

多智能体认知解释诊断类

余泉^{1,2} 常亮²

(黔南民族师范学院数学与统计学院 都匀 558000)¹

(桂林电子科技大学广西可信软件重点实验室 桂林 541004)²

摘要 解释诊断是基于模型诊断研究领域的一个重要分支。针对认知解释诊断的可判定的片段,给出了认知解释诊断类的定义,并给出了一个求解唯一认知解释诊断类的算法。

关键词 认知规划,解释诊断,认知解释诊断类,多智能体系统

中图分类号 TP18 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.07.044

Multi-agent Epistemic Explanatory Diagnosis Class

YU Quan^{1,2} CHANG Liang²

(School of Mathematics and Statistics, Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun 558000, China)¹

(Guangxi Key Laboratory of Trusted Software, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)²

Abstract Explanatory diagnosis is an important branch of model-based diagnosis. Based on the decidable fragments of epistemic explanatory diagnosis, we presented the notion of epistemic explanatory diagnosis class, and gave an algorithm of unique epistemic explanatory Diagnosis class within the decidable fragment.

Keywords Epistemic planning, Explanatory diagnosis, Epistemic explanatory diagnosis class, Multi-agent system

1 引言

解释诊断的主要思想是根据背景理论生成一个动作序列来解释当前的观察,它是基于模型诊断研究领域的一个分支。McIlraith 使用情景演算为动态系统建模^[1-2],定义了解释诊断(Explanatory Diagnosis)、修复和测试等概念。一个解释诊断是解释当前观察的动作序列。情景演算是一种表示动态变化世界的二阶多类型语言,主要用于描述动作的形式逻辑框架,也是一个描述动态系统的逻辑工具。其最大优势是,在一个环境中,给定一个目标,agent 能够自主进行动作推理,实现目标,而且具有很强的表达能力。Sohrabi 等人将 McIlraith 定义的解释诊断问题转化为规划问题求解^[3],而且还定义了动态系统的基于单智能体的偏好解释(Preferred Explanations)^[4],并将其转化为规划问题求解;同时讨论了偏好解释的存在性及计算偏好解释的复杂性问题,他们指出生成一个观察的解释只需要对应规划问题解的线性时间复杂度。与 McIlraith 等人的工作相似,GeroIwan 将情景演算作为描述语言,对基于历史的诊断模块这一概念进行了形式化^[5],其主要思想是针对智能主体自己执行动作序列中出现的不一致,如何在假设空间中找到一个动作序列,使其被执行完后与当前的观察一致。Stephan Gspandl 等人将 GeroIwan 的基于历史的诊断思想用到高级智能体程序控制中,使得智能体完成任务的百分率显著提高^[6]。

动态认知逻辑^[7]旨在刻画智能体的动作及其知识、信念间的相互作用,其基本思想是对认知逻辑进行扩充以对应于认知动作的模态算子。在多智能体论域中,不同智能体对同一动作可能有不同的视角,例如,某一智能主体执行的动作对其他智能体来说可能是部分可观察甚至是不可观察的。Baltag 等人^[8-9]引入了一个被称为动作模型(Action Model)的结构来表示不同智能体的不同视角,他们定义了认知模型和动作模型上的一个乘积操作,其结果是反映动作执行效果的一个新的认知模型,同时还提出了动作模型逻辑以对动作模型及其在智能体认知状态上的效果进行推理。Van Benthem 等人^[10]把动作模型推广到更新模型(Update Model),使得每个动作也有一个后置条件,这样更新模型不仅可以表示认知动作,也可以表示物理动作。

Löwe 等人将动态认知逻辑作为知识表示工具,给出了基于对抗的多智能体的认知规划的定义^[11],并证明了当所有的动作模型都只有前提条件而没有后继条件,所有的动作满足交换性和自吸收性,并且动作模型中每个智能体的可达关系都是传递关系时,规划问题是易处理的(Tractable),即在多项式时间的可计算。Bolander 与 Andersen 定义了同时具有认知动作和物理动作条件下的多智能主体认知规划问题及其解的概念^[12],并证明了以下几个关于判定性的结论:1)单智能主体的认知规划问题可判定;2)即使没有 Common know-ledge,3个或多于3个智能主体的认知规划问题都不可

到稿日期:2016-03-01 返修日期:2016-05-31 本文受国家自然科学基金项目(61463044,61363030),贵州省科技厅项目(LH[2014]7421),广西自然科学基金(2015GXNSFAA139285),广西可信软件重点实验室开放课题资助。

余泉 男,博士,教授,主要研究方向为描述逻辑、模态逻辑,E-mail:yuquanlogic@126.com;常亮 男,博士,教授,主要研究方向为描述逻辑,E-mail:changli@guet.edu.cn(通信作者)。

判定;3)2个智能主体带有 Common knowledge 的认知规划问题不可以判定。

现实世界中常常是多个智能体以复杂的方式进行交互。例如:在两个独立的房间中分别有两个独立的智能体 Ann 与 Bob,每个房间具有一盏灯,Ann 和 Bob 的房间中都分别有一个控制其房间中那盏灯的开关。Bob 所在房间中的灯同时受到 Ann 房间中的另外的一个开关的控制;而且 Bob 所在的房间中有联系 Ann 的通信装置。在这样的系统中,当 Bob 房间的灯突然不亮时,存在以下几种可能:1)灯坏了;2)停电了;3)线路出现了故障;4)Ann 按下了能控制 Bob 房间的灯的开关;5)Bob 不小心按下了自己房间里的开关,但是他没有意识到。Bob 若要知道真正导致灯突然熄灭的原因,需要针对以上情况逐步检查。实际上,BoB 需要计算出一个动作序列来解释他房间中灯不亮的原因。可见这样的动作序列存在多个,我们关心的是哪一个才是历史上真正发生了的动作序列?

