

智能主体的等级 BDI(信念、愿望和意图)模型

张晓君^{1,2} 林颖³ 周昌乐^{2,4}

(四川师范大学逻辑与信息研究所 成都 610066)¹

(福建省仿脑智能系统重点实验室(厦门大学) 厦门 361005)²

(宁德师范学院 宁德 352100)³ (厦门大学智能科学与技术系 厦门 361005)⁴

摘要 BDI(信念、愿望和意图)模型是影响最为广泛的主体技术之一。在把无穷值的 Łukasiewicz 逻辑和命题动态逻辑进行融合后对等级 BDI 主体模型进行形式化的基础上,提出了 $GBDI_{PDL+LL}$ 逻辑。为了通过概率、必然性和可能性对不确定性行为进行表示和推理,把相应的公理添加到 Łukasiewicz 逻辑中。文中的 $GBDI_{PDL+LL}$ 主体模型使用多背景系统,清晰地表示了信念、愿望和意图的不确定性。 $GBDI_{PDL+LL}$ 主体行为则通过添加具体条件的每种背景的不同测度来决定。对信念、愿望和意图的模型进行了公理化,并说明了它们对主体行为的影响,该模型可以很轻易地向包括其他心理状态的主体进行推广。在给出了 $GBDI_{PDL+LL}$ 模型语言、语义和 $GBDI_{PDL+LL}$ 逻辑的公理和演绎规则后,证明了此逻辑系统的完全性和可靠性。之后,在对复合行动进行形式刻画的基础上,描述了 $GBDI_{PDL+LL}$ 模型的不同背景之间的关系。文章立足于不确定性的表示和推理,志在为分布式人工智能提供形式支持。

关键词 等级 BDI(信念、愿望和意图)主体,不确定性推理,背景,行动,模型

中图法分类号 TP18,TP302 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.7.005

Graded Belief-Desire-Intention (BDI) Models for Agent Architectures

ZHANG Xiao-jun^{1,2} LIN Ying³ ZHOU Chang-le^{2,4}

(Institute of Logic and Information, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China)¹

(Fujian Provincial Key Laboratory of Brain-Like Intelligent Systems, Xiamen University, Xiamen 361005, China)²

(Ningde Normal University, Ningde 352100, China)³

(Department of Cognitive Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)⁴

Abstract The Belief-Desire-Intention (BDI) model is one of the most influential theories with respect to agent technology. On the basis of blending the infinite-valued Łukasiewicz logic and propositional dynamic logic to formalize this model, the authors proposed a $GBDI_{PDL+LL}$ logic in this paper. In order to represent the uncertainty behavior as a probability, necessity and possibility, the corresponding axioms were added to the Łukasiewicz logic. The $GBDI_{PDL+LL}$ agent model in this paper explicitly represents the uncertainty of beliefs, desires and intentions by using multi-context systems, and is general enough to specify different types of agents. The $GBDI_{PDL+LL}$ agent's behavior is determined by different measures of each context which is added by concrete conditions. This paper is to look for a possible axiomatic modeling of beliefs, desires and intentions, and to show how they influence the agent's behavior. This model can also easily be extended to the people who have other mental attitudes. After presenting the language and semantics for this model, we proposed axioms and rules for the $GBDI_{PDL+LL}$ logic and proved soundness and completeness. On the basis of dealing with composite action, we illustrated the relationship between/among contexts for the model. It is hoped that the present study will make contributions to uncertain representation and reasoning as well as providing a formal support for distributed artificial intelligence.

Keywords Graded belief-desire-intention (BDI) agents, Uncertain reasoning, Contexts, Actions, Models

1 引言

主体(Agent,也翻译为真体、智能主体)强调理性作用,可

以作为描述机器智能、动物智能和人类智能的统一模型。主体是一种通过传感器感知其环境,并通过执行器作用于该环境的实体,可以定义为一种从感知序列到实体动作的映射^[1]。

到稿日期:2015-04-13 返修日期:2015-07-31 本文受教育部人文社会科学研究规划基金项目(13YJA72040001),国家自然科学基金项目(61273338/F030603)资助。

张晓君(1970—),女,博士,副教授,主要研究方向为 Agent 理论与技术、不确定性推理、自然语言逻辑等,E-mail: zhangxj566@163.com;林颖(1963—),女,教授,主要研究方向为现代逻辑;周昌乐(1959—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为仿脑智能系统、自然语言信息处理、Agent理论与技术等。

主体和多主体系统的研究是分布式人工智能研究的重点和热点,它在现实环境中的自主移动机器人、移动计算、网络信息处理、电子商务、分布式过程智能控制以及面向主体的软件工程等诸多领域有着广泛的应用。近年来,一些学者提出的理论和结构为多主体系统提供了形式支持。其中,影响最为深远的形式系统是 Rao 等^[2,3]建立的 BDI(Belief-Desire-Intension)主体模型。BDI 主体是指其行为受到其信念、愿望和意图的支配的主体。BDI 主体模型能够帮助设计者对系统所期望的行为进行决策和推理。着重研究信念、愿望和意图与行为决策和推理的关系及其形式化描述,试图建立主体的 BDI 模型,已成为主体理论模型研究的主要方向^[4]。近年来,国外关于 BDI 主体模型的研究成果颇为丰富^[5];我国学者也从不同视角对 BDI 主体进行了研究^[6-9]。

BDI 逻辑系统易于实现,故备受计算机科学、人工智能、系统工程等相关领域专家的青睐^[10]。BDI 主体模型已经在这些领域得到了切实而广泛的应用。例如:基于 BDI 的主体模型已经在机场空中交通管制系统^[11]、计算机生成虚拟兵力等军事仿真系统^[7]、多主体系统的机器学习^[12]、旅游推荐系统^[13]、火星机器人岩石样本的选择^[14]、铁路货运装车日计划审批^[6]、财富管理系统^[15]等多个领域获得了应用。目前,计算机学界已经使用 Java^[16]、Jason^[17,20]、JaCa^[17]等程序设计语言对 BDI 主体模型进行了计算机实现。

