

一个新的意图后承形式系统 L_{m5c} *

朱紫汝¹, 陈小平^{1,2}, 周熠¹

¹(中国科学技术大学 计算机科学与技术系, 安徽 合肥 230027);

²(安徽大学 计算智能与信号处理开放实验室, 安徽 合肥 230039)

E-mail: fmatthews@263.net

http://www.ustc.edu.cn

摘要: 建立意图后承的形式化推理系统是意图形式化研究中的一个重要课题. 提供了一个新的基于“归约蕴涵”的意图后承形式系统 L_{m5c} , 给出了意图后承的形式规范. 与已有的意图后承形式系统相比, 这个系统比较简单, 并具有许多现有同类系统所不具备的优良性质, 比如无副作用. 此外, 还具有较强的推理能力, 可供 Agent 自身用于意图推理和目标修改.

关键词: 主体; BDI 模型; 意图后承; 副作用问题; 多值逻辑

中图法分类号: TP18 文献标识码: A

近年来, 国际人工智能领域注重探讨“主体”(agent)的设计问题及其不同的解决途径. 如何对 Agent 进行抽象和形式化的研究已经成为一项重要的研究课题. 其中, “慎思式主体”(deliberate agent)已成为一种主要的研究对象, 其特点是能在动态的环境中完成基于目标(goal)的行为. 慎思式主体形式化研究的主要手段是将主体抽象为 BDI 模型, 即由主体的信念(belief)、愿望(desire)、意图(intention)以及它们之间的交互所构成的形式系统. 其中意图可以理解为主体对未来行动的合理选择. 由于意图是影响主体行动的主要因素, 又是协调 B, D, I 三者之间交互的关键环节, 所以对于意图的形式化研究就显得十分必要^[1-9].

意图形式化研究的基本目标之一是澄清什么是意图后承这个问题. 这个任务又分为逻辑学与动力学两个方面, 其中逻辑学方面起着基础性的作用. 其重点之一是意图后承的规范问题, 即给定一个意图 φ , 任给一个意图描述 ψ 是否也应成为意图^[1]. 研究中的一个难点是副作用问题(side-effect problem). 在已有文献中对副作用问题的提法不一, 比较全面且重要的分类可参看文献[2]. 在意图后承理论中存在的副作用主要包括以下两类:

$$(SE_1) \models p \rightarrow q \Rightarrow \models I(p) \rightarrow I(q);$$

$$(SE_2) \models p = q \Rightarrow \models I(p) \rightarrow I(q),$$

其中 (SE_1) 反映了意图后承在分析蕴含下是封闭的, (SE_2) 反映了意图后承在逻辑等值下是封闭的. 考虑到 Agent 是一个有限自治系统, 资源是有限的, 所以需对 (SE_1) 和 (SE_2) 进行排除^[3,9].

传统的形式化研究手段主要采用多模态逻辑系统, 基于 Kripke 的可能世界语义学对意图进行规范, 如 Cohen 和 Levesque^[2]的 CL 系统, Rao 和 Georgeff^[4]的系统以及 Meyer, Hoek 和 Linder 的系统^[5]等. 但这些模型中都不不可避免地存在着 (SE_1) 和 (SE_2) ^[6]. 针对这个问题, Konolige 和 Pollack^[7]提出了使用非正规模态逻辑系统来描述意图的方案, 然而在 KP 系统中, 意图后承关系退化为逻辑等值关系, 从而放弃了对意图的推理能力, 无法起到对意图后承的规范作用^[3].

由 Chen 和 Liu^[1]提出的意图逻辑系统 L_{m4c} 是一个具有意图推理能力的多值逻辑系统, 该系统引入了“认知

* 收稿日期: 2000-12-13; 修改日期: 2001-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69875017)

作者简介: 朱紫汝(1978 -), 男, 安徽舒城人, 硕士生, 主要研究领域为 AI 逻辑, 多主体系统; 陈小平(1955 -), 男, 重庆人, 博士, 教授, 主要研究领域为机器学习, AI 逻辑, 多主体系统; 周熠(1981 -), 男, 湖南湘乡人, 硕士生, 主要研究领域为 AI 逻辑, 多主体系统.