以上的例子在生活中普遍存在。借助动态认知逻辑中的基本概念及已有的研究结果,对 McIlraith 提出的解释诊断进行多智能主体扩展具有理论和现实研究意义。因为智能主体的信息不完全,即它对于整个系统的部分可观察能力,所以智能主体对一个观察可能有多个认知解释诊断。如医生给病人看病时,对于一个病状,刚开始会怀疑多个病因;又如断案过程中,最开始的嫌疑犯往往存在多个等。但事实上只有一个动作序列是真正发生的,即智能主体真正想要的那个认知解释诊断。本文将用以下例子贯穿全文。

一个办公室里 Ann, Bob 和 Carl 3 个人,他们共用一张办公桌,每人有一个抽屉。Ann 的抽屉中有一包名贵的香烟,只有他们 3 人知道。Ann 从离开办公室到再次回来期间没有其他人进入过办公室,Ann 打开抽屉发现他的香烟不见了,Ann 想知道发生了什么。

余泉等人在文献[1-4, 11-12]的基础上对多智能主体认知解释诊断这一概念进行了形式化^[14];并使用认知状态空间有限或者认知动作序列有限作为认知解释诊断解的存在性问题可判定的条件,找到了可判定的一些条件;他们还指出,其结果针对文献[11-12]中提出的认知规划也适用。

本文在介绍动态认知逻辑的语法和语义之后,介绍了多智能主体认知规划的定义;然后对余泉等人^[14]用动态认知逻辑作为工具对多智能主体认知解释诊断的概念进行形式化,对多智能主体认知解释诊断与多智能主体认知规划之间的关系等做了介绍。本文针对余泉等人^[14]的可判定结果中的一个可判定片段,给出了一个求多智能主体唯一认知解释诊断类的算法。其中,提出认知解释诊断类和给出求解唯一认知解释诊断类的算法是本文的主要贡献。

2 动态认知逻辑及多智能主体认知规划

本节主要回顾动态认知逻辑的语法、语义、动作模型对认知状态的更新操作及多智能主体认知规划的定义。

2.1 动态认知逻辑

定义 1 设 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 表示所有命题原子组成的集合,用 $\Lambda = \{a, b, \dots\}$ 表示智能主体的集合,则语言 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 上的合式公式的生成法则为: $\Phi = p \mid \perp \mid \neg \Phi \mid \Phi \wedge \Psi \mid K_a \Phi \mid$

$C\Phi$, 其中 $p \in P, a$ 表示智能主体。

定义 2 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的一个模型一般表示为 $M = (W, R, V)$, 其中 W 称为可能世界集,每一个可能世界可以理解为对所有的命题原子的一次赋值。函数 R 对每一个智能主体 a 赋予一个可达关系 R_a 。 R_a 表示可能世界之间的关系,在认知逻辑中常常规定为等价关系。 V 称为赋值函数,它是从 P 到 2^W 的映射。对于 P 中使用到的任意原子 $p_i, V(p_i) \in 2^W$, 表示所有使得 p_i 为真的可能世界的集合。

定义 3 设 $M = (W, R, V)$ 为一个模型,归纳定义合式公式 ϕ 在可能世界 w 中的可满足性:

- $M, w \models p_i$, 当且仅当 $w \in V(p_i)$;
- $M, w \models \neg \phi$, 当且仅当 $M, w \not\models \phi$;
- $M, w \models \phi \wedge \psi$, 当且仅当 $M, w \models \phi$ 且 $M, w \models \psi$;
- $M, w \models K_a \phi$, 当且仅当 $\forall v \in W$, 若 $wR_a v$, 则 $M, v \models \phi$;
- $M, w \models C\phi$, 当且仅当 $\forall v \in W$, 如果 $w(\bigcup_{a \in \Lambda} R_a)^* v$, 则 $M, v \models \phi$ 。

注:对于一个合式公式 ϕ , 如果存在一个模型 M 的一个可能世界 w , 使得 $M, w \models \phi$, 则称公式 ϕ 是可满足的。另外, R^* 表示关系 R 的传递闭包。

定义 4(局部与全局认知状态) 设 M 为 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的一个模型, $W_d \subseteq W$, 则序对 (M, W_d) 称为 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的一个认知状态。当 W_d 中只有一个元素时,称 (M, W_d) 为全局认知状态,否则如果 W_d 在智能主体 a 的可达关系 R_a 下封闭,则称 (M, W_d) 为智能主体 a 的局部认知状态。

注: W_d 在智能主体 a 的可达关系 R_a 下封闭的含义是: $\forall w, v (w \in W_d \wedge wR_a v \rightarrow v \in W_d)$ 。全局认知状态表示可能的当前世界只有一个。然而在多智能主体系统中,各个智能体的知识有限,常常对系统或者它所在的环境不完全观察,所以智能体常认为有多个可能的世界,他对这些可能世界不可区分。但常常假设真实世界属于 W_d 。

设 (M, W_d) 为 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的一个认知状态, ϕ 为 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的一个合式公式,则 $(M, W_d) \models \phi$ 当且仅当 $\forall w \in W_d, M, w \models \phi$ 。值得注意的是,对于智能体 a 的一个局部状态 (M, W_d) , 由于 R_a 自反,且 W_d 在 R_a 封闭,因此不难验证:对于 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的任意一个合式公式 $\phi, (M, W_d) \models K_a \phi$ 当且仅当 $(M, W_d) \models \phi$ 。

例 1 在前文的香烟例子中,用命题 p_a, p_b, p_c 分别表示香烟在 Ann, Bob 和 Carl 的抽屉中, p_d 表示香烟在桌面上。则初始状态 s_0 中只有一个可能世界 $w_0, w_0 \in V(p_a)$, 3 个智能主体的可达关系都是自反关系。

定义 5(事件模型) $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的一个事件模型为 $N = (E, \rightarrow, pre, post)$, 其中 E 为基本事件的集合;函数 $\rightarrow: \Lambda \rightarrow 2^{E \times E}$ 给每一个智能主体定义一个可达关系;函数 $pre: E \rightarrow L_{KC}(P, \Lambda)$ 给每一个基本事件定义一个前提条件;函数 $post: E \rightarrow L_{KC}(P, \Lambda)$ 给每一个基本事件定义一个后继条件。

注:如果一个事件模型中无后继条件函数,即事件模型为 $N = (E, \rightarrow, pre)$, 则称事件模型 N 为认知事件模型;更进一步,如果认知事件模型 N 中的 pre 函数对每个基本事件指定的公式都是命题逻辑中的公式,则称 N 为命题认识事件模型。

