent 作为一种意识系统的主观能动性。在目前的研究中,通信协议层一般建立在言语行为理论(Speech Act Theory)的基础上,被广泛接受的 Agent 通信语言是知识查询与操纵语言(KQML)。

处于第三层的是交互协议层。它的作用是保证 Agent 之间能够进行具有一定结构的消息交换,如果说通信协议层的目的是让交互的双方能够听懂对方每句话的意思,那么交互协议层的目的就是要让交互的双方能够在上层策略指导下,通过一系列的对话来实现协调、协商或协作的目的,交互协议层是 Agent 交互机制的重点之一,目前已经有许多比较成功的交互协议,比如:黑板结构、合同网协议、投票协议和拍卖协议等等。

处于第四层(最上层)的是交互策略层。它直接面向问题,通过对问题中存在的依赖关系、相关 Agent 的预期行为以及当前可用的交互协议的综合分析,确定 Agent 在交互过程中应该表现的行为。交互策略可以在系统设计阶段预先指定,或者在系统动作过程中通过具体的机制实现。交互策略的制定是 Agent 智能特性的重要体现,也是 Agent 成功交互的关键。

采用层次模型的方法来分析 Agent 的交互机制,其意义是明显的。它将复杂的交互过程分解为相对独立的几个层次,有助于简化对交互问题的认识,也有助于 Agent 交互机制的设计和实现,对 Agent 技术进一步发展后的标准化工作也有促进作用。

下面我们将重点分析 Agent 交互层次模型中的通信协议层、交互协议层和交互策略层。并在最后给出理解该模型的几点注释。

3 Agent 通信协议

3.1 言语行为理论^[2,3]

Agent 通信协议的原理主要是基于言语行为理论。言语行为理论最初是人类语言学的研究对象,它强调语言也具有某种行为能力,可以用以达到某个目标或满足某种意图。随着计算机科学和人工智能技术的发展,它成了众多研究者的研究对象,并被广泛运用到人工系统的通信中。Moore^[6]分析了电子通信和人类语言交通过程中蕴涵的言语行为,发现它们的种类大部分是一致的。从而证明了言语行为理论在人类系统或人工系统中具有普适性。

言语行为理论认为与一条言语相关的有三个方面:①言语的措辞(Locution),即发言者在表达过程中采用的语言形式;②语内表现行为(Illocution),即发言者企图通过言语措辞表达的真实意图;③言语表达效果(Perlocution),即言语导致的相应后果。比如“把门关上”这句话,其几个具体的发音或文字就是言语的措辞;而说话人企图达到的某种请求或命令则是其语内表现行为;最后,在这句话表达之后,门的状态是关、是开或是半开半闭则是相应的言语表达效果。

一个言语行为主要强调的是语内表现行为,它又分为两个部分,一是这个言语行为的内容,另一个是这个言语行为的意图,又称为语内表现行为的动因。这样,任何一个言语行为可以用公式 $F(P)$ 来反映,其中 P 为一个命题,对应这个言语行为的内容; F 为作用于这个命题的语内表现行为的动因,也就是说,“把门关上。”实际上可以形式化为:“命令(把门关上).”或“请求(把门关上).”等等语句。另外,人们为了研究的方便,一般将语内表现行为的动因用一种特殊的动词来表示,这就是述行语(Performative)。

言语行为理论对语言的措辞、内容、意图、效果等因素作了专门的区分和讨论,尤其是通过引入语内表

现行为的动因这个概念,集中地体现了言语行为的意图,比如:断言、指示、许诺和宣告等等,从而可以更有效地定义消息的种类,避免了通信过程中有可能造成的语义歧义;同时,也更有利于表现 Agent 作为意识系统的信念、愿望、意图等概念。

