

## 支持多 Agent 通信的扩展 BDI 逻辑\*

陈建中<sup>1,2</sup> 刘大有<sup>1,2</sup> 唐海鹰<sup>1,2</sup> 胡明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(吉林大学计算机科学系 长春 130023)

<sup>2</sup>(吉林大学符号计算与知识工程国家教育部开放实验室 长春 130023)

<sup>3</sup>(吉林工学院计算机系 长春 130012)

**摘要** BDI(信念、期望和意图)逻辑是当前 agent 理论研究的热点课题之一,相关研究工作较少涉及对 agent 间通信的描述.文章旨在提出一个能表示和推理多 agent 间基于言语行为理论的通信行为的扩展 BDI 逻辑.该逻辑是一个多类、带量词并具有分枝时序结构的一阶多模态逻辑,除了包含标准 BDI 逻辑的模态和时态算子之外,还引入了一些必要的逻辑算子和构造符,用于刻画 agent 为实现其意图而具有的规划能力,以及对多 agent 通信给出正确的语用解释.文章讨论了逻辑的语法和语义,并对言语行为进行了逻辑分类和解释.

**关键词** BDI agent 逻辑,多 agent 通信,言语行为.

**中图法分类号** TP18

分布式人工智能 DAI(distributed artificial intelligence)主要研究由多个计算 agent 组成的分布式系统中的各种社会行为.按我们的观点<sup>[1]</sup>,DAI 可分为 3 个相关子领域:分布式问题求解 DPS(distributed problem solving)、智能 agent IA(intelligent agents)和多 agent 系统 MAS(multi-agent system),其中 IA 和 MAS 无疑是当前 DAI 研究的热点.一个智能 agent 至少应具有以下性质:一方面,它初始被赋予承担一些任务和求解某些问题的能力,并能决策如何及时完成任务和提交结果;另一方面,一个 agent 具有社会性,它通常与环境其他 agent 共存,并以某种方式相互作用.

许多研究结果表明,一个或一组智能 agent 可以被看做是拥有信念(beliefs)、期望(desires)、规划(plans)和意图(intentions)等精神状态的所谓意识系统(intentional system).这方面的研究工作已有许多,其中著名的当数由澳大利亚的 Rao 和 Georgeff 等人提出的 BDI 逻辑和 BDI agent 结构.90 年代以来,他们在 Bratman<sup>[2]</sup>,Cohen 和 Levesque<sup>[3]</sup>等人的前期工作基础上,给出了一系列相关的研究成果<sup>[4,5]</sup>,成为 agent 理论研究领域最有代表性的基础工作.

一个典型的 BDI agent 通常包含 4 个主要的数据结构:① 信念集,用于表示 agent 的世界模型,其中的信息可能不完全或不正确;② 期望或目标(goals)集,对应于分配给 agent 要执行的任务;③ 意图集,表示 agent 已决定或承诺完成的期望,agent 将持续它对一个意图的承诺,直到它相信该意图已满足,或由于某些原因该意图不再可完成<sup>[3]</sup>;④ 规划库,包括一组预定义规划或方法,表示 agent 为完成各种意图所遵循的过程性知识或程序.总之,它们分别表示了 agent 的陈述性、选择性、决策性和过程性状态.一个称为 agent 解释器的控制模块操作和管理这些数据结构之间的数据和控制流,负责更新信念、形成新期望、从当前活动期望中挑选新意图并选取适当

\* 本文研究得到国家自然科学基金、国家 863 高科技项目基金、国家教育部博士点基金和吉林大学符号计算与知识工程国家教育部开放实验室资金资助.作者陈建中,1968 年生,博士,副教授,主要研究领域为多 Agent 系统,分布式人工智能,数据结构与算法.刘大有,1942 年生,教授,博士生导师,主要研究领域为人工智能与软件,多 Agent 系统,专家系统,知识工程.唐海鹰,1971 年生,在职博士生,讲师,主要研究领域为多 Agent 系统,分布式人工智能.胡明,1963 年生,在职博士生,副教授,主要研究领域为多 Agent 系统,分布式人工智能.

本文通讯联系人:陈建中,长春 130023,吉林大学计算机科学系

本文 1998-05-04 收到原稿,1998-07-09 收到修改稿

规划,执行相应的意图。

在已有的相关研究工作<sup>[4~5]</sup>中,多数是侧重于对信念、期望和意图 3 种状态的形式化描述和讨论三者间的逻辑关系,而对规划和 agent 间通信的语义表示却少有涉及,本文试图从解决这一问题出发,给出一个能有效表示和推理 agent 规划和通信的扩展 BDI 逻辑。

## 1 多 agent 通信和言语行为理论(speech act theory)

DAI 环境中的 agent 通常不可能拥有关于世界的完全信息和知识,通信的基本作用就是为 agent 提供与世界交换必要信息的手段.多 agent 系统中的协同、协作、协商、和全局一致等都通过有效的 agent 间通信来实现。

Werner<sup>[7]</sup>把多 agent 通信分为 5 类:① 无通信;② 信号通信;③ 基于计算的消息传递,如 Actor 并发系统;④ 规划交换,如部分全局规划(PGP);⑤ 基于言语行为的通信.其中基于言语行为的多 agent 通信是当前的研究热点,它在一定程度上模拟了人类的通信行为,而且有坚实的理论和技术基础,另外,许多著名的 agent 通信语言,如知识查询与操作语言(KQML)和知识交换格式(KIF)等都直接或间接地基于言语行为理论。