定义 6(局部与全局动作状态) 设 N 为 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的一

个事件模型, $E_d \subseteq E$, 则称有序对 $\epsilon = (N, E_d)$ 为 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的一个动作状态, 简称动作。当 E_d 中只有一个元素时, 称 ϵ 为全局动作, 否则如果 E_d 在智能主体 a 的可达关系 \rightarrow_a 下封闭, 则称 ϵ 为智能主体 a 的局部动作。

还可以在动作模型中加入事件执行人和执行事件花费两个参数, 新的动作模型定义如下。

定义 7(认知动作模型) 一个认知动作模型为 $\epsilon = (N, e, actr, cost)$, 其中 N 是事件模型; $e \in E$ 是当前事件; 对每一个 $e \in E, actr(e) \in \Lambda$ 是基本事件 e 的执行者; 对每一个 $e \in E, cost(e)$ 为一个实数, 是执行基本事件 e 的花费。

给定 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的一个认知状态 (M, W_d) 和一个动作 $\epsilon = (N, E_d), \epsilon$ 在 (M, W_d) 可执行, 如果 $\forall w \in W_d$, 至少存在一个事件点 $e \in E_d$, 满足 $(M, w) \models pre(e)$ 。对于一个动作模型 $\epsilon = (N, E_d)$, 如果 N 是(命题)认知事件模型, 则称 $\epsilon = (N, E_d)$ 为(命题)认知动作模型。

例 2 考虑前文的香烟例子, 为描述当 Ann 不在办公室时 Bob 把香烟从 Ann 的抽屉里拿到桌面上这一动作, 使用动作模型 $\epsilon_1 = (N_1, e_1, actr, cost)$, 其中 $N_1 = (E, \rightarrow, pre, post)$, $E = \{e_T, e_1\}, pre(e_1) = p_a, pre(e_T) = ture, post(e_1) = \neg p_a \wedge p_d, \rightarrow_a = \{(e_1, e_T), (e_T, e_1)\}, \rightarrow_b = \rightarrow_c = \{(e_1, e_1), (e_T, e_T)\}。actr(e_1) = actr(e_T) = b, cost(e_1) = 1, cost(e_T) = 0$ 。用图表示事件模型 N_1 和动作模型 ϵ_1 , 如图 1 所示。

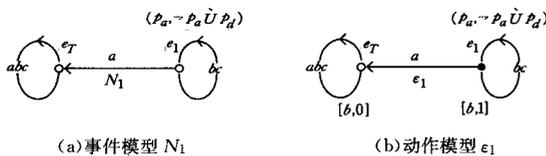


图 1

定义 8(更新操作) 给定 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的一个认知状态 (M, W_d) 和一个动作 $\epsilon = (N, E_d), \epsilon$ 对 (M, W_d) 的更新记为 $(M, W_d) \otimes \epsilon = (\bar{W}, \bar{R}, \bar{V}, \bar{W}_d)$, 其中: $\bar{W} = \{(w, e) \in W \times E \mid M, w \models pre(e)\}, \bar{R}_a = \{((w, e), (v, f)) \in \bar{W} \times \bar{W} \mid wR_a v \wedge e \rightarrow_a f\}, \bar{W}_d = \{(w, e) \in \bar{W} \mid w \in W_d \wedge e \in E_d\}, \bar{V}(p) = (\{(w, e) \in \bar{W} \mid M, w \models p\} - \{(w, e) \in \bar{W} \mid post(e) \models \neg p\}) \cup \{(w, e) \in \bar{W} \mid post(e) \models p\}$ 。

性质 1 如果 (M, W_d) 为局部认知状态, $\epsilon = (N, E_d)$ 是局部动作, 则 $(M, W_d) \otimes \epsilon$ 为局部认知状态。

性质 2 $(M, W_d) \otimes \epsilon$ 中对每个智能主体的可达关系都是等价关系, 当且仅当 (M, W_d) 与 $\epsilon = (N, E_d)$ 中对每个智能主体的可达关系都是等价关系。

例 3 考虑例 1 中的初始认知状态 s_0 和例 2 中的动作 ϵ_1 , 由于 $s_0 \models p_a$, 因此 ϵ_1 在 s_0 执行。 ϵ_1 对 s_0 的更新记为 s_1 , 是一个新的认知状态, 具有两个可能世界 $(w_0, e_T), (w_0, e_1)$, 3 个智能主体的可达关系和 ϵ_1 中的相同, $\{(w_0, e_T)\} = V(p_a), \{(w_0, e_1)\} = V(p_d)$ 。更新过程如图 2 所示。

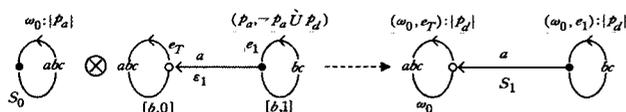


图 2 更新过程

注: 另外一种定义局部认知状态的方法是引入一个新的

可达关系 R_d 和一个新的可能世界 w_0 , 使得 $w_0 R_d w$ 当且仅当 $w \in W_d$, 从而局部认知状态就可以变为 (M, w_0) 形式的全局状态。局部动作也可以用同样的方法进行转化。不失一般性, 假设以下用到的认知状态和认知动作都是用此方法得到的全局认知状态和全局动作。现在给出下文中需要用到的认知状态之间的互模拟关系的定义。

定义 9(互模拟关系) 设 $s = (M, w)$ 和 $s' = (M', w')$ 是两个认知状态, 其中 $M = (W, R, V), M' = (W', R', V')$ 。 s 与 s' 间的互模拟关系 $\rho \subseteq W \times W'$ 满足以下条件: $w \rho w'$, 对任意的 u, u' , 若 $u \rho u'$, 则 $\forall p_i \in P, M, u \models p_i$, 当且仅当 $M', u' \models p_i$; 并且满足下列两个条件:

- 1) 对任意的智能主体 a , 如果 $u R_a v$, 则存在一个 v' 使得 $u' R_a' v', v \rho v'$;
- 2) 对任意的智能主体 a , 如果 $u' R_a' v'$, 则存在一个 v 使得 $u R_a v, v \rho v'$ 。