抽象”、“极小认知模型”、“归约蕴含”等新概念,通过判定后件的极小认知模型集是否在认知抽象意义上“包含于”前件的极小认知模型集来规范意图后承关系.系统排除了几乎所有的副作用,并具有许多不同于经典逻辑后承关系的优良性质.然而,在 L_{m4c} 系统中也存在着一些问题:(1) 意图后承关系中前后件所满足的直觉联系不明确;(2) 意图后承关系的后件可能会含有前件中未出现的原子,如吸收式副作用仍存在: $:=I(\varphi) \rightarrow I(\varphi \vee (\varphi \wedge \psi))$;(3) 特殊情况下可能出现错误的意图后承,如冗余在一定条件下可被分解: $:=I((x \wedge \neg x) \vee ((x \vee \neg x) \wedge y)) \rightarrow I(x)$;(4) 直觉上,矛盾式与重言式应无极小认知模型,但在系统中有;(5) 直觉上,使公式得到赋值 t 的极小认知模型与得到赋值 f 的极小认知模型之间应存在一种对称关系,但在系统中这种关系尚不清楚;(6) 该系统与经典逻辑系统的关系尚不清楚.

针对以上问题,我们构建了一个新的意图后承形式系统 L_{m5c} ,该系统充分吸收了 L_{m4c} 的优点,保留了其长处,同时又较好地消除了 L_{m4c} 存在的缺陷.本系统与 L_{m4c} 一样,可直接应用于意图推理^[1]和目标修改^[6].

本文第 1 节先对意图后承关系进行分析.第 2 节给出完整的基于“归约蕴涵”意图后承形式系统 L_{m5c} .第 3 节详细考察 L_{m5c} 的系统性质,由于篇幅所限,本文仅给出了部分定理的证明.最后是结论.

1 分析

对于一个复杂的意图,不同种类的 Agent 进行意图推理时选取的意图后承也有所差别.然而,任何理性 Agent 对意图后承所做出的选择与承诺必须是“合理”的.我们认为这种合理性就是意图后承关系中的后件所包含的“意向”必须在前件的“意向范围”之内,而不能有所超出.下面通过分析进一步阐述这种“意向合理性”.

(1) 给定意图 $\varphi = a \vee b$,即达到“目标 a 或者目标 b ”.假定“目标 a ”已达到,则 Agent 不需要对“目标 b ”进行承诺;而假定“目标 a ”不能达到,则 Agent 只有承诺“目标 b ”才有可能实现 φ .所以 Agent 在特定情况下需要承诺“目标 b ”,即“目标 b ”为意图 φ 的“子意向”;同理,“目标 a ”也是.在没有任何其他前提的情况下,两者都有可能被 Agent 选择并承诺(激进式 Agent 可能会同时选择两者,而保守式 Agent 则可能会选择其中之一).然而不管怎样,任何具有理性的 Agent 都不会因 φ 的存在而对“目标 c ”进行承诺(除非 Agent 相信“目标 c ”会导致或有助于实现意图 φ).因为,“目标 c ”已不在意图 φ 的意向范围之内.

(2) 给定意图 $\varphi = a \vee (a \wedge b)$,即“目标 a 或者目标 a 且目标 b ”.直觉上,“目标 a ”是 φ 的“子意向”,因为无论“目标 b ”是否达到,为了实现意图 φ ,Agent 都必须对“目标 a ”进行承诺,而“达到目标 b ”则不是 φ 的“子意向”,因为无论“目标 a ”是否达到,“目标 b ”的成败都不再影响意图 φ 的实现与否.

由以上可以看出,“子意向”是在某种环境下,Agent 需要对意图内容中做出承诺的一部分.而无论在何种情况下,Agent 都不需要进行承诺则必然导致原意图总是成功或者失败的部分不是原意图的“子意向”.这种“意向性”符合直觉理解.

我们采用多值逻辑来刻画这种意向性,使用逻辑值 t, f 表示意向性真假;0,1 表示假定性真假; Δ 用于抽象意图内容之外的状态.通过指定这些逻辑值之间的运算关系,反映出在特定环境之下,意图的局部意向是否会影响到整体意向.如果在某个特定环境下,存在这种影响,则局部意向即为原意图的子意向;反之,则不是原意图子意向.由于 Agent 资源有限,所以需利用认知抽象关系将考察范围限于意图内容之内,而将局部意向限于原子意向(指无须用“ \wedge ”和“ \vee ”连接的局部意向).基于以上想法,可将意图后承关系归结为前后件之间的意向“包含”关系.这一假定是构造 L_{m4c} 和 L_{m5c} 的基本原理.