言语行为理论源于语言学,现已成为人工智能和语言学理论的核心.它主要研究语言的语用理论,其基本公理是把人们的日常话语看作说话人做出的带有某种意图的动作,这些所谓言语动作也像那些物理动作一样能引起世界状态的变化.一个言语行为至少包含 3 类动作:① 以言指事,即说了一句语法上可接受的话语;② 以言行事,即该话语带有某种言外之力,能把说者的意图传达给听者;③ 以言成事,即以言行事的结果是做出一些动作或产生一些效果.通常言语行为即指以言行事的行为.一个言语行为包含两部分:言外之力和行为命题.言外之力可用来区分言语行为的不同种类,而命题说明对状态的改变.Singh<sup>[8]</sup>把言外之力分为如下 6 类:① 断言类;② 指令类;③ 承诺类;④ 许可类;⑤ 禁止类;⑥ 宣告类。

本文给出的形式化逻辑通过引入一个模态算子,基于 agent 的意图和规划库,讨论上述言语行为的形式语义.采用的原则是:① 把言语行为看做是说话者(或消息发送者)在一段时间内做出的动作;② 听者(或消息接收者)根据听说双方的状态对收到的消息给出独立解释;③ 在逻辑中,从说话者角度给出关于每个言语行为的发生条件、可满足条件及以言行事行为的执行对双方精神状态的可能影响等的语用解释。

## 2 基本概念

先给出一些概念的非形式化说明:用  $D_{ag}$ ,  $D_{ac}$  和  $D_{sa}$  分别表示系统中所有 agent 的集合、所有原子动作的集合和所有言语行为的集合.遵循经典 BDI 逻辑<sup>[4]</sup>,扩展 BDI 逻辑  $\mathcal{L}$  基于具有分枝时序结构的可能世界语义模型;令  $T$  是一个时间点(或时刻)集合, $R$  表示一个在  $T$  上成立的二元分枝时序关系,即  $R \subseteq T \times T$ ,则  $R$  和  $T$  在逻辑上构成一棵分枝时序树; $D_{ac}$  中的任一动作和  $D_{sa}$  中的任一言语行为(二者统称为动作)被看作沿  $T$  中的时间点执行,我们定义一个标号函数  $Act$  用于把分枝时序树中的每条弧与一个动作相连;设函数  $Ag$  返回执行每一动作的 agent.在下述定义和描述中, $IN$  表示大于 0 的自然数集合; $\mathcal{P}(s)$  表示一个集合  $s$  的幂集合。

**定义 1.** 设  $T$  是非空时间点集合, $R \subseteq T \times T$  是  $T$  上的一个全序的、向后线性的分枝时序关系,则  $(T, R)$  称为  $\mathcal{L}$  上的一个世界,用  $W$  表示  $T$  上所有世界的集合,若  $w \in W$ ,则  $T_w$  和  $R_w$  分别表示  $w$  中的时间点集合和时序关系;若  $t \in T_w$ ,则  $(w, t)$  称为  $w$  中的一个局势,用  $S_w$  表示  $w$  中所有局势的集合, $S = \bigcup_{w \in W} S_w$  表示  $\mathcal{L}$  中所有局势的集合。

**定义 2.** 若  $w \in W$ ,则  $w$  上的一条路径是一个时间点序列  $(t_1, t_2, \dots, t_k, \dots)$ ,其中  $k \in IN$  且  $(t_k, t_{k+1}) \in R_w$ ,用  $P_w$  表示  $w$  上所有路径的集合;若  $p \in P_w$  且  $k \in IN$ ,则  $p_k$  表示路径  $p$  上第  $k$  个时间点, $p^*$  表示  $p$  上始于  $p_k$  的子路径。

**定义 3.** 一条规划是一个四元组  $\langle plan-goal, plan-premise, plan-body, plan-result \rangle$ ,其中规划目标  $plan-goal$  是一个谓词,表示规划名和该规划的触发参数;规划体  $plan-body$  表示该规划被触发时要执行的程序或动作(序列),由集合  $D_{ac}$  和  $D_{sa}$  的元素(或元素序列)及规划子目标构成,设  $D_{pb}$  表示所有规划体的集合;规划前提  $plan-premise \subseteq S$  表示执行  $pb \in D_{pb}$  必须满足的局势集合;规划结果  $plan-result \subseteq S$  表示在规划前提的一个局势

下执行  $pb$  后可能产生的新局势集合;且有:若一条规划执行过程中的两个局势满足  $(w_1, t_1) \in plan\_premise, (w_2, t_2) \in plan\_result$ , 则我们说  $w_1 = w_2$ , 这保证了规划的执行过程总是发生在世界内, 而非世界间. 一个 agent 的规划库是一个有向无环与或图, 图中的顶点是规划, 每条弧被赋予一个标号函数  $Goal\_to\_plan$ , 用于连接高层规划(规划体中可包含规划子目标)和其可能的若干子规划(与高层规划的子目标对应). 一个与顶点被成功执行, 当且仅当每个子规化被执行; 一个或顶点被成功执行, 当且仅当至少一个子规化被执行.

