

纤维逻辑^{*}

邱莉榕^{1,2} 杨 柳^{1,2} 史忠植¹

(中国科学院计算技术研究所 北京 100080)¹ (中国科学院研究生院 北京 100039)²

摘 要 形式逻辑已经从简单命题逻辑发展到比较复杂的模态逻辑系列。但是在主体环境下,已有逻辑的复杂性仍然不能有效刻画主体复杂的心智。有一些人工智能研究者根据主体心智的多重性,在模态逻辑中引入多种模态算子,并借此对主体加以刻画。但是原来的可能世界语义却难以容纳如此复杂的语法,出现了很多不合理的地方。本文首先介绍了新近出现的纤维逻辑(fibring logics),然后归纳了目前将此理论应用在主体 BDI 建模的研究现状,最后分析纤维逻辑的不足之处,讨论了其他可能的应用,并对今后的工作做了展望。

关键词 形式逻辑, BDI 逻辑, 多模态逻辑, 纤维逻辑

Fibring Logics

QIU Li-Rong^{1,2} YANG Liu^{1,2} SHI Zhong-Zhi¹

(Institute of Computing Technology, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)¹

(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)²

Abstract Formal logics in AI have grown from the simple proposition logic to modal logic series, which are more complicated. However, the complexity of existing logics is not sufficient for describing the mental states of Agent. Some AI researchers introduce multiple modal operators to modal logic according to multiple mental states of Agent. Meanwhile, the development of semantics is not so satisfactory, and the existing possible world semantics cannot hold so complicated a grammar, which results in several faults. Therefore, we will introduce fibring logics in this paper and describe how fibring logics can be compatible with the grammar of Agent. Furthermore, we will analyze the shortage of fibring logics, discuss other possible applications, and present some valuable work in future.

Keywords Formal logics, BDI logics, Multi-modal logics, Fibring logics

1 引言

近年来,主体的理论及应用已经成为人工智能领域研究的重要对象^[1,2]。在国内,中科院计算所智能科学中心对于主体的研究更是取得了一系列重要的成果^[3,4]。

但是,由于已有逻辑已经不能适应主体复杂的心智,在主体理论方面需要做出进一步的突破。有一些主体理论研究者根据心智的多重性^[5~9],在模态逻辑中引入多种模态算子,并借此对主体加以刻画。但是在语义方面的进展显得滞后,已有的可能世界语义^[10~13]难以包容如此复杂的语法,出现了很多不合理的地方。本文就此对新近出现的纤维逻辑及其在解释主体语义方面的合理之处做介绍。

本文将在第2节中对当前多模态逻辑中存在的问题做阐述,在第3节中介绍纤维逻辑理论,在第4节中总结在纤维逻辑和主体的BDI模型结合方面已有的工作,最后分析纤维逻辑其他可能的应用,以及目前现有的工作,分析值得改进的地方,并给出进一步的工作展望。

2 多模态逻辑

当前 Agent 使用的 BDI 模型一般都是在 Cohen 和 Levesque 的正规模态逻辑的意图模型以及 Rao 和 Georgeff

的 BDI 计算数逻辑模型基础上发展起来的,即侧重于形式描述信念(belief)、愿望(desire)和意图(intention),简称 BDI。

在对 Agent 的 BDI 模型进行形式化的过程中,逻辑学家发现经典命题逻辑和一阶谓词逻辑是不合适的,而模态逻辑更适合 BDI 模型的形式化。Cohen 和 Levesque 用正规模态逻辑形式化定义了 Agent 各种意识概念,奠定了 Agent 理论和性质形式化的基础;Rao 和 Georgeff 为了形式化定义 Agent 的各种意识概念,引入了分支时序逻辑 CTL* 和可能世界的模型,重点研究了信念和意图的逻辑特性^[14,15];Wool-dridge 认为,信念、目标和意图等意识概念实质上是一种模态算子,其表示和推理的合适的形式化工具是模态逻辑和可能世界语义^[16];Lin Padgham 根据哲学中的“能力”理论,在 BDI 模型中加入能力(Capability)算子,给出了 Capability-BDI 扩展模型^[17];Van Linder 加入了结果(Result)和能力(Opportunity)两个算子,提出了 KARO-BDI 模型^[18];Vineet Padmanabham 在此基础上,引入复合动作(Composite actions),并给出了语义描述^[19]。