2 系统构建

令 $Atom = \{x, y, z, x_1, x_2, x_3, \dots\}$ 为原子命题的集合,其中每一个原子命题代表一项“原子意图内容”.用 $\varphi, \psi, \chi, \gamma$ 等表示由 $Atom$ 中原子和联接词 \wedge, \vee, \neg 依通常形成规则产生的公式.用 L 表示所有这样的公式构成的集合.由于仅考虑意图内容之间的关系,不需要模态算子 I .引入二元算子 $\rightarrow, \varphi \rightarrow \psi$ 表示 ψ 是 φ 的意图后承.记 $T = \{t, f, 0, 1, \Delta\}$ 为系统中所用的指派值集,其中 t, f 称为实然值,0,1, Δ 称为抽象值.

定义 1(认知指派).一个认知指派是一个映射 $\pi: Atom \rightarrow T$.全体认知指派的集合记为 Π .

定义 2(认知赋值). 任给一个认知指派 π, π 下的一个认知赋值是一个映射 $V_\pi: L \rightarrow T$, 满足:

- (1) $V_\pi(x) = \pi(x), x \in Atom$;
- (2) $V_\pi(\neg\phi) = f_{\neg}(V_\pi(\phi))$;
- (3) $V_\pi(\phi \wedge \psi) = f_{\wedge}(V_\pi(\phi), V_\pi(\psi))$;
- (4) $V_\pi(\phi \vee \psi) = f_{\vee}(V_\pi(\phi), V_\pi(\psi))$.

其中 f_{\neg} 为一元函数: $T \rightarrow T$; f_{\wedge}, f_{\vee} 为二元函数: $T \times T \rightarrow T$. 定义见表 1~表 3.

Table 1 $f_{\neg}(T)$ function

表 1 $f_{\neg}(T)$ 函数

T	t	f	0	1	Δ
$f_{\neg}(T)$	f	t	1	0	Δ

Table 2 $f_{\wedge}(T_1, T_2)$ function

表 2 $f_{\wedge}(T_1, T_2)$ 函数

$T_1 \backslash T_2$	t	f	0	1	Δ
t	t	0	0	t	Δ
f	0	f	0	f	Δ
0	0	0	0	0	Δ
1	t	f	0	1	Δ
Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ

Table 3 $f_{\vee}(T_1, T_2)$ function

表 3 $f_{\vee}(T_1, T_2)$ 函数

$T_1 \backslash T_2$	t	f	0	1	Δ
t	t	1	t	1	Δ
f	1	f	f	1	Δ
0	t	f	0	1	Δ
1	1	1	1	1	Δ
Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ

V_π 是 π 的自然扩张. 为简洁起见, 以下将 V_π 简写为 π . 全体认知赋值的集合简记为 Π .

定义 3(认知模型). π 是 ϕ 的认知模型当且仅当 $\pi(\phi) = t$.

定义 4(认知抽象). 认知抽象 \leq 是 Π 上的一个二元关系, 满足 $\pi \leq \pi'$ 当且仅当 $\forall x \in Atom$:

- (1) $\pi(x) \in \{t, f\} \Rightarrow \pi(x) = \pi'(x)$;
- (2) $\pi(x) \in \{0, 1\} \Rightarrow \pi'(x) \neq \Delta$.

若 $\pi \leq \pi'$, 且 $\pi' \leq \pi$, 记为 $\pi = \pi'$; 若 $\pi \leq \pi'$, 且 $\pi' \neq \pi$, 记为 $\pi < \pi'$. 由定义容易验证 \leq 是 Π 上的自返, 传递关系. $=$ 是 Π 上的等价关系.

定义 5(极小认知模型). π 是 ϕ 的极小认知模型, 当且仅当满足:

- (1) π 是 ϕ 的认知模型; 且
- (2) 不存在 ϕ 的认知模型 π' , 使得 $\pi' < \pi$.

ϕ 的全体极小认知模型的集合记为 $[\phi]$.

定义 6(意图后承). ψ 是 ϕ 的意图后承, 记为 $\models \phi \rightarrow \psi$, 当且仅当满足:

- (1) $[\psi] \neq \emptyset$; 且
- (2) $\forall \pi \in [\psi], \exists \pi' \in [\phi]: \pi \leq \pi'$.