令  $D_{pl}$  表示一个 agent 规划库中所有规划的集合. 4 个函数  $Pg, Pp, Pb, Pr$  都以一条规划  $pl \in D_{pl}$  为参数, 分别返回相应的  $plan\_goal, plan\_premise, plan\_body, plan\_result$ . 下面给出一条规划的 BNF 语法结构, 其中 ' $\langle a \rangle +$ ' 代表项  $a$  的一次或多次出现, ' $;$ ', ' $\parallel$ ' 和 ' $*$ ' 分别是顺序、并行和迭代型复合动作合成符号.

- $\langle plan \rangle ::= \langle plan\_goal \rangle \langle plan\_premise \rangle \langle plan\_body \rangle \langle plan\_result \rangle$
- $\langle plan\_goal \rangle ::= \mathcal{L}$  中的谓词
- $\langle plan\_premise \rangle ::= \mathcal{P}(S)$  的任一元素
- $\langle plan\_result \rangle ::= \mathcal{P}(S)$  的任一元素
- $\langle plan\_body \rangle ::= \langle AND \langle plan\_exp \rangle \rangle | \langle OR \langle plan\_exp \rangle \rangle +$
- $\langle plan\_exp \rangle ::= D_{ac}$  的任一元素  $| D_{ac}$  的任一元素  $| \langle plan\_goal \rangle | \langle plan\_exp \rangle ; \langle plan\_exp \rangle | \langle plan\_exp \rangle \parallel \langle plan\_exp \rangle | \langle plan\_exp \rangle *$

为表示和说明规划执行的语义, 引入两个谓词:  $perf(pb, p, u, v)$  和  $exec(pe, p, u, v)$  分别表示一个规划体  $pb \in D_{pl}$  和  $pb$  中的一个规划表达式  $pe$  在路径  $p$  上的第  $u$  个和第  $v$  个时间点之间被执行 ( $u, v \in IN$  且  $u \leq v$ ) 的事实.

- $perf(pb, p, u, v)$  iff 若  $pb$  是与结点, 则对  $pb$  中的所有  $pe$ , 作  $exec(pe, p, u, v)$ ;  
否则 ( $pb$  是或结点) 对  $pb$  中至少一个  $pe$ , 作  $exec(pe, p, u, v)$ ;
- $exec(ac, p, u, v)$  iff  $v = u + 1$  且  $Act(p_u, p_v) = ac$ ; 其中  $ac \in D_{ac}$  或  $ac \in D_m$ ;
- $exec(pg, p, u, v)$  iff  $perf(Pb(Goal\_to\_plan(pg)), p, u, v)$ , 其中  $pg$  是一个规划目标;
- $exec(pe_1; pe_2, p, u, v)$  iff  $\exists n \in \{u, \dots, v\}, exec(pe_1, p, u, n)$  且  $exec(pe_2, p, n, v)$ ;
- $exec(pe_1 \parallel pe_2, p, u, v)$  iff  $exec(pe_1, p, u, v)$  且  $exec(pe_2, p, u, v)$ ;
- $exec(pe^*, p, u, v)$  iff  $u = v$  或  $exec(pe; (pe^*), p, u, v)$ .

另设函数  $Agt$  以规划体或规划表达式为参数, 返回能执行该动作序列的所有 agent 集合:

$$agt(ac) \stackrel{def}{=} \{agt(ac)\}; agt(pe) \stackrel{def}{=} \bigcup agt(ac), \text{ 对 } pe \text{ 中所有动作 } ac; agt(pb) \stackrel{def}{=} \bigcup agt(pe), \text{ 对 } pb \text{ 中所有 } pe.$$

为了方便描述通信的语义, 设  $Msg$  表示所有通信消息的集合,  $FC = \{assertive, directive, commissive, permissive, prohibitive, declarative\}$  表示言语行为的各类言外之力的集合; 一条消息  $m \in Msg$  被简单表示为一个二元组  $(fc, pp)$ , 其中  $fc \in FC, pp$  是一个命题;  $D_m$  中的元素用  $sa(i, j, m)$  表示, 其中  $m \in Msg$ , 则  $exec(sa(i, j, m), p, u, v)$  意为在某局势下, agent  $i$  从时刻  $u$  到时刻  $v$  执行了一个对 agent  $j$  说话语(或发送消息)  $m$  的言语行为; 另一谓词  $comm(i, j, m)$  的含义是:  $comm(i, j, m)$  为真, iff 在某局势下  $i$  确实对  $j$  说了  $m$ .