如果认知状态 s 与 s' 间存在一个互模拟关系 ρ , 则 s 与 s' 互模拟, 记为 $s \Theta s'$ 。

2.2 多智能主体认知规划

正如 Bolander 与 Andersen 所指出, 认知规划不仅可以处理经典的多智能主体的规划中不确定性动作效果和智能主体对状态的部分可观察, 还可以处理智能主体带有知识的情况, 这是经典的多智能主体的规划理论框架不能表示的^[12]。所以多智能主体的认知规划更具一般性, 能表示更多的规划问题, 但这个研究领域才刚刚开始, 认知规划问题和认知规划解的定义都还需要系统地讨论, 如多个智能体是合作还是竞争, 他们是完成一个共同的目标还是每个智能主体完成自己的目标等。以下介绍文献^[12]中的相关定义。

定义 10(认知规划域) 给定 $L_{KC}(P, \Lambda)$, 其上的一个认知规划域为 $\Sigma = (S, \Delta, \gamma)$, 其中: S 为 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 上的可数多个认知状态的集合; Δ 为 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 上有限多个动作的集合; $\gamma: S \times \Delta \rightarrow S$ 为一个状态转移函数, 如果 ϵ 在 s 上可执行, 则 $\gamma(s, \epsilon) = s \otimes \epsilon$ 。如果 $|\Lambda| = 1$, 则称 $\Sigma = (S, \Delta, \gamma)$ 为单智能体认知规划域。

定义 11(认知规划问题) 给定 $L_{KC}(P, \Lambda)$, 其上的一个认知规划问题为 (Σ, s_0, φ_g) , 其中 Σ 为 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 上的一个认知规划域, s_0 为规划问题的初始状态, φ_g 为规划问题的目标公式。目标状态集 S_g 为满足 φ_g 的所有状态集合。如果 $|\Lambda| = 1$, 则称 (Σ, s_0, φ_g) 为单智能体认知规划问题。

定义 12(认知规划解) 认知规划问题 (Σ, s_0, φ_g) 的一个解为一个可以执行的动作序列 σ , 满足 $s_0 \otimes \sigma \models \varphi_g$ 。

注: 假设 $\sigma = \bar{\sigma}\epsilon$, 则 $s_0 \otimes \sigma = s_0 \otimes (\bar{\sigma}\epsilon) = (s_0 \otimes \bar{\sigma}) \otimes \epsilon$ 。

3 多智能主体认知解释诊断

本节将介绍多智能主体认知解释诊断的形式化定义, 说明多智能主体认知解释诊断问题对应于上述给出的认知规划问题, 阐述文献^[14]中的一个可判定性结果。

3.1 多智能主体认知解释诊断

定义 13(认知解释诊断问题) 给定 $L_{KC}(P, \Lambda)$, 其上的一个认知解释诊断问题为 $P = (M^a, \Delta, O^a)$, 其中, M^a 为智能主体 a 原有的认知状态; Δ 为 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 上有限多个动作的集合; O^a 为智能主体 a 的观察, 满足 $M^a \models O^a$ 。

直观上,一个认知解释诊断问题是:智能主体观察到一个现象,但他依据初始的认知状态在逻辑上推不出这个观察。这里的“初始的认知状态”需根据具体情况给出,如香烟的例子中是指 Ann 离开房间前。

定义 14(认知解释诊断) 一个认知解释诊断问题 $P=(M^a, \Delta, O^a)$ 的一个解(称为认知解释诊断)为一个可以执行的动作序列 σ , 满足 $M^a \otimes \sigma \models O^a$ 。

注:假设 $\sigma = \bar{\sigma}\epsilon$, 且 σ 在 M^a 可执行, 则: $M^a \otimes \sigma = M^a \otimes (\bar{\sigma}\epsilon) = (M^a \otimes \bar{\sigma}) \otimes \epsilon$ 。直观上讲一个动作序列可以执行, 当且仅当动作序列中的动作可以一个一个地依照顺序被执行。不难发现, 本文所提的多智能主体认知解释诊断实际上是单个智能主体在对他的观察进行诊断, 只不过他处在一个多智能主体系统的场景中。当然, 在系统的每一个智能主体的控制器中都可以加入一个诊断模块, 即每个智能主体都可以对他的观察进行诊断。另外一个有意思的定义是多个智能主体合作对他们共同的观察或者对某一个智能主体的观察进行解释诊断, 其类似于上述定义。

3.2 多智能主体认知解释诊断与认知规划的关系

根据以上对认知规划问题和认知解释诊断问题的定义, 不难发现一个认知解释诊断问题可以转化为一个认知规划问题。一个认知解释诊断问题 $P=(M^a, \Delta, O^a)$ 中的 M^a 可以看成是一个认知规划问题的初始状态, 而 O^a 则对应于规划问题的目标公式。认知规划问题不一定存在解, 当然也可能存在多个解, 这些解都还没有发生。而认知解释诊断问题一定存在解, 而且历史上真正发生了的动作序列只有一个, 这正是认知规划问题与认知解释诊断问题的核心区别。

定义 15(动作的合并) 对于给定 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的两个动作模型 $\epsilon_1=(N_1, e_d), \epsilon_2=(N_2, t_d), \epsilon_1$ 与 ϵ_2 的合并 $\epsilon_1 \oplus \epsilon_2 = \epsilon = ((E, \rightarrow, pre, post), (e_d, t_d))$, 其中: $E=E_1 \times E_2; pre((e, t)) = pre_1(e) \wedge [\epsilon_1, e]pre_2(t); \rightarrow_a = \{((e_1, t_1), (e_2, t_2)) | (e_1, e_2) \in \rightarrow_1 \wedge (t_1, t_2) \in \rightarrow_2\}$; 如果 $p \in dom(post(e, t))$, 而且满足 $dom(post(e, t)) = dom(post_1(e)) \cup dom(post_2(t))$, 则当 $p \notin dom(post_2(t)), post(e, t)(p) = post_1(e)(p)$, 否则 $post(e, t)(p) = [\epsilon_1, e]post_2(t)(p)$ 。其中 $dom(f)$ 表示函数 f 的定义域。对 $[\epsilon_1, e]post_2(t)(p)$ 的理解及本段话的详细意义请参考文献[7]。

注:多个动作 $\epsilon_1, \dots, \epsilon_n$ 的合并可以类似定义为 $(\dots(\epsilon_1 \oplus \epsilon_2) \dots \oplus \epsilon_n)$ 。