由此可见,在主体的 BDI 模型方面,现有的很多研究工作都是集中在主体的某一种心智上的,它们分别用不同的算子提高了对主体的不同心智的描述能力^[20,21]。但是,至于如何将这些独立描述不同心智的逻辑有机地综合起来,已有的

^{*} 本文得到国家“863”高技术研究发展计划“自主计算的理论和技术研究”(No. 2003AA115220),国家 973 项目“语义网格的基础理论、模型、方法和关键技术”(No. 2003CB317004)资助。邱莉榕 博士研究生,研究方向是多主体系统理论和应用。杨 柳 硕士研究生,研究方向是多主体系统与本体理论。史忠植 研究员,博士生导师,研究方向是智能科学、数据挖掘。

工作是很不够的。

一般来说,一个主体的 BDI 逻辑应当是知识逻辑、信念逻辑、时序逻辑、动态逻辑的综合。可是已有的关于知识、信念、时序、动作的逻辑的语义是被相对独立的建立起来的。因此,在构建主体的 BDI 模型的综合语义模型中,如果没有很好的方法作指导,很难对这些现有的语义体系充分地加以利用,并在新的模型中体现出主体各个要素的性质。

目前的多种逻辑的组合方法主要有融合逻辑(fusion logics)^[24,26,37]和纤维逻辑(fibering logics)^[22,23,36]两种方法。Kracht 和 Wolter 等学者分析了两个模态逻辑系统的传递特性,提出了多模态逻辑的融合方法以及结果,但是并没有给出不同的模态算子交互融合问题^[28~30]。很多学者也从不同模态算子的交互方面,对融合逻辑方法提出了许多反对意见^[31,32]。因此,需要一种更一般的方法来组合多种逻辑,并且要能够考虑到不同逻辑系统之间的交互作用^[33~35]。其中由 Gabbay 1996 年出版的“Fibering Logics”,为这个问题的解决提供了新思路^[22,27,36]。

3 纤维逻辑

纤维逻辑的核心是纤维语义,这种语义结构可以通过语义把不同的系统联合起来。它所提供的方法很具有规范性,且对已有的可能世界语义做了很合理的推广(可能世界是它的体系里的一个单位)。我们将用下面的例子做说明。

假设模态算子 $\Diamond_1$ 和 $\Box_2$ 分别属于 L_1 和 L_2 ,对于公式 $A = \Diamond_1 \Box_2 q$,如果令 $p = \Box_2 q$,则 $A = \Diamond_1 p$,此时 A 就是 L_1 的公式。由于在 L_1 中 $\Box_2$ 是没有定义的,所以 p 在 L_1 中是一个原子命题。对于 L_1 的一个语义模型 $m^1 = (S^1, R^1, a^1, h^1)$,称它是公式 A 的一个模型当且仅当存在 $t \in S^1$,满足 $a^1 R^1 t$ 且 $t \models_1 p(t \models_1 \Box_2 q)$ 。但是由于 $\Box_2$ 在 L_1 中没有定义,用原有的可能世界语义模型就无法解释 $t \models_1 \Box_2 q$ 的语义。纤维语义的基本思想是对于任意的 $t \in S^1$,存在着一个 L_2 的模型 $m^2_t = (S^2_t, R^2_t, a^2_t, h^2_t)$ 和它联系着。于是在这种语义下, $t \models_1 \Box_2 q$ 当且仅当 $a^2_t \models_2 \Box_2 q$ 。这样,具有多模态算子的公式的语义在纤维语义模型下就得到了合理的解释。下面将对纤维语义模型(简称纤维模型)做详细的介绍。

首先定义模态下标集合 I 。对于任意 $i \in I$,对应着一种模态逻辑 L_i ,其中的模态算子分别是 $\Box_i, i \in I$ 。在这个基础上,我们定义纤维模型如下:

纤维模型是这样的结构 (W, S, R, a, h, τ, F) ,其中:

W 是一个由可能世界组成的集合;

$S: W \rightarrow \rho(W), S^w$ 是 W 的子集;

$R: W \rightarrow S^w \times S^w, R^w$ 是 S^w 上的可达关系;

$a: W \rightarrow S^w, a^w$ 定义了模型 w 中的真实世界;

$\tau: W \rightarrow I$,它规定了每个可能世界所属的模态类型;