### 3 支持多 agent 通信的扩展 BDI 逻辑

逻辑系统  $\mathcal{L}$  是一个多类、带量词的、基于可能世界语义、具有分枝时序结构的一阶多模态逻辑. 一些逻辑算子的含义可非形式化地解释如下:  $true$  算子表示逻辑真;  $(Bel\ i\ \varphi), (Goal\ i\ \varphi)$  和  $(Int\ i\ \varphi)$  分别表示 agent  $i$  有一个信念(或相信)  $\varphi$ , 一个目标  $\varphi$  和一个意图(或想要)  $\varphi$  的事实, 其中  $\varphi$  是一个逻辑公式, 注意, 我们用目标代替期望, 这 3 个模态算子的语义通过相应的可达关系给出, 信念算子满足标准模态系统公理 KD45, 目标和意图算子则满足公理 KD; 算子 ' $-$ ' 表示一阶等价关系;  $(i \in g)$  表示 agent  $i$  是 agent 组  $g$  的一个成员;  $(HasPlan\ i\ pl)$  表示在当前状态下,  $i$  有一个规划  $pl$ , 即  $pl$  在  $i$  的规划库中; 在分枝时序结构中, 与局势有关、表现出时间点性质的公式称为状态公式, 而与局势的发展进程有关、表现出路径性质的公式称为路径公式; 两个路径公式  $(Perf\ i\ pb)$  意为  $i$  在当前路径中执行一个规划体  $pb$ ,  $(Exec\ i\ ac)$  意为  $i$  在当前路径中执行一个动作  $ac$ ; 路径公式  $(PragInt\ comm(i, j, m))$  用于给出  $i$  在当前路径中作出的一个言语行为的语用解释;  $A$  是全称路径量词,  $A\varphi$  意为路径公式  $\varphi$

在从当前状态开始的所有未来世界(路径)中可满足;两个基本时态联接符  $U$  和  $N$  用于从状态公式或路径公式构造路径公式,公式  $\varphi U \psi$  意为  $\varphi$  可满足直到  $\psi$  可满足,  $N\varphi$  意为  $\varphi$  将在下一状态可满足;其余算子,如  $\neg$ (逻辑非)、 $\vee$ (逻辑或)、 $\forall$ (全称量词)等仍具有其经典语义。

### 3.1 语法

定义4.  $\mathcal{L}$  的字符集由下述符号组成:(1) 算子符号  $true, Bel, Goal, Int, =, \in, A, HasPlan, Perf, Exec, PragInt, U$  和  $N$ ;(2) 逻辑联接符  $\neg$ (与)和  $\vee$ (或),全称量词符号  $\forall$ ;(3) 可数集合  $Pred$  代表所有谓词符号;(4) 可数集合  $Func = Func_{ag} \cup Func_{ac} \cup Func_{sa} \cup Func_{pl} \cup Func_{pb} \cup Func_{gr} \cup Func_s \cup Func_U$ ,代表所有函数符号和返回值分别为 agent、原子动作、言语行为、规划、规划体、agent 组、局势和其他个体的函数符号;(5) 可数集合  $Var$  代表变量符号,  $Var = Var_{ag} \cup Var_{ac} \cup Var_{sa} \cup Var_{pl} \cup Var_{pb} \cup Var_{gr} \cup Var_s \cup Var_U$ ;(6) 标点符号 ‘)’ ‘(’ ‘.’ 和 ‘,’;(7) 复合动作合成符 ‘;’ ‘||’ 和 ‘\*’. 函数  $arity: Pred \cup Func \rightarrow IN$  给出每个谓词和函数符号的元,0元谓词即为命题符号,0元函数即为常量。

定义5.  $\mathcal{L}$  中的项或者是一个变量,或者是一个函数;令  $Term$  表示所有项的集合;一个项的类是下述符号之一:  $ag, ac, sa, pl, pb, gr, S, U$ ;若  $\sigma$  是一个类,则有  $Term_\sigma = Func_\sigma \cup Var_\sigma$  和  $Term = Term_{ag} \cup Term_{ac} \cup Term_{sa} \cup Term_{pl} \cup Term_{pb} \cup Term_{gr} \cup Term_s \cup Term_U$ .

$\mathcal{L}$  的合式公式( $\langle wff \rangle$ )的语法如下(假设所有谓词和函数符号都已具有相应的参数个数)。

$\langle ag-term \rangle ::= Term_{ag}$ 中任一元素	$\langle pl-term \rangle ::= Term_{pl}$ 中任一元素		
$\langle pb-term \rangle ::= Term_{pb}$ 中任一元素	$\langle gr-term \rangle ::= Term_{gr}$ 中任一元素		
$\langle pred-sym \rangle ::= Pred$ 中任一元素	$\langle ac-term \rangle ::= Term_{ac}$ 和 $Term_{sa}$ 中任一元素		
$\langle term \rangle ::= Term$ 中任一元素	$\langle var \rangle ::= Var$ 中任一元素		
$\langle msg \rangle ::= Msg$ 中任一元素			
<hr/>			
$\langle state-fmla \rangle ::= true$	$  \langle pred-sym \rangle (\langle term \rangle, \dots, \langle term \rangle)$	$  (Bel \langle ag-term \rangle \langle state-fmla \rangle)$	$ $
$(Goal \langle ag-term \rangle \langle state-fmla \rangle)$	$  (Int \langle ag-term \rangle \langle state-fmla \rangle)$	$  (\langle term \rangle = \langle term \rangle)$	$ $
$(\langle ag-term \rangle \in \langle gr-term \rangle)$	$  (HasPlan \langle ag-term \rangle \langle pl-term \rangle)$	$  A \langle path-fmla \rangle$	$ $
$\neg \langle state-fmla \rangle$	$  \langle state-fmla \rangle \vee \langle state-fmla \rangle$	$  \forall \langle var \rangle \cdot \langle state-fmla \rangle$	$ $
<hr/>			
$\langle path-fmla \rangle ::= \langle state-fmla \rangle$	$  (Perf \langle ag-term \rangle \langle pb-term \rangle)$	$  (Exec \langle ag-term \rangle \langle ac-term \rangle)$	$ $
$(PragInt\ comm(\langle ag-term \rangle, \langle ag-term \rangle, \langle msg \rangle))$	$  \langle path-fmla \rangle U \langle path-fmla \rangle$	$  N \langle path-fmla \rangle$	$ $
$\neg \langle path-fmla \rangle$	$  \langle path-fmla \rangle \vee \langle path-fmla \rangle$	$  \forall \langle var \rangle \cdot \langle path-fmla \rangle$	$ $
<hr/>			
$\langle wff \rangle ::= \langle state-fmla \rangle$			