定义 16(动作的可交换性) 给定 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的两个动作模型 ϵ_1, ϵ_2 , 如果对于 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的任意的认知状态 M 都有 $((M \otimes \epsilon_1) \otimes \epsilon_2) \Theta ((M \otimes \epsilon_2) \otimes \epsilon_1)$, 则称 ϵ_1 与 ϵ_2 可交换。

定义 17(动作的自吸收性) 对于给定 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的动作模型 ϵ , 如果对于 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的任意的认知状态 M 都有 $(M \otimes (\epsilon \oplus \epsilon)) \Theta (M \otimes \epsilon)$, 则称 ϵ 具有自吸收性。

定义 18(动作的几乎互斥) 对于给定 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 的动作模型 ϵ , 如果 ϵ 含有的唯一基本事件点 e_T 满足 $pre(e_T) = true$, 且对于 Λ 中的任意智能体 $a, e_T \rightarrow_a e_T$, 在 ϵ 中除了 e_T 外的其他所有基本事件点的前提条件间两两不一致, 则称 ϵ 几乎互斥。

定理 1 命题认知动作模型间可交换。

注:定理 1 以及下面的定理 2 的证明见参考文献[11]。

定理 2 给定 $L_{KC}(P, \Lambda)$, 对于其上的任意认知动作模型 ϵ , 如果 ϵ 是几乎互斥的命题认知动作, 且 ϵ 中每个智能主体的可达关系是传递关系, 则 ϵ 具有自吸收性。

定理 3 对 $L_{KC}(P, \Lambda)$ 上的任意认知状态 (M, W_d) , 与任意的两个由满足几乎互斥和可达关系是传递关系的命题认知动作组成的动作序列 σ_1, σ_2 , 如果满足 $set(\sigma_1) = set(\sigma_2)$, 则 $(M \otimes \sigma_1) \Theta (M \otimes \sigma_2)$, 其中 $set(\sigma)$ 表示认知动作序列 σ 中包含的所有命题认知动作组成的集合。

证明:由于任意的动作都是命题认知动作, 因此由定理 1 可知任意两个动作可以交换。另外, 由于动作都满足几乎互斥, 而且每一个动作对每一个智能主体规定的可达关系都是传递关系, 因此由定理 2 知任意的动作都具有自吸收性, 于是由 $set(\sigma_1) = set(\sigma_2)$ 知 $\sigma_1 \equiv \sigma_2$, 从而 $(M \otimes \sigma_1) \Theta (M \otimes \sigma_2)$ 。

定理 4 给定 $L_{KC}(P, \Lambda)$, 其上的认知规划问题是可判定的, 如果所有的动作模型都是几乎互斥的命题认知动作, 且动作中对每个智能主体的可达关系都是传递关系。

证明:根据定理 3, 对于任何一个由有限多个认知动作生成的动作序列 σ_1 , 一定可以找到另外一个认知动作序列 σ_2 来代替它, 使得任何一个出现在 σ_1 中的认知动作在 σ_2 中只出现一次。因此, 对于任何一个含有有限多个满足定理条件的动作的认知规划问题, 在互模拟的意义下不同的认知动作序列的个数有限, 而且每一个认知动作序列的长度有限, 从而一定能在有限步之内判定该认知规划问题是否有解。

注:文献[11]并没有对本文的定理 4 进行明确阐述, 本文给出其证明。根据以上说明, 余泉等人[14]得到认知解释诊断问题的一个可判定性结果。

定理 5 给定 $L_{KC}(P, \Lambda)$, 其上的认知解释诊断问题是可判定的, 如果所有的动作模型都是几乎互斥的命题认知动作, 且动作中对每个智能主体规定的可达关系都是传递关系。

注:满足定理 5 前提条件的认知解释诊断问题可判定, 是因为所有可能的动作序列空间有限, 以下算法都是在满足该定理的前提条件下讨论的。另外, 直觉上也许会认为这个结果的限制较强, 因为其中的一个要求是所有出现的动作都是命题认知动作, 即要求出现的动作的每一个基本事件点都没有后继条件, 而且前提条件中不容许出现模态算子。但事实上, 在认知世界中本结论的适用范围是非常广泛的, 例如: Ann, Bob 和 Carl 3 个人有一个共同的秘密, 但是有一天 David 告诉 Ann, 他知道了他们的秘密, Ann 知道一定是 Bob 或者 Carl 泄密了, 但他不确认是谁。

4 多智能主体唯一认知解释诊断类的算法

本节将给出两个算法, 第一个算法讨论针对一个认知解释诊断问题, 如何求出所有可能的备选认知解释诊断集合。在详细定义和讨论唯一认知解释诊断类的基础上, 第二个算法讨论如何计算出历史上真正发生的那个动作序列在其中的认知解释诊断类。

4.1 多智能主体认知解释诊断的算法

对于多智能主体认知解释诊断的可判定片断, 我们关心的第一个问题是对于给定的一个多智能主体认知解释诊断问题, 如何计算其所有认知解释诊断。由于所有可能的动作序列空间有限, 一个简单的想法是对所有的动作序列进行验证,

将该诊断问题的解的动作序列收集到一起即可。该思想的伪代码见算法 1。

算法 1 Calculate all explanatory diagnoses

Input: A diagnosis problem $\langle M^a, O^a \rangle$ and Π

Output: The set of all diagnoses Θ

```

1.  $\Theta \leftarrow \emptyset$ ;
2. for  $j \leftarrow 0$  to  $|\Pi|$  do
3.   for  $i \leftarrow 0$  to  $|\sigma_j|$  do
4.     if  $M_i^a \vdash \text{pre}(\epsilon_i)$  then
5.        $M_{i+1}^a \leftarrow M_i^a \otimes \epsilon_i$ ;
6.     else
7.       break;
8.     end
9.     if  $M_{i+1}^a \vdash O^a$  then
10.       $\Theta \leftarrow \Theta \cup \{\epsilon_0 \epsilon_1 \dots \epsilon_i\}$ ; break;
11.    else
12.       $i \leftarrow i+1$ ;
13.    end
14.  end
15.  $j \leftarrow j+1$ ;
16. end
17. return  $\Theta$ 