3.2 Agent 通信语言(ACL)^[4-11]

言语行为理论提供了 Agent 通信的基本思想,但在实际系统中,它必须以某种确定的模式表现出来,这就是 Agent 的通信协议。结合言语行为理论的研究成果,Agent 的通信协议必须能够清楚地表达一条消息的内容和意图,具有简明的语法和清晰的语义,并且所传消息的知识背景也应该为通信的各方所掌握,从而保证传递消息的高效性和明确性。

Agent 通信语言(ACL)是在这几方面比较成功的一种信息交换协议。它最初是作为 ARPA 知识共享计划的组成部分提出来的。ACL 具体又由两种语言构成:一种是知识交换格式(KIF),它是一阶谓词逻辑的扩展形式,用于表示消息的内容;另一种是知识查询与操纵语言(KQML),它以 Lisp 语言为基础,是 ACL 的主体,KQML 最大的特点是理解消息内容的所有信息都包含于通信信息自身当中。一条基于 KQML 协议的消息可以简单地定义为下面的结构:

```
(KQML-Performative
:sender (word)
:receiver (word)
:language (word)
:ontology (word)
:content (expression)
...)
```

其中,KQML-Performative 为 KQML 中采用的述行语,其定义和分类直接参考了言语行为理论中述行语的概念;:sender、:receiver 为消息的传递参数,用以标示消息的发送方和接收方;:language 表示消息内容的表达语言,比如 KIF、PROLOG、LISP 等;:ontology 给出了词汇对照解释表(即背景知识库),使接收方能够理解消息的知识背景;:content 表示消息的内容。其中,:language、:ontology 和:content 共同描绘了消息的语义。

KQML 的标准化工作并没有完成,它还存在着诸如:语义形式化不够,有时候导致语义不清;某些述行语的表达范围超过了语内表现行为的范围;述行语之间正交性差,存在重叠等等现象。不过随着研究的深入,这些问题正在一步步得到解决。总的来说,以它为基础的 Agent 通信语言作为 Agent 间的通信协议得到了大多数研究者的认同。

4 Agent 交互协议

Agent 通信协议保证了通信各方能够交换并理解消息,但 Agent 要想完整地表达自己交互的意图,必

须通过一系列有组织和结构的消息交换来达到。我们也将这种在一定意图驱动下的有组织和结构的消息交换过程称为对话过程。交互协议就是对对话过程的抽象和规定。

Agent 交互协议直接反映了 Agent 交互的目的和交互的规则,与 Agent 内部的推理机制也紧密相关,因此是多 Agent 系统研究的重点和热点。从现在已经提出的一些交互协议来看,它们大都是参照了人类在社会生活中进行的各种各样的交互活动,同时与社会学、组织学、决策理论及人工智能等领域的研究成果相结合,在一定前提下抽象而成的。

交互协议可以按照多种标准进行分类,但是比较重要的分类有两种。第一种是根据交互的目的来分^[2],这样可以分为:基于协调的交互协议、基于协作的交互协议和基于协商的交互协议,因此也有些文献直接将它们称为“协调协议”、“协作协议”和“协商协议”。一般来说,“协调协议”的范围比较广,泛指协议的目的是在多 Agent 的行为间实现“一致性”,它基本上等同于我们这里采用的交互协议的概念;“协作协议”则强调交互的各方具有相同的利益关系,协议的目的是帮助它们互相合作以达到共同的目标,比如,合同网、黑板结构就常用于协同问题求解;“协商协议”则相反,它是一种竞争性的或自利性的交互协议,采用该协议的 Agent 其目的是追求自身利益的最大化,这种协议的例子有:投票机制、拍卖机制、交涉机制、辩论机制等等。