BDI 模型的研究主要有 3 种方法:1)以分支时态逻辑为基础的方法^[2];2)以线性时态逻辑为基础的方法^[18];3)以命题动态逻辑为基础的方法^[19]。BDI 模型的扩展研究有:1)情感 BDI 模型^[20];2)等级(graded)BDI 模型^[21]。至今提出的大多数 BDI 主体结构只能够处理二值信息,但在现实世界中,有必要对信息进行更加细致的量化,即需要对信念、愿望和意图的强烈程度进行区分和处理,这有助于提高主体的可适应性和自主性^[22,23]。等级 BDI 模型通过对主体的信念、愿望和意图的强烈程度进行区分和表示,能够对主体的不确定性行为进行推理。目前对等级 BDI 模型研究的最新成果主要有 Casali 等人的工作^[24]。笔者的研究主要是以 Casali 等^[21]的等级 BDI 模型为基础,属于首次对 BDI 模型的第一种和第三种研究方法的融合研究。

Casali 等^[21]的等级 BDI 模型以 Parsons 等^[25]的多背景(multi-context)的 BDI 模型为基础,并在不同的逻辑框架中分别给出了 B, D 和 I 的语言、语义、公理和推理规则,显得有些杂乱无章。笔者对他们的工作加以了改进和拓展:借鉴其多背景思路,但把 B, D 和 I 这 3 个模态词所表示的不同概念建立在一个统一的逻辑框架中;而且笔者的模型是建立在无穷值的卢卡斯维茨逻辑(Lukasiewicz Logic, LL)和命题动态逻辑(Propositional Dynamic Logic, PDL)这两个能够对行为的不确定性进行更为精细描述的逻辑之上,从而使得等级 BDI 主体的不确定性行为得到比 Casali 等和 Parsons 等人的工作更为清晰一致的形式刻画。为了避免混淆,把本文提出的等级 BDI 记为 $GBDI_{PDL+LL}$ 。在本文中,信念度(belief degree)表示主体认为一个公式为真的程度;愿望度允许主体为偏好区分出不同的层次;意图度给出偏好的测度(measure)。在这 3 个心理状态的相互作用和表示的基础上,就可以对主体的不同行为进行建模。

2 $GBDI_{PDL+LL}$ 主体模型的非形式描述

不确定性推理可以通过选择合适的多值逻辑,并定义适当的模型理论来进行处理。我们选择 Hajek 等^[26,27]发展起来的多值模态的方法对信念、愿望和意图的不同强烈程度进行表示和推理。其基本思路如下:信念度是概率的模型,一个模态公式 $B\varphi$ 被解释为“ φ 是可能的”,这样 $B\varphi$ 也是一个模糊公式,其真值隶属度依赖于 φ 的概率,而且被选中的不确定性模型能够表示信念度。对愿望度和意图度的解释和处理类似于信念度。意图度是对为了达到目标所采取的行动所涉及到的利益的测度。

$GBDI_{PDL+LL}$ 逻辑的基础之一是无穷值的卢卡斯维茨逻辑,其真值的取值范围是介于 0 到 1 之间的所有实数,真值函数是: $\neg x = 1 - x, x \rightarrow y = \min(1, 1 - x + y)$ 。这就使得我们可以定义一个能够对必然性和可能性的程度进行推理的逻辑,因而能够对概率进行处理。 $GBDI_{PDL+LL}$ 逻辑的基础之二是命题动态逻辑,它是动态逻辑的基础系统,主要处理关于主体的行动(更确切地说是程序,因为一个程序的执行和调用就是一个行动)和行动选择的推理。命题动态逻辑把程序的输入-输出关系看作是克里普克语义学中的可及关系。

Casali 等^[21]使用 BC, DC, IC 来分别表示信念背景、愿望背景、意图背景这 3 个心理背景,并使用 PC, CC 来分别表示计划背景、交流背景,然后把主体定义为 $(\{BC, DC, IC, PC, CC\}, \Delta_r)$ 这样一个相互联系的单元组。信念背景是主体关于环境的信念模型,与环境与实际达到信念所付出的代价无关。愿望背景是主体偏好的模型。愿望是意图的先决条件。意图依赖于主体关于世界的知识,这些知识将允许或者不允许主体制定出把当前世界转变成所期望的世界的计划。每个计划将允许主体从其当前世界进入另一个世界,在另一世界中,给定的公式应得到满足,这一计划所建立的愿望也应得以实现,即当前的世界必须满足采取行动的前提条件。交流背景是主体与外界联系的窗口,等级主体与其他主体藉此从其所生活的多主体社会中接受和传达信息。

3 $GBDI_{PDL+LL}$ 逻辑的语言

为了能够对信念、愿望和意图的不确定性进行推理,需要在卢卡斯维茨逻辑和命题动态逻辑的基础上为 $GBDI_{PDL+LL}$ 主体定义相应的语言。经典命题语言 L 是定义在命题变元的可数集和联结词“否定 \neg ”和“蕴涵 \rightarrow ”之上的,笔者使用作为 BDI 主体集合的一部分的行动对这一语言 L 进行扩展^[8]。

现在为 $GBDI_{PDL+LL}$ 主体定义一个语言 L_{BDI} 。方法是:向经典命题语言 L 中添加形式为 $[\alpha]$ 的行动模态词(其中 α 是一个行动)和 3 个模糊模态算子 B, D 和 I 。 $B\varphi$ 的意思是“ φ 是可以相信的”; $D\varphi$ 的意思是“ φ 是所期盼的”,其真值度表示当 φ 为真时,主体的满意程度。“ $I\varphi$ 的程度是 δ ”的意思是“ φ 是所期望的”,其真值隶属度是 δ 。

