

多智能体协同的认知规范模型检测算法*

陈清亮, 朱可宜

(暨南大学计算机科学系, 广东 广州 510632)

摘要: 在 Wooldridge 提出的利用不变式特征的方法来模型检测时态认知逻辑的基础上, 研究多智能体协同逻辑 ATEL (Alternating Temporal Epistemic Logic) 中认知算子的模型检测算法, 包括多层的认知算子, 分布式认知算子和公共知识算子等等。研究表明, 加入认知算子后的 ATEL 的在增加系统描述能力的同时并没有明显增加其计算复杂性。

关键词: 时态逻辑; 认知逻辑; 模型检测

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2009) 01-0110-03

Model Checking Algorithms for Epistemic Goals in Cooperative Multi-Agent Systems

CHEN Qingliang, ZHU Keyi

(Department of Computer Science, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: The model of checking algorithms was studied for epistemic specifications in ATEL (Alternating Temporal Epistemic Logic) for multi-agent systems, including nested knowledge modalities, distributed knowledge and common knowledge modalities, based on the invariant property checking approach proposed by Wooldridge. The results showed that ATEL maintains a good balance between the expressive power and computational complexity.

Key words: temporal logics; epistemic logics; model checking

时态逻辑 (Temporal Logics) 在描述和验证硬件和软件系统中取得了巨大的成功, 是目前形式化验证技术中的主要工具之一。虽然传统的时态逻辑有着非常广泛的应用, 但是对于描述多智能体系统来说, 就显得有点力不从心了, 因为多智能体系统的状态迁移关系不光和单个 agent 有关, 还和 agent 间的交互, 协同合作有关, 这些都是传统的时态逻辑所没法描述的。为此 Alur 等^[1]提出了一种交替时态逻辑 ATL (Alternating Temporal Logic) 来弥补这个缺陷, ATL 实际上就是把 CTL 中的路径算子换成了协同算子 (cooperation modalities), 用 $\langle\langle \Gamma \rangle\rangle$ 来表示, 其中 Γ 就是一组 agent。ATL 公式 $\langle\langle \Gamma \rangle\rangle \alpha$ 就表示, Γ 中的 agent 能够协同合作使得目标 α 成立, 或者说, Γ 中的 agent 存在一个合作策略使

得目标 α 成立。而相应的 ATL 的验证工具 MOCHA 也已经开发成熟^[2], 因此 ATL 成了目前研究多智能体协同合作的一个最主要的逻辑工具之一^[3]。

鉴于认知逻辑目前在智能体领域研究的重要性, 为了增加 ATL 的表达能力, 多智能体领域的创始人 Wooldridge 等^[4]在 ATL 中加入了认知算子 (Knowledge modalities), 形成了 ATEL (Alternating Temporal Epistemic Logic), ATEL 有着更丰富的表达能力, 能够表达诸如 $C_{\Gamma}\alpha \rightarrow \langle\langle \Gamma \rangle\rangle \beta$, 即如果智能体组 Γ 中拥有公共知识 α , 那么智能体组 Γ 能够合作使得 β 成立。但是 Wooldridge 等^[4]并没有完全给出这些认知规范的模型检测算法。

本文将研究 ATEL 中所有的认知算子的检测算法问题, 包括单层的如“智能体 a 知道什么”, 多

* 收稿日期: 2008-09-01

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 973 资助项目 (2005CB321902); 暨南大学引进人才基金资助项目

作者简介: 陈清亮 (1980 年生), 男, 博士, 讲师; E-mail: tsingliangchen@gmail.com

层的如“智能体 a 知道智能体 b 知道什么”,还有分布式知识,公共知识等等。将会看到,认知算子的引入并没有增加 ATL 的计算复杂性,因此 ATEL 是一种有效的逻辑工具,在增加表达力的同时维持了其计算的可行性。