第二种分类方法是根据交互协议的作用时间来分^[2],这样可以分为:长期协议、中期协议和短期协议等等。长期协议规定了 Agent 在很长一段时间的交互规则,比如基于组织结构的协议,它可能定义了一个 Agent 对应的“角色”,那么在这种“角色”关系变化前,这个 Agent 都必须按照这个“角色”的要求进行活动和交互,并履行这个“角色”对应的承诺;相反,短期协议给出的是 Agent 在某个具体任务中的交互规则,甚至可能是一次性的,比如合同网等等,Agent 只在某个具体任务进行中遵守协议规定,任务完成协议也就终止了;中期协议的作用时间则处于前面两者之间,它们一般是基于规划交互的协议,如局部广域规划(PGP)等等,它强调 Agent 之间首先将将来一段时间的活动规划进行交经协商,形成一个广域的规划,并按照广域规划修正自己的局部规划,以此指导自己将来一段时间的行为。

其实,交互协议的分类只是研究的需要,并没有严格的区别,为了某种特殊用途,设计者可能采用一些综合性的交互协议,总之,不管是什么交互协议,其目的都是要保证对话过程的组织性从而体现出交互方的意图并达到一定的目的,因此一个基本的交互协议可作

如下描述^[1]。

令 A 表示所有 Agent 组成的集合; S 表示 Agent 所有可能的状态; B 表示 Agent 所有可能的行为能力; 并假设任意集合 Q 的幂集为 $p(Q)$ 。则一个交互协议 InP 可以定义为一个六元组:

$$InP := \langle Ag, St, Ob, R, Bh, Act \rangle$$

其中: $Ag \in p(A)$, 表示该交互协议涉及的对象, 它主要包括有利益关系的各个 Agent 个体。如合同网协议中的发包者和承包者, 协商协议中利益冲突的各方等等。

$St \in p(S)$, 表示 Agent 在交互过程中的各个交互状态。这个状态总是与 Agent 的行为相联系。比如, 在合同网协议中, 发包者向潜在的承包者发出标书后是一种状态, 收到传回的标书后又是一种状态, 最后问题解决了则达到了目标状态。

$Ob \in p(S)$, 且 $Ob \subseteq St$, 表示该交互协议企图达到的目标状态。这个目标状态总是与一定的评价指标相联系, 比如协商后得到的一个具体价格或是一组指标。另外, 这个目标可以是事先明确给定的, 也可能是在交互过程中才明确的。

$R \subseteq St \times St$, 表示交互状态间的一种直接的关系。通过定义这种状态关系, 同时结合 Agent 行为的定义, 可以有助于明确从初始状态到目标状态的路径。这一点在下面 Bh 和 Act 的定义中有具体说明。

$Bh \in p(B)$, 表示交互过程中允许的 Agent 行为。这种行为又可进一步分为被动行为和主动行为。被动行为描述了 Agent 接收其它 Agent 实施的行为的能力, 即感应相关事件的能力, 比如, 在合同网协议中, 发包者和承包者相互接收标书的能力, 在协商协议中交互各方接收提议、认可、反对的能力, 主动行为则描述了 Agent 主动实施行为的能力, 如发包者发包的能力, 承包者投标的能力, 协商各方提议、反提议、认可、反对的能力。

$Act: R \rightarrow Bh$, 表示交互状态的改变与某个确定的行为之间的关系。一方面, 这说明了 Agent 所处交互状态的改变总是与 Agent 实施的某个行为有关, 比如, 在合同网协议中, 承包者状态的改变总是因为它接收了某个标书、发出了某个标书或是完成了某个合同。另一方面, Agent 实施的任何一个有效的行为也必须与相应的交互状态相联系。同样在合同网协议中, 在发包者收到潜在的承包者传回的标书的状态下, 此时发包者的有效行为应该是: 评价并选择指定的对象, 发消息认定事实上的承包者等等。

上面给出了交互协议的一般描述, 在实际应用中为了保证协议的有效运行, 还应该注意下面两点: 一是协议的适用环境, 比如, 合同网协议就假定了交互各方

是合作而非敌意的, 网络资源是充足的; 基于博弈论的协商协议则假定了交互各方是完全理性的, 具有完整的投入产出矩阵等等。二是应该根据应用环境的具体情况给出额外的规则和约定, 如, 合同网协议中发包者为了及时获得投标消息在发包时同时给出了反应时间限制等等。