```

注:算法 1 中 Π 是由动作集中的元素所有可能组合得到的动作序列组成的集合, $\sigma_j \in \Pi$ 是动作序列空间中的一个元素, $\epsilon_i (i=1, 2, \dots, |\sigma_j|)$ 是动作序列 σ_j 中的一个动作。计算 $M_i^a \otimes \epsilon_i$ 和验证 $M_{i+1}^a \vdash O^a$ 都可以通过调用动态认知逻辑领域开发的工具 DEMO^[13] 来完成。 $M_0^a = M^a$, 在算法中不用检查 $M_0^a \vdash O^a$ 是否成立, 原因是 $\langle M_0^a, O^a \rangle$ 是一个诊断问题, 所以 $M_0^a \not\vdash O^a$ 。由于 Π 中的动作序列只有有限多个, 而且每个动作序列的长度有限, 因此算法 1 一定会停机。对于 θ 中的任何一个动作序列 $\delta = \epsilon_0 \epsilon_1 \dots \epsilon_{|\delta|-1}$, 由于 $M_0^a \vdash O^a$, 因此 δ 一定是一个认知解释诊断, 即算法 1 具有可靠性。另外, 由于算法 1 穷尽了所有可能的动作序列, 因此诊断问题的任何一个认知解释诊断一定可以通过算法 1 求出, 即算法 1 具有完备性。

4.2 多智能体唯一认知解释诊断类的一个算法

根据 4.1 节的讨论, 可以用算法 1 计算出认知解释诊断问题的所有可能的备选认知解释诊断, 但事实上只有一个认知解释诊断是历史上真正发生的。不难想像, 在多数情况下认知解释诊断问题的备选解释诊断不唯一, 而智能主体通常需要知道历史真正发生了什么, 即要求出实际发生的动作序列。如医生治病需要知道真正的病因, 断案需要知道真正的犯罪人等。在进一步讨论之前, 先给出如下的概念。

定义 19(认知动作序列类) 给定 $L_{KC}(P, \Lambda)$, 把被执行完后所有智能主体的认知状态和世界状态相同的动作序列放在一起, 称为一个动作序列类。若两个动作序列 σ_1, σ_2 属于同一个动作序列类, 则记为 $\sigma_1 \sim \sigma_2$ 。

如在香烟的例子中, Bob 或 Carl 把香烟从 Ann 的抽屉里拿到桌面上, 再把香烟从桌面上放到自己的抽屉里, 这两个动作序列导致的世界状态是不一样的。在另外的一个例子中, 观察以下两个动作序列: 1) Bob 把香烟从 Ann 的抽屉里拿到桌面上, 再把香烟从桌面上放到 Ann 的抽屉里, 然后 Carl 把香烟从 Ann 的抽屉里拿到桌面上, 再把香烟从桌面上放到自

己的抽屉里; 2) Carl 把香烟从 Ann 的抽屉里拿到桌面上, 再从桌面上把香烟放到自己的抽屉里。

不难发现: 1) 与 2) 这两个动作系列所导致的当前的世界状态和每个智能主体的认知状态是一样的, 这两个动作序列实际上都表明 Carl 把香烟放到了自己的抽屉里, 而这正是 Ann 所想知道的。将他们看成同一类也就变得合理了。

定义 20(认知解释诊断类) 给定 $L_{KC}(P, \Lambda)$, 其上的一个认知解释诊断问题 $P = \langle M^a, \Delta, O^a \rangle$ 的认知解释诊断类定义为 $[\sigma] = \{\sigma_i \mid \sigma_i \sim \sigma\}$, 满足 $\forall \sigma_i \in [\sigma], M^a \otimes \sigma_i \vdash O^a$ 。

注: 一个解释诊断问题可能存在多个认知解释诊断类, 但历史上真正发生的动作序列只能在一个认知解释诊断类中。正如前文所述, 多数实际情况下, 智能体只要求出认知解释诊断类。使用认知解释诊断类的另外一个原因是到目前为止还未设计一个算法来区分认知解释诊断类中的动作序列; 另外, 对于一个认知解释诊断类而言, 如果历史上真正发生的动作序列在这样一个类中, 我们更相信是长度较小的那个动作序列发生了。假设下文中提到的认知解释诊断是一个认知解释诊断类中长度最小的那个动作序列, 称之为代表元。由于等价类与代表元选择无关, 因此如果相互区分了所有认知解释诊断类的代表元, 则等价于区分了这些认知解释诊断类。

每一个动作序列的发生都要么会使得一些原子命题的值发生改变, 要么会改变某些智能主体的知识。可以将这些命题的改变和智能主体的知识的改变用一个公式进行表示。由于不同的动作序列类会导致不同的改变, 因此可以假设对每个动作序列类都事先给定了一个公式(不妨称之为特有公式), 于是公式能够相互区分不同的动作序列类。假设所有的备选认知解释诊断类的代表元组成的集合 $\theta = \{\delta_i \mid i=1, 2, \dots, |\theta|\}$ 中的每一个代表元(备选认知解释诊断) δ_i 对应的特有公式为 Γ_i , 如前文中描述, Carl 把香烟放到自己的抽屉里这一动作序列类的代表元的特有公式就是 p_c (香烟在 Carl 的抽屉中)。

定理 6 在认知解释诊断类定义的保证下, 对每一个认知解释诊断类 $[\sigma_i]$ 都存在一个特有公式 Γ_i , Γ_i 在其他认知解释诊断类被执行结束后的认知状态中不被满足。

证明:(反证法)假设对于 $[\sigma_i]$ 的特有公式 Γ_i , 存在另外的一个认知解释诊断类 $[\sigma_j]$ 使得 $M^a \otimes \sigma_j \vdash \Gamma_i$, 则根据认知解释诊断类的定义知 $\sigma_j \in [\sigma_i]$, 矛盾。

对于一个认知解释诊断问题 $P = \langle M^a, \Delta, O^a \rangle$, 假设从智能主体 a 的观察的每个认知解释诊断类中取出一个代表元, 组成的集合为 $\theta = \{\delta_i \mid i=1, 2, \dots, |\theta|\}$, 而每个集合中的每一个元素都已经通过算法 1 计算出来, 并且描述多智能主体系统中使用的原子命题只有有限多个。一个显然的事实是, 如果 δ_i 是真正发生的那个动作序列所在类的代表元, 则 Γ_i 应该在执行完 δ_i 的当前世界状态中成立, 如果通过测试动作(Test action, Test action 的具体语法和语义定义请参考文献[7])发现 Γ_i 取值为假, 则 δ_i 不是真正发生的那个动作序列所在类的代表元。根据以上假设和论述, 得到算法 2 的基本思想(称为反驳排除法)。