### 3.2 语义

定义6.  $\mathcal{L}$  的论域  $D$  是逻辑系统中所有语义对象构成的集合,  $D = D_{ag} \cup D_{ac} \cup D_{sa} \cup D_{pl} \cup D_{pb} \cup D_{gr} \cup D_s \cup D_U$ ,其中,非空集合  $D_{gr}$  是建立在  $D_{ag}$  之上的所有 agent 组的集合,  $D_s$  是所有可能局势的集合,  $D_U$  是所有其他个体对象集合,其余集合的含义同前所述,令  $D^n$  表示  $D$  上所有  $n$  元组的集合( $n \in IN$ ).

为把语法符号同语义对象联系在一起,定义下述解释函数。

定义7. 谓词解释函数  $P: Pred \times W \times T \rightarrow \rho(\bigcup_{n \in IN} D^n)$ ,因此,若  $Q \in Pred, n \in IN, w \in W, t \in T_w$ ,且  $arity(Q) = n$ ,则  $P(Q, w, t) \subseteq D^n$ ,函数  $P$  应保持被解释谓词的元数不变;函数解释函数  $F: Fun \rightarrow (\bigcup_{n \in IN} D^n \rightarrow D)$ ,因此,若  $f \in Fun, n \in IN$ ,且  $arity(f) = n$ ,则  $F(f) \subseteq D^n$ ,函数  $F$  应保持被解释函数的元数和类不变;变量指派  $V: Var \rightarrow D$ ,因此,若  $v \in Var_\sigma$ ,则  $V(v) \in D_\sigma$ , $V$  应保持被指派变量的类不变。

一个特殊的函数  $\|\tau\|_{F,V}$  把一个项  $\tau$  的语义指称为  $F$  或  $V$ 。

定义8. 令  $\tau \in Term$ ,如果  $\tau \in Fun$ ,则  $\|\tau\|_{F,V}$  是  $F(\tau)$ ,否则是  $V(\tau)$ ,在无二义性的情况下,角标  $F, V$  通常省略。

定义9.  $\mathcal{L}$  的模型  $M$  是一个元组结构  $\langle T, R, W, D, Act, Agt, Msg, PL, MI, BR, GR, IR, F, P \rangle$ ,其中  $T, R,$

$W, D, Act, Agt, Msg, F, P$  的定义同前; 函数  $PL: D_{ag} \times W \times T \rightarrow \rho(D_{pl})$  返回每个 agent 在每个局势下的规划库; 函数  $ML: D_{ag} \times M_{ag} \times W \times T \rightarrow \rho(W \times T)$  用于每个 agent 根据其当前状态解释接收到的每条消息, 解释的结果是旧状态转换为新状态;  $BR: D_{ag} \rightarrow \rho(W \times T \times W)$  是每个 agent 的信念可达关系, 满足序列性、传递性和欧几里德性;  $GR: D_{ag} \rightarrow \rho(W \times T \times W)$  和  $IR: D_{ag} \rightarrow \rho(W \times T \times W)$  分别是每个 agent 的目标可达关系和意图可达关系, 满足序列性。

$\mathcal{L}$  的语义规则如下 ( $*: \vdash$  是映射函数,  $\dagger$  是映射复写算子), 其定义由解释结构和公式组成, 通过可满足关系符号 “ $\models$ ” 联接. 状态公式的解释结构形如  $\langle M, V, w, t \rangle$ , 其中  $M$  是一个模型,  $V$  是变量指派,  $w \in W, t \in T_w$ ; 路径公式的解释结构形如  $\langle M, V, w, p \rangle$ , 其中  $p$  是  $w$  上的一条路径.