3 系统性质

下文中约定 $Atom$ 指所涉公式 ϕ 中所有原子的集合.

定理 7(自返、传递性). (i) $\forall \phi \in L: \models \phi \rightarrow \phi$; (ii) $\forall \phi, \chi, \psi \in L: \models \phi \rightarrow \chi \ \& \ \models \chi \rightarrow \psi \Rightarrow \models \phi \rightarrow \psi$.

定理 8(可判定性). L 中的意图后承是可判定的.

证明: 设前件为 ϕ , 后件为 ψ , 可构造判定算法见算法 1.

算法 1. 意图后承朴素判定算法.

Step 1: 根据定理 20, 构造 ϕ, ψ 的极小认知模型集 $[\phi], [\psi]$.

Step 2: 取 $[\psi]$ 中第 1 个极小认知模型 π . 若失败则输出 YES, 返回.

Step 3: 取 $[\phi]$ 中第 1 个极小认知模型 π' . 若失败则输出 NO, 返回.

Step 4: 判断 $\pi \leq \pi'$ 是否成立. 若成立转 Step 6.

Step 5: 取 $[\phi]$ 中下一个极小认知模型 π' . 若成功转 Step 4, 否则输出 NO, 返回.

Step 6: 取 $[\psi]$ 中下一个极小认知模型 π . 若成功转 Step 3, 否则输出 YES, 返回.

由于公式极小认知模型个数有限, 所以算法必可终止.

定理 9. 任给公式 ϕ 及认知指派 π_0 , 若满足 $\pi_0(\phi) = t$ 且 $\exists x_0 \in Atom$:

- (1) $\pi_0(x_0) \in \{t, f\}$; 且

(2) $\forall x \in Atom(x \neq x_0): \pi_0(x) \notin \{t, f\}$, 则 $\pi_0 \in [\varphi]$.

本定理说明,若在使公式为 t (整体意向为真)的认知指派中仅有一个原子被指派为 t/f (原子意向为真或假),则该指派为公式的极小认知模型.以下将映射 $Atom \rightarrow \{t, f\}$ 称为经典指派,其自然扩充称为经典赋值.

定义 10(对应). π_0 是经典指派 π 的认知对应(或 π 是认知指派 π_0 的经典对应),如果

$\forall x \in Atom: (\pi(x)=t \Leftrightarrow \pi_0(x)=1/t) \ \& \ (\pi(x)=f \Leftrightarrow \pi_0(x)=0/f)$. π_0 是经典指派 π 的抽象认知对应,如果

$\forall x \in Atom: (\pi(x)=t \Leftrightarrow \pi_0(x)=1) \ \& \ (\pi(x)=f \Leftrightarrow \pi_0(x)=0)$.

根据定义,一个经典指派 π 的认知对应可能有多,但其抽象认知指派仅有一个;反过来,任何一个认知指派 π_0 的经典对应仅有一个.下面两条定理刻画了经典指派 π 及其认知对应 π_0 的关系.

定理 11. 对任意一个经典指派 π 及其认知对应 π_0 , 则有:

(1) $\pi(\varphi)=t \Leftrightarrow \pi_0(\varphi)=t/1$;

(2) $\pi(\varphi)=f \Leftrightarrow \pi_0(\varphi)=f/0$.

定理 12. 对任意一个经典指派 π 及其抽象认知对应 π_0 , 则有:

$\pi(x/t)(\varphi)=t \ \& \ \pi(x/f)(\varphi)=f \Leftrightarrow \pi_0(x/t)(\varphi)=t \ \& \ \pi_0(x/f)(\varphi)=f$;

$\pi(x/t)(\varphi)=f \ \& \ \pi(x/f)(\varphi)=t \Leftrightarrow \pi_0(x/t)(\varphi)=f \ \& \ \pi_0(x/f)(\varphi)=t$;

$\pi(x/t)(\varphi)=\pi(x/f)(\varphi)=t \Leftrightarrow \pi_0(x/t)(\varphi)=\pi_0(x/f)(\varphi)=1$;

$\pi(x/t)(\varphi)=\pi(x/f)(\varphi)=f \Leftrightarrow \pi_0(x/t)(\varphi)=\pi_0(x/f)(\varphi)=0$.