F 是一个纤维函数集合,

对于 $\forall f \in F, f: I \times W \rightarrow W$

具体的赋值方式如下:

$$F_i(w) = \begin{cases} w & \text{if } w \in S^w \text{ and } m \in K_i \\ a \text{ value in } W_i, & \text{otherwise} \end{cases}$$

在定义了模型之后,对于公式 $A, t \models A$ 定义如下:

如果 $A = p$ 是一个原子命题, $t \models A$ 当且仅当 $h(t, p) = 1$;

如果 $A = \Box_i q$,分两种情况处理:

如果 $t \in m$,且 $m \in K_i, t \models A$ 当且仅当对于任意 s ,如果

tRs ,则有 $s \models q$;

如果 $t \in m$,且 $m \in K_i (j \neq i), t \models A$ 当且仅当对于 $f \in F, f_i(t) \models A$

纤维语义的一个特例是契合(dovetailing)的纤维语义,契合要求模型必须和当前世界的原子命题的赋值一致。严格来说就是,在纤维语义下, $h(t, q)$ 和 $h(f(t), q)$ 可以是不同的;而在契合的纤维语义下,必须满足 $h(t, q) = h(f(t), q)$ 。在这种特殊情况下,纤维模型结构中的纤维函数集合 F 实质上就不起作用了。

令 L_i 是不同的模态逻辑, K_i 是 L_i 所有模型的集合,则 L_i 的契合是这样的一个模型: $L_i^D = (W, R, a, h)$ 其中,

W 是一个由可能世界组成的集合;

$S: W \rightarrow \rho(W), S^w$ 是 W 的子集;

a 是 W 中的某一个可能世界;

h 是一个赋值函数;

$R: I \rightarrow \rho(W \times W)$,即对于任意 $i \in I, R(i)$ 是 W 上的可达关系,

而且要满足:对于任意 $i \in I, (W, R(i), a, h)$ 是 K_i 中的模型;对于任意 $t \in W$,

$\exists (n_1, n_2, \dots, n_k), \exists (i_1, i_2, \dots, i_k)$,使得 $a[R^{n_1}(i_1) \cdot R^{n_2}(i_2) \cdot \dots \cdot R^{n_k}(i_k)]t$ 。

在这个模型下, $w \models A$ 被定义如下:如果 $A = p$ 是一个原子命题, $w \models A$ 当且仅当 $w \in h(p)$;

如果 $A = \Box_i q$,当且仅当对于任意 $y \in W$ 如果 $wR(i)y$,则有 $y \models A$ 。

另外,我们称 $\models A$,当且仅当对于任意模型 (W, R, a, h) ,满足 $a \models A$ 。

定理 1 假设对于所有的 $i \in I, L_i$ 都是由 K 系统用传统的 Jilbert 公理和必要性规则扩展得来的。这样 L_i^D 的公理可以由 L_i 中关于模态算子 $\Box_i$ 的公理和必要性规则组合而成。

定理 2 如果对于所有的 $i \in I, L_i$ 都承认必要性且满足析取性质,则有 $L_i^D = L_i^P$ 。

对于定理 1、2 的证明在文[22]中有详细阐述。由定理 1 我们可知,对于如何综合类似 BDI 的系统,契合纤维逻辑提供了一种通用的方法。

4 纤维逻辑和主体 BDI 模型

在主体 BDI 模型中,为了解决算子之间交互问题,首先要引入 Catach 提出的 $G^{k,l,m,n}$ 公式。 $D, T, B, 4, 5$ 等特殊模态系统都可以用 $G^{k,l,m,n}$ 公式表示出来^[25]:

$$G^{k,l,m,n} = \Diamond^k \Box^l \varphi \Rightarrow \Box^m \Diamond^n \varphi$$

$$\begin{cases} D = G^{0,1,0,1} \\ T = G^{0,1,0,0} \\ B = G^{0,0,1,1} \\ 4 = G^{0,1,2,0} \\ 5 = G^{1,0,1,1} \end{cases}$$