语言 L_{BDI} 有两种类型的表达式:命题或公式 φ, ψ, \dots , 以及行动(或程序) α, β, \dots , 每种表达式都有可数个原子符号。所有原子命题的集合记作 Φ_0 , 所有命题的集合记作 Φ 。所有原子行动的集合记作 Π_0 , 所有行动(包括原子行动和作为复合行动的计划)的集合记作 Π 。行动和命题可以通过使用经典算子“否定 \neg ”和“蕴涵 \rightarrow ”、“行动复合算子;”、“不确定性选

择算子 \cup ”、“迭代算子 $*$ ”、“必然算子 $[\]$ ”和“测试算子 $?$ ”，由其相应的原子行动和原子命题通过归纳的方式得到。即计划的集合 Π 和 L_{BDI} 公式可以通过如下的方式得到。

- (1) $\Phi_0 \subseteq \Phi$.
- (2) $\Pi_0 \subseteq \Pi$.
- (3) 如果 $\varphi, \psi \in \Phi$, 那么 $\varphi \rightarrow \psi \in \Phi$ 且 $\neg\varphi \in \Phi$.
- (4) 如果 $\alpha, \beta \in \Pi$, 那么 $\alpha; \beta, \alpha \cup \beta, \alpha^* \in \Pi$.
- (5) 如果 $\alpha \in \Pi$ 且 $\varphi \in \Phi$, 那么 $[\alpha]\varphi \in \Phi$.
- (6) 如果 $\varphi \in \Phi$, 那么 $\varphi? \in \Pi$.

在(5)中, $[\alpha]\varphi$ 的直观意思是,“在当前状态下每次执行行动 α 后,主体都进入承载信息 φ 的状态”。

为了给 BC 定义一个模态背景语言,需要使用无穷值的卢卡斯维茨逻辑,由初始模态公式和真值常元 r_c (其中每个有理数 $r \in [0, 1]$)来构造 B -模态:

- (7) 如果 $\varphi \in L_{BDI}$, 那么 $B\varphi \in BC$.
- (8) 如果 $r \in Q \cap [0, 1]$, 那么 $r_c \in BC$ (其中 Q 为有理数的集合)。
- (9) 如果 $B\varphi, B\psi \in BC$, 那么 $B\varphi \rightarrow_L B\psi \in BC$ 且 $B\varphi \& B\psi \in BC$.

在(9)中, \rightarrow_L 和 $\&$ 对应于卢卡斯维茨逻辑中的蕴涵和合取。公式 $B\varphi \rightarrow_L B\psi$ 真值为1,当且仅当 $B\varphi$ 的真值大于或等于 $B\psi$ 的真值。类型为 $r_c \rightarrow_L B\varphi$ 的模态公式的意思是 φ 的概率至少为 r 。为了简便起见,类型为 $r_c \rightarrow_L B\varphi$ 的公式记作 $(B\varphi, r_c)$ 。

现在为 DC 定义一个模态背景语言。用一个新的联结词 Δ (即著名的Baaz联结词)对卢卡斯维茨逻辑进行扩展后,对愿望的强烈程度进行形式化。对于任意的模态公式 Φ ,如果 Φ 的值小于1,那么 $\Delta\Phi$ 的值为0;否则,如果 Φ 的值为1,那么 $\Delta\Phi$ 的值也为1。这样 $\Delta\Phi$ 就变成了一个二值的布尔公式。类型为 $r_c \rightarrow_L D\varphi$ 的公式记作 $(D\varphi, r_c)$ 。

- (10) 如果 $\varphi \in L_{BDI}$, 那么 $D\varphi \in DC$.
- (11) 如果 $r \in Q \cap [0, 1]$, 那么 $r_c \in DC$.
- (12) 如果 $D\varphi, D\psi \in DC$, 那么 $D\varphi \rightarrow_L D\psi \in DC$ 且 $D\varphi \& D\psi \in DC$.

在这个背景下,定性表达式 $D\psi \rightarrow_L D\varphi$ 表示 φ 至少与 ψ 一样被偏好。而表达式 $(D\varphi, 1)$ 的意思是:主体的最大偏好是 φ ,并且如果 φ 为真,那么主体就得到完全满足。

IC 的模态背景语言可以类似定义。达到 φ 的意图可以理解为是找到一个可行的计划 α 的结果,此计划将允许到达 φ 在其中成立的世界状态。

4 GBDI_{PDL+LL}逻辑的语义

与通常的模态逻辑一样,笔者需要使用克里普克结构为 $GBDI_{PDL+LL}$ 主体的背景语言定义一个语义。为了表示由于行动而引起的世界之间的转换,需要在可能世界上添加一个能够表示由于每个原子行动所引起的世界序对的转换的函数结构 τ 、一个概率测度 ρ 、一个偏好分布 θ 和一个可能性分布 μ_w 。这样笔者就可以为 $GBDI_{PDL+LL}$ 主体定义一个6元组的克里普克结构 $K = \langle W, \nu, \rho, \tau, \theta, \{\mu_w\}_{w \in W} \rangle$ ^[8],其中:

- (13) W 是一个非空的可能世界的集合。
- (14) $\nu: \Phi \times W \rightarrow \{0, 1\}$ 为每个命题变元 $\varphi \in \Phi$ 和每个可能世界 $w \in W$ 指派一个二值的布尔值,即 $\nu(\varphi, w) \in \{0, 1\}$ 。