1 交替时态认知逻辑 ATEL

1.1 交替认知迁移系统

首先我们给出 ATEL 的语义结构:交替认知迁移系统 (Alternating Epistemic Transition System),这个结构是在定义 ATL 的语义交替迁移系统 (Alternating Transition System) 中扩展得到的。一个交替认知迁移系统是一个多元组 $\langle \Pi, \Sigma, Q, \sim_1, \dots, \sim_n, \pi, \delta \rangle$, 其中, Π 是一个非空有限的命题集合。 $\Sigma = \{a_1, \dots, a_n\}$ 是一个有限非空的 agent 集合。 Q 是一个有限非空的状态集合。 $\sim_a \subseteq Q \times Q$ 是表示 agent a 的认知可达关系 (epistemic accessibility relations), 而根据标准的认知逻辑定义,这个关系会是一个等价关系,即满足 S5 公理的标准认知逻辑^[5]。 $\pi: Q \rightarrow 2^\Pi$ 是一个赋值函数,把每个状态赋值为在此状态下成立的那些命题。 $\delta: Q \times \Sigma \rightarrow 2^{2^Q}$ 是一个系统迁移函数,把每个状态和 agent 映射到其对应的下一个可能的状态集合,也可以解释为 agent 的所有可能的选择策略。

1.2 认知关系

如果 $\Gamma \subseteq \Sigma$, 用 Γ 的可达关系并集定义为 $\sim_\Gamma^E = (\cup_{a \in \Gamma} \sim_a)$ 。另外用 \sim_Γ^C 来表示 \sim_Γ^E 的传递闭包,下面将用 \sim_Γ^C 和 \sim_Γ^E 来定义“公共知识”和“每个人都知道”这样的认知模态词。

对于两个状态 $q, q' \in Q$ 以及一个 agent $a \in \Sigma$, 如果有一个状态集合 $Q' \in \delta(q, a)$ 使得 $q' \in Q'$ 那么我们定义 q' 是状态 q 的一个 a 后继状态 (a-successor)。也就是说, q' 是 a 处在状态 q 时的可能的选择状态集合中的一个元素。我们可以用 $\text{succ}(q, a)$ 表示 q 状态下所有的 a 后继状态集合。如果对于所有 $a \in \Sigma$, 都有 $q' \in \text{succ}(q, a)$, 我们称 q' 是 q 的后继,也就是说,当系统在状态 q 时,智能体组 Σ 能协同合作使得系统进入 q' 状态。

一个 AETS 的计算就是一个无穷的状态序列 $\lambda = q_0, q_1, \dots$ 使得对于所有的 $u > 0$, 状态 q_u 是 q_{u-1} 的一个后继状态。一个从状态 q 开始的 λ 计算就称为 q -计算;我们也用 $\lambda[i]$ 表示计算中的第 i 个状态,同样的,我们也可以用 $\lambda[0, i]$ 和 $\lambda[i, \infty]$ 表示状态序列 q_0, \dots, q_i 以及无穷后缀 q_i, q_{i+1}, \dots

1.3 系统的策略和输出

直觉来说,一个策略 (strategy) 就是一个智能体的决策过程的抽象模型。根据一个策略,智能体会从一个状态迁移到另一个状态。严格的定义的话,一个智能体 a 的一个策略是一个全函数 $f_a: Q^+ \rightarrow 2^Q$, 并且满足约束:对于所有的 $\lambda \in Q^*$ 和 $q \in Q, f_a(\lambda \cdot q) \in \delta(q, a)$ 。对于给定一组智能体 Γ 和其相应的策略 $F_\Gamma = \{f_a \mid a \in \Gamma\}$, 定义 $\text{out}(q, F_\Gamma)$ 为系统在状态 q 下,每个 agent 都按照自己的策略选择时,系统最终的可能的输出状态集合。也就是说, $\text{out}(q, F_\Gamma)$ 包含了 Γ 中所有的 agent 按自己的策略协同合作所产生的所有可能的 q -计算。

1.4 交替时态认知逻辑 ATEL

定义 1.1 给定一个交替认知迁移系统 $S = \langle \Pi, \Sigma, Q, \sim_1, \dots, \sim_n, \pi, \delta \rangle$, 在其上定义的一个 ATEL 公式,是由以下递归规则所产生的逻辑语言。①原子命题 p , 其中 $p \in \Pi$; ② $\neg \varphi$ 或 $\varphi \vee \phi$, 其中 φ, ϕ 都是 ATEL 公式; ③ $\langle\langle \Gamma \rangle\rangle \varphi, \langle\langle \Gamma \rangle\rangle \varphi$, 或 $\langle\langle \Gamma \rangle\rangle \varphi \mathcal{A} \varphi$, 其中 Γ 是一组 agents, φ 和 ϕ 是一个 ATEL 公式; ④ $K_a \varphi$, 其中 a 是一个 agent, φ 是一个 ATEL 公式, ⑤ $C_\Gamma \varphi, E_\Gamma \varphi$ 或者 $D_\Gamma \varphi$, 其中 Γ 是一组 agents, φ 是一个 ATEL 公式。