首先, 把对应于 $\theta = \{\delta_i \mid i=1, 2, \dots, |\theta|\}$ 的所有特有公式 $\Gamma_i (i=1, 2, \dots, |\theta|)$ 合并在一起得到的新集合, 记为 Γ , 依次对 Γ 中的公式 $\Gamma_i (i=1, 2, \dots, |\theta|)$ 进行测试, 若 $K_a[? \Gamma_i]$ 在 $M^a \otimes$

δ_i 为假, 即 $M^a \otimes \delta_i \not\models K_a[? \phi_i]$, 则从备选认知解释诊断类的代表元的集合中删除 δ_i , 继续测试 Γ_{i+1} , 直到备选认知解释诊断类的代表元的集合中只剩下一个元素为止。如果 $K_a[? \Gamma_i]$ 在 $M^a \otimes \delta_i$ 为真, 则 δ_i 即为所求。以下是算法 2 的伪代码:

算法 2 Calculate the real epistemic explanatory diagnosis

Input: The set of all candidate diagnoses Θ , the set Γ

Output: The real epistemic explanatory diagnoses REED

```

1. While ( $|\Theta| > 1$ )
2. {
3. for  $j \leftarrow 1$  to  $|\Theta|$  do
4. if  $M^a \otimes \delta_j \not\models K_a[? \Gamma_j]$  then
5.    $\Theta \leftarrow \Theta - \delta_j$ ;
6. else
7.   REED  $\leftarrow \delta_j$ ;
8.   break;
9. end
10.  $j \leftarrow j + 1$ ;
11. end
12. }
13. REED  $\leftarrow \Theta$ 
14. return REED

```

注: 由于假设每个动作序列的特有公式能彼此地区分动作系列空间中的元素, 因此 Γ 中所有公式在一起能两两区分所有的备选认知解释诊断集类的代表元的集合 $\theta = \{\delta_i \mid i = 1, 2, \dots, |\theta|\}$; 另外, 由定理 6 知, 每一个认知解释诊断类 $[\sigma_i]$ 都存在一个特有公式 Γ_i , Γ_i 在其他任何认知解释诊断类被执行结束后的认知状态中是不被满足的。从而一定会通过算法 2 求出真正发生的认知解释诊断类, 而且算法 2 返回的值一定是那个真正发生了的动作序列类的代表元。由于备选认知解释诊断类的代表元组成的集合 $\theta = \{\delta_i \mid i = 1, 2, \dots, |\theta|\}$ 有限, 而且每一个备选认知解释诊断类的代表元的长度有限, 因此给出的算法 2 一定会停机。

结束语 本文在介绍余泉等人^[14]对 McIlraith 的解释诊断进行的多智能主体扩展的基础上, 针对一个可判定结果设计了一个求唯一认知解释诊断类的算法。本文只给出了一个算法框架, 没有真正实现算法, 下一步将利用一些有意义的例子来实现算法, 并讨论认知解释诊断在多智能主体对话系统等研究问题中的应用。当然, 所提算法框架也适用于其他一些可判定的认知解释诊断片断。

本文是针对这个问题的初步工作, 还有许多有意义的工作值得探讨, 如在余泉等人^[14]的基础上给出其他的一些可判定性片断。一般有两方面的思路: 1) 对语言的限制。Bolander 与 Andersen 的工作^[12]告诉我们 3 个或多于 3 个智能主体的认知规划问题不可判定, 即使没有 Common knowledge, 2 个智能主体的认知规划问题也不可判定。两个智能主体不含 Common knowledge 是否可判定, 至今还是一个公开问题。Aucher 与 Bolander 最近证明普遍意义下(动作模型和语言不做限制)的认知规划只有单智能主体的 S5 和 K45 可判定, 其他情况都不可判定^[15]。上述认知规划中的不可判定性结果对应到认知解释诊断中也成立? 2) 对动作模型的限制。

Löwe 等人的工作^[11]就以限制动作为出发点, 是否可以参照这条思路得到一些其他的可判定性片断? Bolander 等人^[16]证明了只容许命题认知动作出现时, 多智能主体认知规划问题的解的存在性问题的计算复杂性为 EXPSpace。而如果进一步对动作进行限制, 只容许动作对应的图为树或者链时, 多智能主体认知规划问题的解的存在性问题的计算复杂性为 PSPACE-complete (NP-complete)。从某种角度上讲, 计算机科学关心的是可判定性的结果, 对不可判定的结果则不太感兴趣, 因为不太会关心一个理论上不可计算的问题。而对于可计算的问题, 我们关心的是如何快速地实现算法。在实现认知规划器方面, Muise 等人^[17]给出了调用经典规划器来解决受限的多智能主体认知规划问题的方法, 并做了大量的实验。中山大学万海等人^[18]实现了一个没有认知封闭世界假设的、完备的单智能主体认知规划器, 大量实验表明在他们考虑的认知规划问题上, 规划器可以高效地生成规划问题的解。如何快速实现认知解释诊断及认知解释诊断类的算法都是值得研究的问题。

另外, 还可以从以下方面进行研究: 考虑智能主体的知识, 关心智能主体的信念, 以及将本文的框架扩展到具有信念的情况。最后, 前文提到 Stephan Gspandl 等人将 Gerolwan 的基于历史的诊断思想用于高级智能体程序控制中, 使得智能体完成任务的百分率显著提高^[6], 是否也可以考虑将认知解释诊断的思想用到多智能主体的游戏等领域? 直觉告诉我们这是一条可行的研究思路, 毕竟准确的知识能更好地指导下一步行动。

参考文献

- [1] MCLLRAITH S A. Towards a theory of diagnosis, testing and repair[C]//Proc. of the 5th International Workshop on Principles of Diagnosis(DX). 1994:185-192.
- [2] MCLLRAITH S A. Explanatory diagnosis. Conjecturing actions to explain observations[C]//Proc. of the 6th International Conference of Knowledge Representation and Reasoning (KR). 1998:167-179.
- [3] SOHRABI S, BAIER J A, MCLLRAITH S A. Diagnosis as Planning Revisited[C]//Proceedings of the Twelfth International Conference on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR). 2010:26-36.
- [4] SOHRABI S, BAIER J A, MCLLRAITH S A. Preferred Explanations: Theory and Generation via Planning[C]//Proceedings of the 25th Conference on Artificial Intelligence (AAAI-11). San Francisco, USA, 2011:261-267.
- [5] GERLOWAN. History-based diagnosis templates in the framework of the situation calculus[J]. AI Commun., 2002, 15(1): 31-45.
- [6] GSPANDL S, PILL I, REIP M, et al. Alexander Ferrein: Belief Management for High-Level Robot Programs [C] // IJCAI. 2011:900-905.
- [7] VAN DITMARSCH H, VAN DER HOEK W, KOOI B. Dynamic Epistemic Logic[M]. Springer, 2007.
- [8] BALTAG A, MOSS L. Logics for epistemic programs[J]. Synthese, 2004, 139(2):165-224.