(15) $\rho: 2^W \rightarrow [0, 1]$ 是关于 W 上的子集上的布尔代数的有穷加法概率测度,使得对于 $\varphi \in \Phi_0$,集合 $\{w \mid \nu(\varphi, w) = 1\}$ 是可测度的。

(16) $\tau: \Pi_0 \rightarrow 2^{W \times W}$ 表示由于每个原子行动所引起的从一个可能世界到另一个可能世界的世界序对之间的转换。

(17) $\theta: W \rightarrow [0, 1]$ 是可能世界上的偏好分布, $\theta(w) < \theta(w')$ 的意思是 w' 比 w 受到更多偏好。

(18) $\mu_w: W \rightarrow [0, 1]$ 是对每个 $w \in W$ 而言的可能性分布。其中 $\mu_w(w') \in [0, 1]$ 表示主体试图从可能世界 w 到可能世界 w' 的努力程度。

L_{BDI} 可以通过使用经典联结词和行动模态词对 L 进行如下扩展而得到。

- (19) $\tau(\alpha; \beta) = \tau(\alpha) \circ \tau(\beta)$.
- (20) $\tau(\alpha \cup \beta) = \tau(\alpha) \cup \tau(\beta)$.
- (21) $\tau(\alpha^*) = \tau(\alpha)$.
- (22) $\tau(\varphi?) = \{(w, w) \mid \nu(\varphi, w) = 1\}$.
- (23) $\nu([\alpha]\varphi, w) = \min\{\nu(\varphi, w_i) \mid (w, w_i) \in \tau(\alpha)\}$.
- (24) $\nu([\alpha]\varphi, w) = 1$, 当且仅当在通过行动 α 从可能世界 w 能够到达的所有可能世界 w' 中 $\nu(\varphi) = 1$ 。

根据卢卡斯维茨逻辑的真值函数和信念的概率解释, B -公式可由 ν 进行如下扩展得到^[8]:

- (25) $\nu(B\varphi, w) = \rho(\{w' \in W \mid \nu(\varphi, w') = 1\})$, 对每一个 φ 。
- (26) $\nu(r_c, w) = r$, 对所有的 $r \in Q \cap [0, 1]$ 。
- (27) $\nu(B\varphi \& B\psi, w) = \max(\nu(B\varphi) + \nu(B\psi) - 1, 0)$ 。
- (28) $\nu(B\varphi \rightarrow_L B\psi, w) = \min(1 - \nu(B\varphi) + \nu(B\psi), 1)$ 。
- (29) $\|B\varphi\|^K = td_{w \in W} \nu(B\varphi, w)$, 其中 $\|B\varphi\|^K$ 是公式 $B\varphi$ 在克里普克结构 $K = \langle W, \nu, \rho, \tau, \theta, \{\mu_w\}_{w \in W} \rangle$ 中的真值隶属度。

与 B -公式类似,利用卢卡斯维茨联结词, D -公式可以由公式 $D\varphi$ 的偏好分布 $\theta(w)$ 以及一元联结词 Δ 和 ν 进行如下扩展得到^[8]。

- (30) $\nu(D\varphi, w) = td\{\theta(w') \mid \nu(\varphi, w') = 1\}$ 。
- (31) 如果 $\nu(D\varphi, w) = 1$, 那么 $\nu(\Delta D\varphi, w) = 1$ 。
- (32) 如果 $\nu(D\varphi, w) \neq 1$, 那么 $\nu(\Delta D\varphi, w) = 0$ 。
- (33) 对所有的 $w \in W$, $td\emptyset = 1$ 。
- (34) 对所有的 $w \in W$, $\nu(D\perp, w) = 1$ 。

在(30)与(33)中的 td 表示公式 $D\varphi$ 在克里普克结构 $K = \langle W, \nu, \rho, \tau, \theta, \{\mu_w\}_{w \in W} \rangle$ 中的真值隶属度。 D -公式的真值仅仅依赖于公式本身所表示的主体所在的可能世界中的偏好测度。

与 B -公式和 D -公式类似,利用卢卡斯维茨逻辑和公式 $I\varphi$ 的可能性分布 μ_w , I -公式可以由 ν 进行如下扩展得到^[8]。

- (35) $N_w(S) = td\{1 - \mu_w(s) \mid s \notin S\}$, 其中 N_w 表示与可能性分布 μ_w 有关的必然性测度。
- (36) $\nu(I\varphi, w) = N_w\{\nu(\varphi, w') = 1\}$ 。

5 GBDI_{PDL+LL}逻辑的公理和演绎规则

根据卢卡斯维茨逻辑^[27]和命题动态逻辑^[28],以及所给出的 $GBDI_{PDL+LL}$ 逻辑的语义,笔者可以给出 $GBDI_{PDL+LL}$ 逻辑的如下公理(37)–公理(56)^[8]。

- (37) 经典命题逻辑的关于非模态公式的所有公理。
- (38) 卢卡斯维茨逻辑关于模态公式的所有公理。比如:

基本 Hajek 逻辑^[27]的公理,以及 $\neg \rightarrow B\varphi \rightarrow B\varphi$, $\neg \rightarrow D\varphi \rightarrow D\varphi$ 和 $\neg \rightarrow I\varphi \rightarrow I\varphi$ 这3个公理。

基于卢卡斯维茨逻辑的关于信念 B 的公理如下^[23]:

- (39) $B(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow_L (B\varphi \rightarrow B\psi)$.
- (40) $\neg_L B(\varphi) \equiv B(\neg \varphi)$.
- (41) $B(\varphi) \equiv \neg_L B(\varphi \wedge \psi) \rightarrow_L B(\varphi \wedge \psi)$.