定义 13(经典相关).

x 与 φ 经典正相关,当且仅当存在经典指派 $\pi: \pi(x/t)(\varphi)=t \ \& \ \pi(x/f)(\varphi)=f$;

x 与 φ 经典负相关,当且仅当存在经典指派 $\pi: \pi(x/t)(\varphi)=f \ \& \ \pi(x/f)(\varphi)=t$;

x 与 φ 经典相关,当且仅当 x 与 φ 经典正相关或经典负相关.

定义 14(认知相关).

x 与 φ 认知正相关,当且仅当 $\exists \pi_0 \in [\varphi]: \pi_0(x)=t$;

x 与 φ 认知负相关,当且仅当 $\exists \pi_0 \in [\varphi]: \pi_0(x)=f$;

x 与 φ 认知相关,当且仅当 x 与 φ 认知正相关或认知负相关.

上面两个定义分别在经典逻辑与 L_{m5c} 中刻画子意向,经典相关的定义是直接根据子意向的直觉想法进行描述,而认知相关则是通过使用逻辑值来体现.显然,后者的定义较为简单.为了揭示两种定义的等价性,先证明下面几条定理.

定理 15. 若 x 与 φ 经典正相关,则 $\exists \pi_0 \in [\varphi]$, 满足 $\pi_0(x)=t$ 且 $\forall x' \in Atom(x' \neq x): \pi_0(x') \notin \{t, f\}$;

若 x 与 φ 经典负相关,则 $\exists \pi_0 \in [\varphi]$, 满足 $\pi_0(x)=f$ 且 $\forall x' \in Atom(x' \neq x): \pi_0(x') \notin \{t, f\}$;

若 x 与 φ 经典相关,则 $\exists \pi_0 \in [\varphi]$, 满足 $\pi_0(x) \in \{t, f\}$ 且 $\forall x' \in Atom(x' \neq x): \pi_0(x') \notin \{t, f\}$.

证明:由定义 13 与定理 12 可构造仅有一个原子 x 被指派为 t (x 与 φ 经典正相关时)或 f (x 与 φ 经典负相关时)的认知指派 π_0 使得 $\pi_0(\varphi)=t$,由定理 9, $\pi_0 \in [\varphi]$.从而第(1),(2)条可证,第(3)条由第(1),(2)条显然成立.

定理 16. 任给认知指派 π ,构造认知指派 π' 满足 $\forall x \in Atom$:

(i) $\pi(x) \in \{t, f\} \Rightarrow \pi'(x)=f-\pi(x)$;且

(ii) $\pi(x) \notin \{t, f\} \Rightarrow \pi'(x)=\pi(x)$.

则对任给公式 φ 有:(1) $\pi(\varphi) \in \{t, f\} \Rightarrow \pi'(\varphi)=f-\pi(\varphi)$;(2) $\pi(\varphi) \notin \{t, f\} \Rightarrow \pi'(\varphi)=\pi(\varphi)$.

定理 17. 任给公式 $\varphi, \forall \pi \in [\varphi]$, 满足 $\exists x_0 \in Atom$:

(1) $\pi_0(x_0) \in \{t, f\}$;且

(2) $\forall x \in Atom(x \neq x_0): \pi_0(x) \notin \{t, f\}$.

证明:反证.设 $\exists \pi \in [\varphi]: \exists x_1, x_2, \dots, x_n \in Atom$, 满足 $\forall i(1 \leq i \leq n): \pi(x_i) \in \{t, f\}$.其中 $n \geq 2$.如果 $\exists j(1 \leq j \leq n): \pi(x_j)=t(f)$ 且 x_j 与 φ 经典正(负)相关.则由定理 15 可知 $\exists \pi_0 \in [\varphi]$, 满足 $\pi_0(x_j)=t(f)$ 且 $\forall x \in Atom(x \neq x_j): \pi_0(x) \notin \{t, f\}$, 容易验证 $\pi_0 < \pi$, 这与 $\pi \in [\varphi]$ 矛盾.所以 $\forall j(1 \leq j \leq n): \pi(x_j)=t(f)$ 且 x_j 与 φ 非正(负)相关. (*)

将 π 中对 x_1, x_2, \dots, x_n 的指派均取非,而对其他原子的指派保持不变,可得 π' .由定理 14, 可得 $\pi'(\varphi)=f$.设 π_1, π_1'