- [4] YUAN C, HU W, TIAN G, et al. Multi-task Sparse Learning with Beta Process Prior for Action Recognition[J]. IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition, 2013, 9(4): 423-429.
- [5] WRIGHT J, YANG A Y, GANESH A, et al. Robust face recognition via sparse representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(2): 210-227.
- [6] AHARON M, ELAD M, BRUCKSTEIN A. K-SVD: An Algorithm for Designing Overcomplete Dictionaries for Sparse Representation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(11): 4311-4322.
- [7] PATI Y C, REZAIIFAR R, KRISHNAPRASAD P S. Orthogonal matching pursuit; Recursive function approximation with applications to wavelet decomposition[C]// Conference Record of The Twenty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 1993: 40-44.
- [8] GORELICK L, BLANK M, SHECHTMAN E, et al. Actions as space-time shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(12): 2247-2253.
- [9] BARANIUK R, WAKIN M. Random Projections of Smooth Manifolds[J]. Foundations of Computational Math, 2009, 9(1): 51-77.
- [10] RUBINSTEIN R, ZIBULEVSKY M, ELAD M. Efficient Implementation of the K-SVD Algorithm Using Batch Orthogonal Matching Pursuit[R]. Haifa, Israel; Israel Institute of Technology, 2008.
- [11] YANG M, ZHANG L, FENG X, et al. Fisher Discrimination Dictionary Learning for sparse representation[J]. International Conference on Computer Vision, 2011, 24(4): 543-550.
- [12] SCOVANNER P, ALI S, SHAH M. A 3-dimensional sift descriptor and its application to action recognition[C]// Proceedings of the 15th international conference on Multimedia. ACM, 2007: 357-360.
- [13] KLASER A, MARSZALEK M. A spatio-temporal descriptor based on 3D-gradients[C]// Proceedings of the British Machine Vision Conference, 2008: 995-1004.
- [14] ZHANG Z, HU Y, CHAN S, et al. Motion Context: A New Representation for Human Action Recognition [C] // Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision, 2008: 817-829.
- [15] SEO H J, MILANFAR P. Action recognition from one example [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(5): 867-882.
- [16] NIEBLES JC, WANG H, LI F F. Unsupervised Learning of Human Action Categories Using Spatial-Temporal Words[J]. International Journal of Computer Vision, 2008, 79(3): 299-318.
- [17] ZHANG Q, LI B. Discriminative K-SVD for dictionary learning in face recognition[J]. IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition, 2010, 119(5): 2691-2698.
- [18] YANG J, YU K, HUANG T. Supervised Translation-Invariant Sparse coding[J]. IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition, 2010, 26(2): 3517-3524.
- [19] RAMIREZ I, SPRECHMANN P, SAPIRO G. Classification and clustering via dictionary learning with structured incoherence and shared features[J]. IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition, 2010, 23(3): 3501-3508.
- [20] WANG B, WANG Y Y, XIAO W H, et al. Human Action Recognition Based on Discriminative Sparse Coding Video Representation[J]. Robot, 2012, 34(6): 745-750. (in Chinese)
王斌, 王媛媛, 肖文华, 等. 基于鉴别稀疏编码视频表示的人体动作识别[J]. 机器人, 2012, 34(6): 745-750.
- [21] ROSASCO L, VERRI A, SANTORO M, et al. Iterative Projection Methods for Structured Sparsity Regularization[R]. Massachusetts; Massachusetts Institute of Technology, 2009.

(上接第 256 页)

- [9] BALTAG A, MOSS L, SOLECKI S. The logic of public announcements, common knowledge, and private suspicions[C]// Proceedings of the Conference on Theoretical Aspects of Rationality and Knowledge (TARK-98), 1998.
- [10] VAN BENTHEM J, VAN EIJCK J, KOOI B. Logics of communication and change[J]. Information and Computation, 2006, 204(11): 1620-1662.
- [11] LÖWE B, PACUIT E, WITZEL A. DEL Planning and Some Tractable Cases[C]// LORI, 2011: 179-192.
- [12] BOLANDER T, ANDERSEN M B. Epistemic planning for single and multi-agent systems[J]. Journal of Applied Non-Classical Logics, 2011, 21: 9-34.
- [13] VAN EIJCK J. DEMO-A Demo of Epistemic Modelling[M]// Proceedings of the 7th Augustus de Morgan Workshop. Amsterdam, 2007: 305-363.
- [14] YU Q, WEN X M, LIU Y M. Multi-agent epistemic explanatory diagnosis via reasoning about actions [C]// Proceedings of the Twenty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-13), 2013
- [15] AUCHER G, BOLANDER T. Undecidability in Epistemic Planning [C]// Proceedings of the Twenty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-13), 2013
- [16] BOLANDER T, JENSEN M H, SCHWARZENTRUBER F. Complexity Results in Epistemic Planning [C]// Proceedings of the 24th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-15). Buenos Aires, Argentina, 2015: 3-9.
- [17] MUISE C J, BELLE V, FELLI P, et al. Planning Over Multi-Agent Epistemic States: A Classical Planning Approach [C]// Proceedings of the Twenty-Ninth Conference on Artificial Intelligence (AAAI-15). Austin, Texas, USA, 2015: 3327-3334.
- [18] YANG R, WAN H, FANG L, et al. A Complete Epistemic Planner without Epistemic Closed World Assumption [C]// Proceedings of the 24th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-15). Buenos Aires, Argentina, 2015: 3-9.