5 Agent 交互策略

前面介绍的计算机网络协议、通信协议和交互协议给出了保证交互进行的基本框架, 在这个框架支持下 Agent 之间可以进行有意识的对话。但总的来说, 这只是一种基础性的保证, 它并不涉及具体的问题。在实际应用中, 建造多 Agent 系统, 或者说 Agent 交互的目的总是为了解决某方面的问题。因此, 要想通过交互过程促使问题的解决, 必须针对 Agent 面对的具体问题采取相应的交互策略。

总的来说, 交互策略涉及到对待问题的分析, 对相关 Agent 情况的了解, 以及对相关交互协议的分析。具体来说, 如果说多 Agent 系统的问题求解过程就是每个 Agent 搜索目标状态的过程^[3], 那么求解该问题的交互策略就是找出每个 Agent 在这个问题上的与/或图描述, 并找出这些与/或图中存在的依赖关系, 从而选择对应的交互协议。

对于相对稳定、封闭的问题环境, Agent 的交互策略可以在多 Agent 系统的设计阶段由设计人员预先分析解决, 现在的应用研究大都采用这种方式。但实际上, 多 Agent 系统提出的目的更强调的是一种开放、动态的应用环境, 如 Internet。因此, 赋予 Agent 在运行状态下自主进行交互策略制定的能力相当重要, 甚至必需。下面给出了一个简单的适于动态交互策略制定的框架^[7,10]。

- A 交互协议的选择
 - A1 对当前问题的分析
 - A2 对其它 Agent 行为的预期
 - A3 对备选协议的分析
- B 交互过程的运作
 - B1 对当前协议的承诺
 - B2 对当前协议的监控
- C 交互例外的处理
 - C1 对例外情况的分析
 - C2 对当前交互协议的评价

首先, 步骤 A 描述了 Agent 选择交互协议的行为, 这个行为发生的条件是遇到了新问题, 或是经过步骤 C, 确定了重新选择协议的要求。这个步骤需要完成三方面的分析, 即 A1、A2、A3, 最后给出选定的协议, 同时进入步骤 B。步骤 B 描述了交互行为的运作过程, 首先, Agent 应该对选定的协议作出承诺, 保证按照协议的要求实施交互行为; 同时, 独立的机制将在交互过程中监控 Agent 实施协议的情况, 如果出现有超出协议规定的情况, 则激发例外处理程序, 进入步骤 C。在

步骤 C 中将对例外情况进行分析,并对当前的交互协议重新评价,如果协议已经失效,则重新进入步骤 A,否则调整状态,转入步骤 B。例外的类型有:协议完成(作为一种特殊的例外)、协议无法进行、其它 Agent 改变协议等等。其中前两种例外一般来说将会导致协议失效。

运行状态下 Agent 交互策略的研究还很不成熟,文[7]给出了这方面的一个简单的应用案例,但要想系统的分析和刻画这种动态的策略制定过程还有很多工作要做。

结束语 我们认为 Agent 交互层次模型比较全面地刻画了 Agent 交互机制的特点,并且给出了一个用于实际应用问题的应用框架。但是我们应该申明,由于多 Agent 系统应用领域的多样性,Agent 交互行为可能表现出一些特殊性,因此对 Agent 交互机制中存在的这种层次关系的理解应该是灵活的、概念性的。

首先,Agent 交互层次模型中层次之间的划分并不是严格的、一成不变的。尤其是交互协议层和交互策略层的划分。一些中长期的交互协议通过引入承诺、联合承诺、协定、社会协定等机制,可以保证 Agent 在交互过程中根据环境的变化在一定范围内调整自己的行为方式^[1],这在一定程度上体现了交互策略层的功能。这时,作为一个协议,两部分是紧密结合的,但在概念上两种功能之间还是存在层次关系。