定义 1.2 设 S 是上述的一个交替认知迁移系统, q 是 S 中的一个状态, φ 是一个 S 上的 ATEL 公式, 用 $S, q \models \varphi$ 表示 φ 在 q 中成立, 其余的公式语义按照以下递归规则定义: ① $S, q \models p$ 当且仅当 $p \in \pi(q), p \in \Pi$; ② $S, q \models \neg \varphi$ 当且仅当 $S, q \not\models \varphi$; ③ $S, q \models \varphi \vee \phi$ 当且仅当 $S, q \models \varphi$ 或者 $S, q \models \phi$; ④ $S, q \models \langle\langle \Gamma \rangle\rangle \varphi$ 当且仅当存在一个策略集合 F_Γ , 对应于每个 $a \in \Gamma$, 使得对于所有的 $\lambda \in \text{out}(q, F_\Gamma)$, 有 $S, \lambda[1] \models \varphi$; ⑤ $S, q \models \langle\langle \Gamma \rangle\rangle \varphi$ 当且仅当存在一个策略集合 F_Γ , 对应于每个 $a \in \Gamma$, 使得对于所有的 $\lambda \in \text{out}(q, F_\Gamma)$, 有 $S, \lambda[u] \models \varphi$ 对所有的 $u \in \mathbb{N}$ 成立; ⑥ $S, q \models \langle\langle \Gamma \rangle\rangle \varphi \mathcal{A} \varphi$ 当且仅当存在一个策略集合 F_Γ , 对应于每个 $a \in \Gamma$, 使得对于所有的 $\lambda \in \text{out}(q, F_\Gamma)$, 存在某个 $u \in \mathbb{N}$ 使得 $S, \lambda[u] \models \varphi$ 而且对于所有 $0 \leq v < u, S, \lambda[v] \models \phi$; ⑦ $S, q \models K_a \varphi$ 当且仅当对所有的满足 $q \sim_a q'$ 的 $q', S, q' \models \varphi$; ⑧ $S, q \models E_\Gamma \varphi$ 当且仅当对所有的满足 $q \sim_\Gamma^E q'$ 的 $q', S, q' \models \varphi$; ⑨ $S, q \models D_\Gamma \varphi$ 当且仅当对所有的满足 $q \sim_\Gamma^D q'$ 的 $q', S, q' \models \varphi$; ⑩ $S, q \models C_\Gamma \varphi$ 当且仅当对所有的满足 $q \sim_\Gamma^C q'$ 的 $q', S, q' \models \varphi$

2 ATEL 的模型检测算法

由于认知算子是通过认知可达关系 (epistemic

accessibility relations) 定义的, Wooldridge 等^[5] 采用标准的解释系统 (interpreted systems) 模型来等价转化这些认知算子。给定一个状态 $q \in Q$ 和一个 agent $a \in \Sigma$, 用 $\text{state}_a(q)$ 表示 agent a 在状态 q 时局部状态 (local states), 我们就可以定义认知可达关系为 $q \sim_a q'$ 当且仅当 $\text{state}_a(q) = \text{state}_a(q')$ 。这样要检测 $S, q \models K_a \varphi$ 当且仅当对满足 $\text{state}_a(q) = \text{state}_a(q')$ 的所有 q' , 有 $S, q' \models \varphi$ 。为此要把一个抽象的 $\text{state}_a(q)$ 用一个具体的布尔常量 s 来表示, 即用形式化验证中的符号化方法编码一个状态。由 [4], 有

$$S, q \models K_a \varphi$$

$$\text{iff } S, q \models \langle\langle\rangle\rangle ((\text{state}_a = s) \rightarrow \varphi) \quad (\text{II})$$

这样的公式在 ATL 中表示为一个不变式的规范公式 (invariant formula), 进而可以用 MOCHA 软件进行检测了^[2]。

定理 1 $S, q \models K_a K_b \varphi$ iff $S, q \models \langle\langle\rangle\rangle ((\text{state}_a = s_a) \rightarrow \langle\langle\rangle\rangle ((\text{state}_b = s_b) \rightarrow \varphi))$ 。

证明 由 (II), $S, q \models K_a K_b \varphi$ iff $S, q \models \langle\langle\rangle\rangle ((\text{state}_a = s) \rightarrow K_b \varphi)$ iff

$$S, q \models \langle\langle\rangle\rangle ((\text{state}_a = s_a) \rightarrow \langle\langle\rangle\rangle ((\text{state}_b = s_b) \rightarrow \varphi))$$