状态公式语义

$\langle M, V, w, t \rangle \models true$	
$\langle M, V, w, t \rangle \models (Bel\ i\ \varphi)$	iff $\forall w' \in W$ , 若 $(w, t, w') \in BR(\ i\ )$ , 则 $\langle M, V, w', t \rangle \models \varphi$
$\langle M, V, w, t \rangle \models (Goal\ i\ \varphi)$	iff $\forall w' \in W$ , 若 $(w, t, w') \in GR(\ i\ )$ , 则 $\langle M, V, w', t \rangle \models \varphi$
$\langle M, V, w, t \rangle \models (Int\ i\ \varphi)$	iff $\forall w' \in W$ , 若 $(w, t, w') \in IR(\ i\ )$ , 则 $\langle M, V, w', t \rangle \models \varphi$
$\langle M, V, w, t \rangle \models \forall x \cdot \varphi$	iff $\langle M, V \dagger \{x \mapsto d\}, w, t \rangle \models \varphi$ , 对所有 $d \in D, x$ 和 $d$ 应同类 *
$\langle M, V, w, t \rangle \models A\varphi$	iff $\forall p \in P_w$ , 若 $p_t = t$ , 则 $\langle M, V, w, t \rangle \models \varphi$
$\langle M, V, w, t \rangle \models \varphi \vee \psi$	iff $\langle M, V, w, t \rangle \models \varphi$ 或 $\langle M, V, w, t \rangle \models \psi$
$\langle M, V, w, t \rangle \models Q(\tau_1, \dots, \tau_n)$	iff $\langle \ \tau_1\ , \dots, \ \tau_n\  \rangle \in P(Q, w, t)$
$\langle M, V, w, t \rangle \models \neg \varphi$	iff $\langle M, V, w, t \rangle \not\models \varphi$
$\langle M, V, w, t \rangle \models (i \in gr)$	iff $\ i\  \in \ gr\ $
$\langle M, V, w, t \rangle \models (\tau = \tau')$	iff $\ \tau\  = \ \tau'\ $
$\langle M, V, w, t \rangle \models (HasPlan\ i\ pl)$	iff $\ pl\  \in PL(\ i\ , w, t)$

路径公式语义

$\langle M, V, w, p \rangle \models \varphi$	iff $\langle M, V, w, p_i \rangle \models \varphi$ , 其中 $\varphi$ 是一个状态公式
$\langle M, V, w, p \rangle \models (Perf\ i\ pb)$	iff $\exists n \in IN$ , 使 $perf(pb, p, 1, n)$ 且 $\ i\  \in agt(pb)$
$\langle M, V, w, p \rangle \models (Exec\ i\ ac)$	iff $\exists n \in IN$ , 使 $exec(ac, p, 1, n)$ 且 $\ i\  \in agt(ac)$
$\langle M, V, w, p \rangle \models \forall x \cdot \varphi$	iff $\langle M, V \dagger \{x \mapsto d\}, w, p \rangle \models \varphi$ , 对所有 $d \in D, x$ 和 $d$ 应同类 *
$\langle M, V, w, p \rangle \models (PragInt\ comm(i, j, m))$	iff $\exists n, k \in IN$ , 若 $n \leq k$ 则 $exec(sa(i, j, m), p, n, k)$ 且若 $m = \langle fc, pp \rangle$ 则由 $fc$ 决定如何 $\langle M, V, w, p^k \rangle \models pp$
$\langle M, V, w, p \rangle \models \varphi \cup \psi$	iff $\exists n \in IN$ , 使 $\langle M, V, w, p^n \rangle \models \varphi$ 且 $\forall k \in IN$ , 若 $0 \leq k < n$ , 则 $\langle M, V, w, p^k \rangle \not\models \varphi$
$\langle M, V, w, p \rangle \models \neg \varphi$	iff $\langle M, V, w, p \rangle \not\models \varphi$
$\langle M, V, w, p \rangle \models \varphi \vee \psi$	iff $\langle M, V, w, p \rangle \models \varphi$ 或 $\langle M, V, w, p \rangle \models \psi$
$\langle M, V, w, p \rangle \models N\varphi$	iff $\langle M, V, w, p^2 \rangle \models \varphi$

3.3 派生算子和连接符

从上述基本算子和连接符派生出其他有用的算子和连接符可以增强逻辑公式的易读性. 从  $\neg, \vee$  和  $\forall$  可派生出  $\wedge$  (逻辑与),  $\Rightarrow$  (逻辑结果),  $\Leftrightarrow$  (逻辑等价) 和  $\exists$  (存在量词); 由  $A$  可定义存在路径量词  $E$ , 即  $E\varphi = \neg A\neg\varphi$ , 意为状态公式  $\varphi$  在某条路径上可满足; 两个单目时态算子  $\diamond$  和  $\square$  分别表示 ‘将要’ 和 ‘永远’:  $\diamond\varphi = true \cup \varphi$ ,  $\square\varphi = \neg \diamond \neg \varphi$ , 路径公式,  $\diamond\varphi$  或  $\square\varphi$  在未来某路径上可满足, 若  $\varphi$  在该路径上的某个 (或全部) 时刻可满足. 派生算子  $Achv$  表示如下事实: agent  $i$  在执行动作  $ac$  的同时达到目标  $\varphi$ .  $\langle M, V, w, p \rangle \models (Achv\ i\ ac\ \varphi)$  iff  $(\exists n, k \in IN, n \leq k \cdot (Exec\ i\ ac))$  且  $(\exists u \in IN, n < u \leq k \cdot \langle M, V, w, p^u \rangle \models \varphi)$ .