建立在不同模态系统上的 BEL, GOAL, INT, CAP, OPP, RES 等算子就都可以用 $G^{k,l,m,n}$ 公式表示出来^[27,36]。

设 I 是 k, l, m, n 原子标注的集合,复合标注可以由原子标注得到,用 λ 表示。

设契合模型 $D = (W, R(i), a, h)$,定义一个从 k, l, m, n 到契合模型的映射 ρ :

$$\rho(i) = R(i), \rho(\lambda) = \Delta,$$

$$\rho(k; l) = \rho(k) \mid \rho(l), \rho(k \cup l) = \rho(k) \cup \rho(l)$$

其中 Δ 是可能世界之间的对角线关系。如果契合模型 D 满足公式 $\rho(k)^{-1} | \rho(m) \subseteq \rho(l) | \rho(n)^{-1}$, 则说模型 D 就符合 k, l, m, n 关系。

相应语义是: 如果 $(w, w') \in \rho(k)$ 并且 $(w, w') \in \rho(m)$, 那么存在 w'' , 使得 $(w', w'') \in \rho(l) | (w'', w'') \in \rho(n)$ 同时成立。

通过以上定义, 如果一个 BDI 逻辑系统具有多个正规的模态算子, 可以表示成 $G^{k,l,m,n}$ 的形式, 那么我们关联这个 BDI 逻辑系统与满足 $G^{k,l,m,n}$ 的契合模型。

5 讨论

上一节介绍了用纤维逻辑来构建主体 BDI 模型的逻辑系统, 对 BDI 给出了一个总体的框架。在这个框架下, 原有的逻辑得以很好地继承, 因而对于已有的算子没有额外的要求, 而且对于整个系统的性质易于研究。究其本质, 首先是通过将可能世界 w 本身作为原有的模型 m 的一个参数, 以提高语义系统的复杂度, 来适应复杂的 BDI 模型; 另一方面, 它通过引入纤维函数集 F 将不同模态下的世界联系起来, 使得这种复杂性的提高变得合理。

但是, 纤维逻辑作为一种形式语义, 还是存在其自身固有的局限性。在它对其复杂的主体认知的描述中, 仍然存在着机械性和局限性。从小范围来看有一定的合理性, 然而在解释复杂的语义时, 显得生硬, 与直观不符。另外, 它本身并没有解决真实主体的推理资源有限性问题, 从某种意义上说, 它提供的这种方法反而加剧了这个问题, 因为它使得语义更加复杂。

结束语 本文就对主体的多种心智描述的语义解释模型问题, 介绍了纤维逻辑及其在 BDI 模型中的应用。正如前述, 纤维逻辑提供了一种构建复杂语义模型的合理思路。但是, 由于其自身的局限性, 存在着很多值得改进的地方。

我们的下一步工作将致力于两个方面: 一方面, 将纤维逻辑应用在一些开放问题中, 如知识和信念之间关系的精确刻画、意图和动作之间关系的精确刻画; 另一方面, 保留纤维逻辑中合理的因素, 对不合理的部分(如推理资源有限性问题)做出修正。这样, 将两个方面相互结合, 彼此促进, 以求在主体的逻辑描述方面做出有价值的工作。

致谢感谢田启家博士提供论文写作的参考文献以及宝贵建议。

参考文献

- 1 Wooldridge M, Jennings N R. Intelligent agents: Theory and practice. The Knowledge Engineering Review, 1995, 10(2): 115~152
- 2 Jennings N R, Wooldridge M. Agent Technology: Foundations, Applications and Markets. Berlin: Springer-Verlag, 1998
- 3 史忠植. 智能主体及其应用. 北京: 科学出版社, 2000
- 4 史忠植. 高级人工智能. 北京: 科学出版社, 1998
- 5 Brown M A. On the logic of ability. Journal of Philosophical Logic, 1988, 17, 1~26
- 6 van Linder B, van der Hoek W, Meyer J-J Ch. Actions that make you change your mind. In: Laux A, Wansing H, eds. Knowledge and Belief in Philosophy and AI. Akademie-Verlag, 1995, 103~146.
- 7 Wooldridge M. The Logical Modelling of Computational Multi-Agent Systems; [PhD thesis]. Department of Computation, UMIST, Manchester, UK, October 1992
- 8 Cohen P R, Levesque H J. Intention is choice with commitment. Artificial Intelligence, 1990, 42: 213~261
- 9 Levesque H J, Cohen P R, Nunes J H T. On acting together. In: Proceedings of the Eighth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-90), Boston, MA, 1990, 94~99
- 10 Rao A S, Georgeff M P. A symmetry thesis and side effect prob-