对于两层以上的认知规范, 只需要反复应用 (II) 式即可。

定理 2 $S, q \models E_{\Gamma} \varphi$ iff $S, q \models \bigcap_{i \in \Gamma} \langle\langle\rangle\rangle ((\text{state}_i = s_i) \rightarrow \varphi)$ 。

证明 根据模态词 E_{Γ} 的定义, $E_{\Gamma} \varphi = \bigcap_{i \in \Gamma} K_i \varphi$, 然后再应用 (II) 式即可。

定理 3 $S, q \models D_{\Gamma} \varphi$ iff $S, q \models \langle\langle\rangle\rangle ((\bigcap_{i \in \Gamma} (\text{state}_i = s_i)) \rightarrow \varphi)$

证明 根据分布式认知算子的语义^[5], $D_{\Gamma} \varphi$ 表示 Γ 中所有智能体拥有的信息的交能够推出 φ , 结合 (II) 式, 可以得到结论。

对于最复杂的公共知识算子 C_{Γ} , 我们先假设一个最简单的情形即 $\Gamma = \{a, b\}$, 也就是只有两个智能体的情况, 然后再把这种证明方法推广到任意 n 个智能体的情形中去。

定理 4 $S, q \models C_{\Gamma} \varphi$ iff $(\text{state}_a = s_a) \Leftrightarrow (\text{state}_b = s_b)$ 且 $S, q \models \langle\langle\rangle\rangle ((\text{state}_a = s_a) \rightarrow \varphi)$ 成立。

证明 根据公共知识的定义^[5], $C_{\Gamma} \varphi$ 当且仅当对所有的有限序列 $\{i_1, \dots, i_n\} \in \{a, b\}^*$, 有 $S, q \models K_{i_1} \dots K_{i_n} \varphi$, 这里直接根据认知算子可达关系的语义, $K_a K_b \varphi$ 语义上表示 $(s_a \rightarrow s_b) \wedge (s_b \rightarrow \varphi)$, 而同理, $K_b K_a \varphi$ 可以等价于 $(s_b \rightarrow s_a) \wedge (s_a \rightarrow \varphi)$ 。再进一步, $K_b K_a K_b \varphi$ 可以等价于 $(s_b \rightarrow s_a) \wedge (s_a \rightarrow s_b) \wedge (s_a \rightarrow \varphi)$, $K_a K_b K_a \varphi$ 可以等价于 $(s_a \rightarrow s_b) \wedge (s_b \rightarrow s_a) \wedge (s_b \rightarrow \varphi)$, 照此类推, 可以得到 $(\text{state}_a = s_a) \Leftrightarrow (\text{state}_b = s_b)$ 且 $S, q \models \langle\langle\rangle\rangle ((\text{state}_a = s_a) \rightarrow \varphi)$ 成立。

那么对于任意 n 个 agent 组成的 Γ , 可以把上述结论类推就行了。

3 结 论

本文研究了 ATEL 中所有的认知算子的检测算法问题, 未来工作可以在以下几个方面, 比如 ATL 中加入另外的非经典规范逻辑如 BDI 的检测问题^[6], 另外还有相关的复杂性讨论, 完备公理的建立问题等^[7]。

参考文献:

- [1] ALUR R, HENZINGER T A, KUPFERMAN O. Alternating-time temporal logic[J]. J ACM, 2002, 49(5): 672 - 713.
- [2] ALUR R, HENZINGER T A, HENZINGER T A, et al. MOCHA: Modularity in Model Checking. CAV, 1998: 521 - 525.
- [3] WOOLDRIDGE M, ÅGOTNES T, DUNNE P E, et al. Logic for automated mechanism design - A Progress Report[R]//AAAI 2007: 9 - 15.
- [4] Van der HOEK W, WOOLDRIDGE M. Cooperation, knowledge and time: alternating-time temporal epistemic logic and its applications[J]. Studia Logica, 2003, 75(1): 125 - 157.
- [5] HALPERN J Y, FAGIN R, MOSES Y, et al. Reasoning About Knowledge[M]. MIT Press, 1995.
- [6] SU K, SATTAR A, WANG K, et al. Observation-based Model for BDI-Agents[C]. AAI 2005: 190 - 195.
- [7] Van der HOEK W, LOMUSCIO A, WOOLDRIDGE M. On the complexity of practical ATL model checking [C]//AAMAS 2006: 201 - 208.