3.4 言语行为的语用解释

下面详细讨论算子  $PragInt$  的语义, 即言语行为的语用解释. 先作如下说明: ① 根据通信双方的认知状态, 给出每类消息的可满足条件, 即言语行为如何能被成功执行的条件; ② 谓词  $comm(i, j, m)$  的引入使语用解释算子作用于公式, 而非直接作用于动作; ③ 言语行为的言外之力不同, 其语用解释也不同. 假设在路径  $p$  上从时刻  $n$  到时刻  $k$ , 一个言语行为  $sa(i, j, \langle fc, pp \rangle)$  发生, 即说话者 (或发信 agent)  $i$  对话者 (或收信 agent)  $j$  说话 (或发

送消息)  $\langle fc, pp \rangle$ , 其中  $fc$  表示该言语行为的言外之力,  $pp$  是行为命题, 下面由  $i$  解释该言语行为的语义。

•  $\langle M, V, w, p \rangle \models (\text{PragInt comm}(i, j, \langle \text{assertive}, pp \rangle))$  iff  $\exists n, k \in IN$  • 若  $n \leq k$  则  $\text{exec}(sa(i, j, \langle \text{assertive}, pp \rangle), p, n, k)$  且  $\langle M, V, w, p^k \rangle \models pp$ . 一个断言类言语行为, 例如“门开了.”, 可满足, 若其行为命题  $pp$  在话说完后开始为真。

•  $\langle M, V, w, p \rangle \models (\text{PragInt comm}(i, j, \langle \text{directive}, pp \rangle))$  iff  $\exists n, k \in IN$  • 若  $n \leq k$  则  $\text{exec}(sa(i, j, \langle \text{directive}, pp \rangle), p, n, k)$  且  $\langle M, V, w, p^k \rangle \models (\text{Bel } i((\text{Int } j pp) \wedge (\text{HasPlan } j \text{Goal-to-plan}(pp))) \cup pp)$ . 一个指令类言语行为, 例如“开门!”, 可满足, 若  $i$  相信: (1) 沿路径  $p$  从时刻  $k$  开始,  $j$  想要(或有意图)并知道怎样(或有规划)达到  $pp$ (或使  $pp$  成立); 且(2)  $pp$  在未来某时刻将为真。

•  $\langle M, V, w, p \rangle \models (\text{PragInt comm}(i, j, \langle \text{commissive}, pp \rangle))$  iff  $\exists n, k \in IN$  • 若  $n \leq k$  则  $\text{exec}(sa(i, j, \langle \text{commissive}, pp \rangle), p, n, k)$  且  $\langle M, V, w, p^k \rangle \models (((\text{Int } i pp) \wedge (\text{HasPlan } i \text{Goal-to-plan}(pp))) \cup pp)$ . 一个承诺类言语行为, 例如“我要开门.”, 可满足, 若(1) 沿路径  $p$  从时刻  $k$  开始,  $i$  想要并知道怎样达到  $pp$ ; 且(2)  $pp$  在未来某时刻将为真。

•  $\langle M, V, w, p \rangle \models (\text{PragInt comm}(i, j, \langle \text{permissive}, pp \rangle))$  iff  $\exists n, k \in IN$  • 若  $n \leq k$  则  $\text{exec}(sa(i, j, \langle \text{permissive}, pp \rangle), p, n, k)$  且  $(\forall ac \cdot (\text{Bel } i((\text{Achv } j \text{ac true}) \Rightarrow \text{E}(\text{Achv } j \text{ac} \neg(\text{HasPlan } j \text{Goal-to-plan}(\text{A} \square \neg pp))))))$ . 一个许可类言语行为, 例如“你可以开门.”, 在一条路径上可满足, 若该言语行为在该路径上将来某时刻有益于  $j$ , 即  $j$  将被许可做一些以前不能做的动作  $ac$ , 或者说该言语行为的执行将导致一个状态, 在该状态下,  $j$  不能避免动作  $ac$  的执行条件的发生。

•  $\langle M, V, w, p \rangle \models (\text{PragInt comm}(i, j, \langle \text{prohibitive}, pp \rangle))$  iff  $\exists n, k \in IN$  • 若  $n \leq k$  则  $\text{exec}(sa(i, j, \langle \text{prohibitive}, pp \rangle), p, n, k)$  且  $(\forall ac \cdot (\text{Bel } i((\text{Achv } j \text{ac true}) \Rightarrow \text{A}(\text{Achv } j \text{ac} (\text{HasPlan } j \text{Goal-to-plan}(\text{A} \square \neg pp))))))$ . 一个禁止类言语行为, 例如“你不可以开门.”, 可满足, 若  $i$  相信  $j$  知道怎样做某些动作  $ac$  以达到  $(\text{A} \square \neg pp)$ , 即  $j$  应该有避免达到  $pp$  的规划, 并且  $pp$  在给定路径上不会成立。

•  $\langle M, V, w, p \rangle \models (\text{PragInt comm}(i, j, \langle \text{declarative}, pp \rangle))$  iff  $\exists n, k \in IN$  • 若  $n \leq k$  则  $\text{exec}(sa(i, j, \langle \text{declarative}, pp \rangle), p, n, k)$  且  $\langle M, V, w, p^k \rangle \models pp$  且  $(\forall u \in IN, \text{若 } n \leq u < k \text{ 则 } \langle M, V, w, p^u \rangle \not\models pp)$  且  $\langle M, V, w, p \rangle \models (((\text{Int } i pp) \wedge (\text{HasPlan } i \text{Goal-to-plan}(pp))) \cup pp)$ . 一个宣告类言语行为, 例如“我宣布游戏开始.”, 可满足, 若(1)  $pp$  在未来某时刻  $k$  将首次为真; 且(2) 沿路径  $p$  从时刻  $n$  开始, 在说话过程中,  $i$  想要并知道怎样使  $pp$  成立。