- lems in linear time and branching time intention logic. In: Sridharan N S ed. Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence. San Mateo, CA, Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1991. 498~504
- 11 Konolige K, Pollack M E. A representationalist theory of intention. In: Bajcsy R ed. Proceedings of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence. San Mateo, CA, Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1993. 390~395
- 12 Lakemeyer G. All They Know: A Study Multi-Agent Autoepistemic Reasoning. In: Proceedings IJCAI-93, Chambéry, France, 1993
- 13 Hu Shanli, Shi Chunyi. A semantic interpretation for agent's nonnormal modal operators. Journal of Computer Research and Development, 1999, 36 (10): 1153~1157
- 14 Rao A S, Georgeff M P. Modeling rational agents within a BDI architecture. In: Allen J, Fikes R, Sandewall E eds. Principles of Knowledge Representation and Reasoning. Proceedings of the 2nd International Conference (KR91), San Mateo, CA, Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1991. 473~484
- 15 Rao A S, George M P. A model-theoretic approach to the verification of situated reasoning systems. In: Proceedings of the Thirteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-93), Chambéry, France, 1993. 318~324
- 16 Wooldridge M, Jennings N R. Intelligent agents: theory and practice. The Knowledge Engineering Review, 1995, 10 (2): 115~152
- 17 Padgham L, Lambrix P. Agent capabilities: Extending bdi theory. In: Proceedings of AAAI-2000, Austin, Texas, USA, AAAI/MIT Press, 2000. 68~73
- 18 van Linder B, van der Hoek W, Meyer J J-Ch. Formalizing abilities and opportunities of agents. Fundamenta Informaticae, 1998, 34(1,2): 53~101
- 19 Padmanabhan V, Governatori G, Sattar A. Actions made explicit in BDI. In: AI 2001: Advances in Artificial Intelligence, LNAI-2256. Springer Verlag, 2001
- 20 Rao A S, George M. Decision procedures for BDI logics. Journal of Logic and Computation, 1998, 8(3): 293~344
- 21 Wooldridge M. Reasoning about Rational Agents. Cambridge, MA: The MIT Press, 2000
- 22 Gabbay D M. Fibring Logics. Oxford: Oxford University Press, 1998
- 23 Gabbay D M, Governatori G. Dealing with label dependent deontic modalities. In: Norms, Logics And Information Systems, Amsterdam: IOS Press, 1999
- 24 Wolter F. Fusions of modal logics revisited. In: Advances in Modal Logic, volume 1. CSLI Lecture notes 87, 1997
- 25 Catnach L. Normal multimodal logics. In: Proc. National Conference on AI(AAAI-88), 1988, 491~495
- 26 Kracht M, Wolter F. Properties of independently axiomatizable bimodal logics. The Journal of Symbolic Logic, 1991, 56(4): 1469~1485
- 27 Vineet N. On extending BDI logics; [PhD thesis]. Griffith University, 2002
- 28 Kracht M. Tools and Techniques for Modal Logics. Elsevier, 1999
- 29 Finger M, Gabbay D M. Adding a temporal dimension to a logic. Journal of Logic, Language and Information, 1992, 1: 203~233
- 30 Fine K, Schurz G. Transfer theorems for multi-modal logics. In: Logic and Reality, Essays in Pure and applied logic. In memory of Arthur Prior, 109-213, Oxford University Press, 1996
- 31 Marx M. Interpolation in Modal Logic. In: Proceedings of AMAST98, 1999, 154~163
- 32 Wolter F. A counter-example in tense logic. Notre Dame journal of formal logic, 1996, 37(2): 107~173
- 33 van Linder B. Modal Logic for Rational Agents; [PhD thesis]. Department of Computer Science, Utrecht University, 19th June 1996
- 34 Rao A S. Decision Procedures for Propositional Linear-time belief-desire-intention Logics. In: Intelligent Agent - 2 LNAI 1027 (23-48), 1996
- 35 Schild K. On the relationship between BDI logics and standard logics of concurrency. In: Intelligent Agents - 5, Agent Theories, Architecture and Languages, (47-61), Springer, 1998
- 36 Governatori G, Padmanabhan V, Sattar A. On fibring semantics for BDI logics. In: Flesca S, Ianni G, eds. Logics in computer science - JELIA, volume 2424 of Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer, 2002. 198~210
- 37 Baader F, Lutz C, Sturm H, et al. Fusions of description logics and abstract description systems. Journal of Artificial Intelligence Research, 2002, 16: 1~58