另外,Agent 交互层次模型实际上假设了 Agent 之间的交互基础是直接通信,这虽然是 Agent 交互中最重要、最广泛的一种基础措施,但并不是唯一的。大体来说有两种例外情况,一种情况是多 Agent 系统中建立了严格而完善的组织结构^[1],Agent 的任务、求解过程等情况都是事先已知的,因此在运作构成中不需要 Agent 之间进行交互协调;另一种情况是 Agent 之间的交互是通过环境或其它中介间接进行的^[4],也就是说,在给定 Agent 之间交互规则的情况下,通过对环境的改变和感知可以达到间接通信的目的。但即使在这种情况下,交互层次模型的总体结构仍然是成立的。

在多 Agent 系统充满魅力的诱人前景召唤下,由于 Agent 交互行为的重要性和复杂性,大量的研究者在交互方式、交互协议、形式化理论和应用方法等方面开展着研究工作。我们认为,在进行这些工作的同时,对 Agent 交互机制进行全面深入的分析更是必要和基本的。为此,我们引入了 Agent 交互层次模型,并企图证明 Agent 交互机制中确实存在这样一种层次关系,通过对这种层次关系的了解,可以促进我们对 Agent 交互机制的认识。

在 Agent 交互层次模型指导下,我们今后的工作

应该集中在以下几个方面:

- 1) 在言语行为理论指导下,结合 KQML,找出足够小而完备的进行语集合,给出基于本体论的明确的语义解释,并最终得到一个基础性的通信语言;
- 2) 在对现有交互协议的优缺点进行分析的基础上,提出新的交互协议,最终得到一个基本交互协议的适用性列表;
- 3) 分析 Agent 推理机制对 Agent 交互行为的影响,完善交互协议理论框架;
- 4) 开展动态交互策略的形式化研究,形成多 Agent 系统在开放、动态环境下的交互策略理论;
- 5) 在以上工作的基础上,进一步完善 Agent 交互层次模型,促进多 Agent 系统在实际环境中的开发应用。

参考文献

- 1 Wooldridge M. Intelligent Agent Gerhard Weiss, ed. MultiAgent Systems. Massachusetts: The MIT Press, 1999
- 2 Huhns M N, Stephens L M. Multiagent Systems and Society of Agents Gerhard Weiss, ed. MultiAgent Systems. Massachusetts: The MIT Press, 1999
- 3 Jennings N R. Coordination Techniques for Distributed Artificial Intelligence. G. M. P. O'Hare, N. R. Jennings, eds. Foundations of Distributed Artificial Intelligence. Wiley, 1996
- 4 Labron Y, Finn T. A semantics approach for KQML—a general purpose communication language for software agents. In: Third Intl. Conf. on Information and Knowledge Management (CIKM'94), November 1994
- 5 Covington M A. Speech acts, electronic commerce, and KQML. Decision Support Systems, 1998, 22
- 6 Moore S A. Categorizing automated messages. Decision Support Systems, 1998, 22
- 7 Bourne R A, Excelente-Toledo C B, Jennings N R. Run-Time Selection of Coordination Mechanisms in Multi-Agent Systems. In: Proc. 14th European Conf. on Artificial Intelligence (ECAI-2000), Berlin, Germany
- 8 Beer M, et al. Negotiation in Multi-Agent Systems. Knowledge Engineering Review, 1999, 14(3)
- 9 Steels L. Cooperation between distributed agents through self organization. In: Y. Demazeau, J. P. Nihiller, eds. Decentralized AI-Proceedings of the First European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World (MAAMAW-89). Elsevier Science Publishers, The Netherlands, 1990
- 10 Wooldridge M, Jennings N R. Formalizing the Cooperative Problem Solving Process. In: 13th Intl. Workshop on Distributed Artificial Intelligence (IWDAI-94). Lake Quinault, WA, July 1994
- 11 Daluonte A, Gaspari M. Modelling Interaction in Agent Systems. University of Bologna. Available at: <http://www.cs.umbc.edu>