$j$  将根据其当前状态, 用函数  $ML$  解释收到的每条消息, 从而更新自己的状态, 然后, 决定执行或拒绝消息中包含的或隐含的动作。限于篇幅, 关于  $j$  对接收到的言语行为的讨论从略。

## 4 结 论

目前, 有关智能 agent 和多 agent 系统建造的方法和技术越来越受到学术界和企业界关注, 对建造这类系统的理论基础的需要也日渐增多。本文的工作即以此为背景, 并参考了相关的研究成果<sup>[4-6,8,9]</sup>, 主要工作包括: ① 给出了一个扩展的 BDI agent 形式化逻辑, 试图支持多 agent 通信行为的描述和推理; ② 在逻辑中包含了 agent 规划和规划库结构的描述和讨论; ③ 通过引入一系列逻辑算子和构造符, 从消息发送方角度, 讨论了基于言语行为理论的 agent 间通信的语用解释。与相关工作比较, 本文是对经典 BDI 逻辑和文献[8]工作的扩展。KQML 从通信语言实现角度对言语行为作了更细致的分类和应用, 但并未讨论其逻辑语用解释。而文献[9]则以 agent 协作代理任务求解和具体系统为背景, 讨论了基于言语行为理论的 agent 通信过程。本文的工作与它们相比, 抽象层次更高, 更具有一般性。

本文的研究结果还很初步, 对基于言语行为的 agent 间通信的讨论尚不够全面和成熟。进一步的研究工作有: 对逻辑系统  $\mathcal{L}$  进行改进和扩展, 将言语行为与其前提条件有机结合, 统筹考虑通信双方对消息的语用解释和意识状态的改变; 以该逻辑为理论基础, 研究面向 agent 技术的其他一些课题, 如 agent 结构, 多 agent 协作、协同和协商, 面向 agent 程序设计等。

## 参考文献

- 1 Chen Jian-zhong, Liu Da-you, Tang Hai-ying. A template architecture for modeling intelligent agents. In: Siriruchatapong P, Lin Zong-kai eds. Proceedings of the International Workshop on CSCW in Design. Beijing: International Academic Publishers, 1997. 196~201
- 2 Bratman M E. Intentions, Plans, and Practical Reason. Massachusetts: Harvard University Press, 1987
- 3 Cohen P R, Levesque H J. Intention is choice with commitment. Artificial Intelligence, 1990,42(3):213~261
- 4 Rao A S, Georgeff M P. Modeling rational agents within a BDI-architecture. In: Fikes R, Sandewall E eds. Proceedings of the 2nd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR & R-91). San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 1991. 473~484
- 5 Rao A S, Georgeff M P, Sonenberg E A. Social plans: a preliminary report. In: Werner E, Demazeau Y eds. Decentralized AI 3—Proceedings of the 3rd European Workshop on Modeling Autonomous Agents in a Multi-agent World (MAAMAW-91). Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992. 57~76
- 6 Wooldridge M, Jennings N R. Formalizing the cooperative problem solving process. In: Klein M ed. Proceedings of the 13th International Workshop on Distributed Artificial Intelligence (IWDAI-94). Seattle, WA: AAAI Press, 1994. 403~417
- 7 Werner E. Cooperating agents: a unified theory of communication and social structure. In: Gasser L, Huhns M N eds. Distributed Artificial Intelligence, Vol 1. Los Altos, CA/Pitman: Morgan Kaufmann Publishers, 1989. 3~36
- 8 Singh M P. Multiagent Systems: A Theoretical Framework for Intentions, Know-how, and Communication (LNAI Volume 799). Berlin: Springer-Verlag, 1994
- 9 Haddadi A. Reasoning about cooperation in agent systems: a pragmatic theory [Ph.D. Thesis]. University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST), 1995

## An Extended BDI Logic for Modeling Multi-agent Communication

CHEN Jian-zhong<sup>1,2</sup> LIU Da-you<sup>1,2</sup> TANG Hai-ying<sup>1,2</sup> HU Ming<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(Department of Computer Science Jilin University Changchun 130023)

<sup>2</sup>(Open Symbol Computation and Knowledge Engineering Laboratory of State Education Department  
Jilin University Changchun 130023)

<sup>3</sup>(Department of Computer Science Jilin Institute of Technology Changchun 130012)

**Abstract** Although BDI approach is currently a subject of much ongoing research, less relative works about modeling communication have been involved. The aim of this paper is to extend classical BDI logic for representing and reasoning about speech act interactions between multi agents. A many-sorted, quantified, first-order, multi-modal logic with branching time structure is presented, including standard BDI modal and temporal operators like belief, goal, intention, etc. In addition, some operators and constructs are introduced for characterizing agents' "know-how" or having plans about how to achieve their intentions and for interpreting the pragmatic meanings of inter-agent communication. While discussing the syntax and semantics of the logic, some kinds of illocutionary speech acts are logically classified and interpreted.

**Key words** BDI agent logic, multi-agent communication, speech act.