基于命题动态逻辑的关于信念 B 的公理如下:

- (42) $[\alpha]B(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow ([\alpha]B\varphi \rightarrow [\alpha]B\psi)$.
- (43) $[\alpha]B(\varphi \wedge \psi) \leftrightarrow [\alpha]B\varphi \wedge [\alpha]B\psi$.
- (44) $[\alpha \cup \beta]B\varphi \leftrightarrow [\alpha]B\varphi \wedge [\beta]B\varphi$.
- (45) $[\alpha; \beta]B\varphi \leftrightarrow [\alpha][\beta]B\varphi$.
- (46) $[B\psi?]B\varphi \leftrightarrow (B\psi \rightarrow B\varphi)$.
- (47) $B\varphi \wedge [\alpha][\alpha^*]B\varphi \leftrightarrow [\alpha^*]B\varphi$.
- (48) $B\varphi \wedge [\alpha^*](B\varphi \rightarrow [\alpha]B\varphi) \leftrightarrow [\alpha^*]B\varphi$ (归纳公理)。

基于命题动态逻辑的关于愿望 D 和意图 I 的公理与信念 B 的公理类似,比如有:

- (49) $[\alpha]D(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow ([\alpha]D\varphi \rightarrow [\alpha]D\psi)$.
- (50) $[\alpha]I(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow ([\alpha]I\varphi \rightarrow [\alpha]I\psi)$.

基于卢卡斯维茨逻辑的关于愿望 D 和意图 I 的公理有:

- (51) $D(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow_L (D\varphi \rightarrow D\psi)$.
- (52) $D(\varphi \wedge \psi) \equiv D\varphi \wedge D\psi$.
- (53) $\rightarrow D(\perp)$.
- (54) $I(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow_L (I\varphi \rightarrow I\psi)$.
- (55) $\rightarrow (I\perp)$.
- (56) $I(\varphi \wedge \psi) \equiv I\varphi \wedge I\psi$.

GBDI_{PDL+LL}逻辑的演绎规则有(57)–(59):

- (57) 分离规则(MP):如果 φ 且 $\varphi \rightarrow \psi$ 成立,那么 ψ 成立。
- (58) 必然化规则(NR):由 φ 成立,可以得到 $[\alpha]\varphi$, $B\varphi$,

$D\varphi$ 和 $I\varphi$ 。

- (59) 蕴涵规则(IR):如,由 $\varphi \rightarrow \psi$ 成立,可以得到 $D\varphi \rightarrow_L D\psi$ 成立。

6 GBDI_{PDL+LL}逻辑的可靠性和完全性

由于我们的 GBDI_{PDL+LL}逻辑(简记为 GBDIL)是对命题动态逻辑(PDL)和卢卡斯维茨逻辑(LL)的扩展,因此 $PDL \subset GBDIL$ 且 $LL \subset GBDIL$,而且 PDL 和 LL 都具有可靠性和完全性^[24,29],因此可以通过把 GBDIL 嵌入(embedding)到 PDL 或 LL 中的方法来证明 GBDIL 的可靠性和完全性^[8]。嵌入运算至少在如下两方面有用:1)嵌入运算使得用一个逻辑语言中的联结词解释另一个逻辑语言中的联结词成为可能;2)嵌入使得各种逻辑性质得以保持^[30]。例如:如果逻辑 L_1 可以嵌入到一个具有可靠性和完全性的逻辑 L_2 中,那么 L_1 也具有可靠性和完全性。

现在需要定义一个可行的翻译函数 Tr ,使得对所有的公式 $\varphi \in GBDIL$,当且仅当 $Tr(\varphi) \in PDL$ 或 $Tr(\varphi) \in LL$ 。事实上,可以令 Tr 是从 GBDIL 到 PDL 或 LL 的一个如下映射。

定义 1

- (60) $Tr(p) = p$,如果 p 是一个 PDL 或 LL 公式。
- (61) $Tr(\neg \varphi) = \neg Tr(\varphi)$,如果 φ 是一个 GBDIL 公式。
- (62) $Tr(\varphi \rightarrow \psi) = Tr(\varphi) \rightarrow Tr(\psi)$,对所有的 GBDIL 公式 φ 和 ψ 。
- (63) $Tr(B\varphi) = Tr(\varphi)$, $Tr(D\varphi) = Tr(\varphi)$, $Tr(I\varphi) = Tr(\varphi)$,如果 φ 是一个 GBDIL 公式。

根据翻译函数 Tr 的定义,笔者提出并证明了下面的定理。

定理 1 定义 1 所定义的映射 Tr 是从 GBDIL 到 PDL 或 LL 的一个嵌入。

证明:可以很容易证明,对所有的公式 $\varphi \in GBDIL$,当且仅当 $Tr(\varphi) \in PDL$ 或 $Tr(\varphi) \in LL$ 。例如:对于(39)而言, $B(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow_L (B\varphi \rightarrow B\psi) \in GBDIL$,根据定义 1, $Tr(B(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow_L (B\varphi \rightarrow B\psi)) = Tr(B(\varphi \rightarrow \psi)) \rightarrow_L Tr(B\varphi \rightarrow B\psi) = Tr(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow_L (Tr(B\varphi) \rightarrow Tr(B\psi)) = (Tr(\varphi) \rightarrow Tr(\psi)) \rightarrow_L (Tr(\varphi) \rightarrow Tr(\psi)) = (\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow_L (\varphi \rightarrow \psi) \in LL$ 。(40)–(56)的证明与(39)类似。因此,翻译函数 Tr 是从 GBDIL 到 PDL 或 LL 的一个嵌入。

由于 PDL 和 LL 都具有可靠性和完全性,根据嵌入运算的性质可知,等级 BDI 逻辑 GBDIL 也具有可靠性和完全性。换句话说,如果 GBDIL 是 BC,DC 和 IC 上的有穷理论,而且 ϕ 是一个模态公式,那么 $GBDI \vdash \phi$,当且仅当在 GBDIL 的每个 BDI 克里普克模型 K 中 $\|\phi\|^K = 1$ 。

7 GBDI_{PDL+LL}主体模型的复合行动的形式刻画

很显然,计划实际上是复合行动,它使得智能主体能够从当前世界进入到另一世界,给定的公式在其中得以满足,而且所涉及的行为需要付出相应的代价(cost)^[2]。我们选择把一阶语言限制到霍恩子句(Horn Clauses, HL)中,那么计划理论就包括如下这些特殊的谓词^[8]。

(64) $action(\alpha, Pre-, Cost_\alpha)$,其中 $\alpha \in \Pi_0$ 是初始行动, $Pre-\subset HL$ 是执行行动 α 的前提条件, $Cost_\alpha \in [0,1]$ 表示执行 α 所付出的代价。

(65) $plan(\varphi, action(\alpha, Pre-, Cost_\alpha), r)$,其中 $\alpha \in \Pi$ 表示计划达成 φ 时的初始行动或复合行动, r 表示通过执行 α 实际达成 φ 时的信念度。这里假定每个公式只能产生这个谓词的一个实例。

(66) $best\ plan(\varphi, action(\alpha, Pre-, Cost_\alpha), r)$,其解释与(65)类似,且假定最佳计划的实例只有一个。

在此,我们假定,当前的世界状态满足执行相应行动的前提条件,而且计划必须使得建立计划的相应愿望为真。

8 GBDI_{PDL+LL}主体模型的不同背景之间的相互关系

根据主体的愿望和信念以及行动所带来的可能世界的转变,计划者可以制定相应的计划,并通过行动来实现其愿望^[21]。愿望 D 的背景、信念 B 的背景和计划 P 的背景之间具有以下关系。

(67) 如果 $D: \neg \Delta \neg (D\varphi)$, $P: action(\alpha, Pre, Cost_\alpha)$ 且 $B: (B([\alpha]\varphi, r))$,那么 $P: plan(\varphi, action(\alpha, Pre-, Cost_\alpha), r)$ 。

如果用意图度来换取为达到目标时所付出的代价和获得的利益,那么对每个能够达到目标的复合行动 α 而言, $I\varphi$ 的意图度可以从 $D\varphi$ 的愿望度以及满足 φ 的计划所付出的代价得到。即 $I\varphi$ 的意图度可以通过下面的转换函数计算得出^[8]。

(68) 如果 $D: (D\varphi, d)$ 且 $P: plan(\varphi, action(\alpha, Pre-, Cost_\alpha), r)$,那么 $I: (I\varphi, f(d, b, r))$ 。

不同的转换函数 $f(d, b, r)$ 是对不同个体行为的建模。假定在完成 α 后,完全相信能够达到 φ ,那么产生 φ 的意图度则主要依赖于 φ 给主体带来的满意度和所付出的代价,比如,可以考虑 1 与通常所付出代价的差。因此,转换函数 $f(d, b, r)$ 可做如下定义^[8]:

$$(69) f(d, b, r) = r(b + (1 - Cost_a)) / 2.$$

主体与环境的相互作用是指:如果主体在 i_{max} (指所有意图的最强烈的程度) 时,其愿望是达成 φ ,那么主体将关注能够使其达成最为期望的目标的最佳计划。即:

(70) 如果 $I: (I\varphi, i_{max})$ 且 $P: bestplan(\varphi, action(\alpha, Pre-, Cost_a), r)$, 那么 $C: C(does(\alpha))$ 。

主体将通过交流单元来感知环境中的所有变化,因此,信念 B 的背景与交流 C 的背景就具有以下关系。

(71) 如果 $C: \beta$, 那么 $B: B\beta$ 。

9 实例:对 $GBDI_{PDL+LL}$ 主体投资行为的形式刻画

假设训练我们的投资主体进行投资品交易^[8]。为此,指派给该主体一个愿望,即希望所买的投资品升值空间大,而且主体希望投资品总价不能够超过 200 万。为了决定所要买的投资品,主体将考虑此投资行为带来的利益(即升值空间大)及所付出的代价(即总的投资额)。在这种情况下, BC, DC 和 PC 背景如下。

愿望背景(DC):赋予该主体这样的愿望:

(72) D (升值空间大), $d=0.95$ 。

(73) D (总价不能够超过 200 万), $d=0.92$ 。

信念背景(BC):BDI 具有所采取的可能行动之间的关系以及执行这些行动后哪些公式为真的知识。在本例中,不同行动就是买不同的投资品;假定有 5 种投资品可供选择:

(74) $\Pi_0 = \{\text{投资品 A, 投资品 B, 投资品 C, 投资品 D, 投资品 E}\}$ 。

在此例中, $B[\alpha]$ (升值空间大) 的强烈程度是指在买了投资品 α 后,主体相信所买投资品升值空间大的概率。可以给这一投资主体赋予这样的信念:

(75) B [投资品 A] 升值空间大, $r=0.35$ 。

(76) B [投资品 B] 升值空间大, $r=0.85$ 。

(77) B [投资品 C] 升值空间大, $r=0.90$ 。

(78) B [投资品 D] 升值空间大, $r=0.70$ 。

(79) B [投资品 E] 升值空间大, $r=0.95$ 。

计划背景(PC):在此实例中,一系列原子行动如下:

(80) $action(\text{投资品 A}, \{\text{cost}=300 \text{ 万}\}, Cost_a=0.97)$ 。

(81) $action(\text{投资品 B}, \{\text{cost}=130 \text{ 万}\}, Cost_a=0.58)$ 。

(82) $action(\text{投资品 C}, \{\text{cost}=180 \text{ 万}\}, Cost_a=0.70)$ 。

(83) $action(\text{投资品 D}, \{\text{cost}=100 \text{ 万}\}, Cost_a=0.46)$ 。

(84) $action(\text{投资品 E}, \{\text{cost}=280 \text{ 万}\}, Cost_a=0.88)$ 。

现在主体能够通过推理来决定应该采取哪个意图,并判断哪个计划与此意图有关。其具体步骤如下:

第一步:这些愿望通过愿望背景传递给计划背景。

第二步:在计划背景中,为每个愿望找到相应的计划。

主体根据愿望,寻找不同的投资计划,并考虑这样的信念:通过不同的行动满足所买投资品升值空间大这一目标的概率。由于受到愿望(73)的限制,即所买投资品总价不能够超过 200 万,主体将放弃计划(80)和(84),即放弃进行投资品 A 和投资品 E 的交易。因此,主体的计划将根据(67)由愿望产生。例如,最强烈的偏好愿望是所买投资品升值空间大,该愿望所产生的计划如下:

(85) $plan$ (升值空间大, $action$ (投资品 B, $\{\text{cost}=130 \text{ 万}\}, Cost_a=0.58), r=0.85)$ 。

(86) $plan$ (升值空间大, $action$ (投资品 C, $\{\text{cost}=180 \text{ 万}\},$

$Cost_a=0.70), r=0.90)$ 。

(87) $plan$ (升值空间大, $action$ (投资品 D, $\{\text{cost}=100 \text{ 万}\}, Cost_a=0.46, r=0.70)$ 。

第三步:根据计划判断意图的强烈程度。

根据(69),转换函数 f 相对于 d 是单调递增的。因此,只需要考虑最强烈的偏好愿望,即所买投资品“升值空间大”,其偏好的强烈程度是 0.95。另根据(69)可知, $f(d, b, r) = r(b + (1 - Cost_a)) / 2 = r \cdot (0.95 + (1 - Cost_a)) / 2$, 对于 $\alpha \in \{\text{投资品 B, 投资品 C, 投资品 D}\}$, 可以依次得到意图的强烈程度如下:

(88) I_B (升值空间大, $r \cdot (0.95 + (1 - Cost_a)) / 2 = 0.58225)$ 。

(89) I_C (升值空间大, $r \cdot (0.95 + (1 - Cost_a)) / 2 = 0.5625)$ 。

(90) I_D (升值空间大, $r \cdot (0.95 + (1 - Cost_a)) / 2 = 0.5215)$ 。

可见,所买投资品“升值空间大”的最佳计划是买投资品 B, 因为其意图的强烈程度最大,是 0.58225。

第四步:采纳计划。

根据(70),通过选择行动 α ,买投资品 B,并把这一行动传递给交流背景。

总之,主体根据信念、愿望、意图进行行为决策和推理的过程可以概括成图 1。

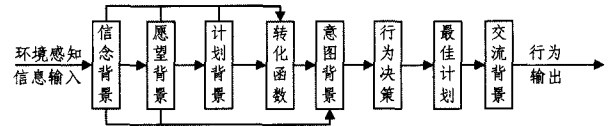


图 1 等级 BDI 主体的一般结构

可见,本文提出的 $GBDI_{PDL+LL}$ 模型为等级 BDI 主体行为的不确定性推理提供了比 Casali 等^[21] 和 Parsons 等^[25] 的工作更为清晰一致的形式刻画,只需进行简单编程即可实现。但是如何为主体的信念、愿望和意图赋予科学合理的测度值还有待进一步研究。

结束语 本文的主要贡献和结论如下:1)选择无穷值的卢卡斯维茨逻辑对信念、愿望和意图这 3 种心理状态的强烈程度进行了形式化。为了通过概率、必然性和可能性对不确定性行为进行表示和推理,把相应的概率添加到卢卡斯维茨逻辑中。2) $GBDI_{PDL+LL}$ 主体模型使用多背景系统,可以清晰地表示信念、愿望和意图的不确定性。 $GBDI_{PDL+LL}$ 主体的行为可以通过添加了具体条件的每种背景的不同测度来决定。3)对信念、愿望和意图的模型进行了公理化,并说明了它们对主体行为的影响。此模型很容易向包括其他心理状态的主体进行推广。4)文中提出的 $GBDI_{PDL+LL}$ 逻辑系统是在可能世界语义学和克里普克模型的基础上,把命题动态逻辑和无穷值的卢卡斯维茨逻辑进行融合后得到的逻辑系统,此系统是符号的形式演绎和数值计算并存的连续值柔性逻辑系统。

至于以后的工作,考虑从以下方面展开:1)对知识情感等级 BDI 主体模型进行研究。借鉴 Pereira 等^[20] 通过情感对主体的可适应性和自主性的影响的形式分析,向我们的 $GBDI_{PDL+LL}$ 主体中添加知识以及诸如害怕、焦虑和自信等情感因素,研究这些因素对主体行为的影响。2)把 $GBDI_{PDL+LL}$ 逻辑和动态认知行动逻辑进行融合,提出关于 $GBDI_{PDL+LL}$ 主体的动态认知行动逻辑。由于动态认知行动逻辑和 $GBDI_{PDL+LL}$ 逻辑都是建立在模态逻辑、可能世界语义学和克里普克模型的

基础上的,对它们进行融合,提出新的逻辑系统对智能主体的不确定性行为进行更为充分、更为有效的表达是完全可能的。其关键是:在所建立的行动模型中,为每个原子行动指派相应语言中的公式作为执行该行动的前提条件时,要充分考虑知识、信念、愿望、意图、情感对行动的影响。3)如何拓展 GB-DI_{PDL+LL} 主体模型的应用范围,提高智能主体不确定性推理的能力,从而增强主体的学习能力和自适应能力,也值得开展进一步研究。

参 考 文 献

[1] Cai Zi-xing, Xu Guang-you. Artificial intelligence: principles and applications (Fourth Edition) [M]. Beijing: Tsinghua University, 2010: 208-209 (in Chinese)
蔡自兴, 徐光佑. 人工智能及其应用(第4版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 208-209

[2] Rao A, Georgeff M. Modeling rational agents within a BDI-architecture [C]// Proc. of the 2nd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR-92). 1991: 473-484

[3] Rao A, Georgeff M. BDI agents: from theory to practice [C]// Proc. of the 1st International Conference on Multi-Agents Systems. 1995: 312-319

[4] Zhang Xiao-jun, Hao Yi-jiang. Studies on Characterizing Agents' Behavior based on Action Logics [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Social Science), 2013(1): 13-18 (in Chinese)
张晓君, 郝一江. 基于行动逻辑的智能主体行为表征研究[J]. 重庆理工大学学报(社会科学版), 2013(1): 13-18

[5] Lincoln N K, Veres S M. Natural language programming of complex robotic BDI agents [J]. Journal Intelligent Robot Systems, 2013, 17(2): 211-230

[6] Liu Gang, et al. Forming mechanism of BDI agent based on activity and its application [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(9): 25-28 (in Chinese)
刘刚, 等. 基于活动的 BDI 主体形成机制及其应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(9): 25-28

[7] Chen Zhong-xiang. Theoretical and Technical Research on the CGF Behavioral Modeling Based on BDI Agent [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004 (in Chinese)
陈中祥. 基于 BDI Agent 的 CGF 主体行为建模理论与技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004

[8] Zhang Xiao-jun, et al. Graded BDI models for agent architectures based on Łukasiewicz logic and propositional dynamic logic[M]// Lecture Notes in Computer Science 7529. Springer, 2012: 439-450

[9] Zhang Xiao-jun. Modeling emotional agents based on graded BDI architectures [M]// Network Computing and Information Security. Springer, 2012: 606-616

[10] Zhang Xiao-jun. Graded BDI logic: a flexible logic about behavioral characterization [J]. Philosophical Trends, 2013(1): 102-107 (in Chinese)
张晓君. 等级 BDI 逻辑: 关于行为表征的柔性逻辑[J]. 哲学动态, 2013(1): 102-107

[11] Busetta P, et al. A reliable computational model for BDI agent

[C]// 1st International Workshop on Safe Agents. 2003: 1-10

[12] Hernández A G, et al. Learning in BDI multi-agent systems [C]// Computational Logic in Multi-Agent Systems, Springer, 2004: 218-233

[13] Casali A, et al. G-BDI: A Graded Intensional Agent Model for Practical Reasoning [M]// Modeling Decisions for Artificial Intelligence. LNAI5861, 2009: 5-20

[14] Bordini R H, Hübner J F. BDI agent programming in agentspeak using Jason [C]// Proceedings of 6th International Workshop on Computational Logic in Multi-Agent Systems. Springer, 2006: 143-164

[15] Viswacheda D V, et al. Development of a semantic multi-agent based intelligent ethical wealth management planner [J]. International Journal of Computer Theory and Engineering, 2012, 4(6): 876-879

[16] Casali A, et al. Modeling travel assistant agents: a graded BDI approach [M]// Artificial Intelligence in Theory and Practice. 2006: 415-424

[17] Santi A. Programming robots with an agent-oriented BDI-based control architecture: explorations using the JaCa and webots platforms[EB/OL]. (2012-12-26) [2013-08-15]. http://www.amslaurea.unibo.it/4803/1/mordenti_andrea_tesi.pdf

[18] Cohen P R, Levesque H. Teamwork[J]. Noûs, 1991, 24(4): 487-512

[19] van Linder B, et al. Actions that make you change you mind [M]// KI-95: Advances in Artificial Intelligence. Springer Berlin Heidelberg, 1995: 103-146

[20] Pereira D, Oliveria E, Moreira N. Formal modeling of emotions in BDI agents[M]// Computational Logic in Multi-Agent Systems. Springer, 2008: 62-81

[21] Casali A, Godo L, Sierra C. Graded BDI models for agent architecture [M]// Computational Logic in Multi-agent Systems. Springer, 2005: 126-143

[22] Lang J, van der Torre L, Weydert E. Hidden Uncertainty in the logical representation of desires [C]// International Joint Conference on Artificial Intelligence. Acapulco, Mexico, 2003: 685-690

[23] Schut M, Wooldridge M, Parsons S. Reasoning about intentions in uncertain domains symbolic and quantitative approaches to reasoning with uncertainty[C]// Proc. of 6th ECSQARU 2001. 2001: 84-95

[24] Casali A, Godo L, Sierra C. A graded BDI agent model to represent and reason about preferences [J]. Artificial Intelligence, Elsevier, 2011, 175(7/8): 1468-1478

[25] Parsons S, Jennings N J, Sabater J, et al. Agent specification using multi-context systems [M]// Foundations and Applications of Multi-Agent Systems 2002. 2002: 205-226

[26] Godo L, Esteva F, Hajek P. Reasoning about probabilities using fuzzy logic [J]. Neural Network World, 2000(10): 811-824

[27] Hájek P. Mathematics of Fuzzy Logic [M]. Kluwer, 1998

[28] Harel D, Kozen D, Tiuryn J. Dynamic Logic [M]. The MIT Press, 2000

[29] Goldblatt R. Logics of time and computation [M]. Center for the Study of Language and Information, 1987

[30] Chagrov A, Zakharyashev M. Modal Logic [M]. Clarendon Press, 1997