分别为 π 与 π' 的经典对应,则据定理 11 有 $\pi_1(\varphi)=t, \pi_1'(\varphi)=f$. 将 π_1' 中对 x_1 的指派取非,而对其他原子的指派保持不变,可得 π_2' . 由(*)及定义 13,可得 $\pi_2'(\varphi)=f$. 类似由 π_2' 通过对 x_2 原子指派的改变可得到 π_3' ,且 $\pi_3'(\varphi)=f$. 如此下去,可得到 $\pi_{n+1}'(\varphi)=f$. 由指派构造过程可得 $\pi_{n+1}'(\varphi)=\pi_1(\varphi)$. 与 $\pi_1(\varphi)=t$ 矛盾.

这条定理说明公式 φ 的所有极小认知模型仅有一个原子被指派为 t/f . 结合定理 12,可得下面定理.

定理 18. 任给公式 φ 及认知指派 $\pi, \pi \in [\varphi]$ 当且仅当 $\pi(\varphi)=t$ 且满足: $\exists x_0 \in Atom$:

- (1) $\pi_0(x_0) \in \{t, f\}$; 且
- (2) $\forall x \in Atom (x \neq x_0): \pi_0(x) \notin \{t, f\}$.

可以看到,本定理达到了第 1 节分析中所提到的将局部意向限于原子意向之上的目标. 有了上面这几条定理,就可以讨论经典相关与认知相关的等价性了.

定理 19. x 与 φ 经典正相关当且仅当 x 与 φ 认知正相关.

x 与 φ 经典负相关当且仅当 x 与 φ 认知负相关.

x 与 φ 经典相关当且仅当 x 与 φ 认知相关.

利用两种相关的等价性,可以得到 L_{m5c} 中极小认知模型的构造法.

定理 20. 任给公式 φ , 其极小认知模型集 $[\varphi]$ 可构造.

下面两条定理从原子与公式的相关性角度揭示了 L_{m5c} 系统中意图后承的含义.

定理 21. x 与 φ 经典正(负)相关 $\Leftrightarrow x$ 与 φ 认知正(负)相关 $\Leftrightarrow \models \varphi \quad x(\neg x)$.

定理 22. $\models \varphi \rightarrow \psi \Leftrightarrow (\forall x \in Atom: x \text{ 与 } \varphi \text{ 经典/认知正(负)相关} \Rightarrow x \text{ 与 } \psi \text{ 经典/认知正(负)相关})$.

证明: 仅证经典相关的情况.

(\Rightarrow) 由定理 21, $\forall x \in Atom: x$ 与 φ 经典正(负)相关 $\Leftrightarrow \models \varphi \quad x(\neg x)$. 再由意图后承的传递性, $\models \varphi \quad x(\neg x)$, 从而 x 与 ψ 经典正(负)相关.

(\Leftarrow) 由定理 18, $\forall \pi \in [\varphi]: \pi(\varphi)=t$ 且仅有一原子 x 被指派为 $t(f)$. 即 x 与 φ 认知正(负)相关. 亦即 x 与 φ 经典正(负)相关. 由已知可得 x 与 ψ 经典正(负)相关. 从而由定理 15, $\exists \pi' \in [\varphi]$, 使得 $\pi'(\varphi)=t$ 且 $\pi'(x)=t(f)$. 容易验证 $\pi' \geq \pi$. 由 π 的任意性可得 $\models \varphi \rightarrow \psi$.

定理 23. 设 $x, y, z \in Atom, \varphi, \psi, \chi \in L$, 则下面性质在 L_{m5c} 中成立:

$$(P1-1) \models x \wedge y \rightarrow x$$

$$(P1-2) \models x \wedge (x \vee y) \rightarrow x$$

$$(P1-3) \not\models x \wedge (x \vee y) \rightarrow x \vee y$$

$$(P1-4) \models \varphi \leftrightarrow \varphi^{*1}$$

$$(P1-5) \models \varphi \rightarrow \psi \Leftrightarrow \models \varphi^* \rightarrow \psi^*$$

$$(P1-6) \models \varphi \leftrightarrow \varphi^{*2}$$

$$(P1-7) \models \varphi \rightarrow \psi \Leftrightarrow \models \varphi' \rightarrow \psi'$$

$$(P2-1) \models x \vee y \rightarrow x$$

$$(P2-2) \not\models x \rightarrow x \vee y$$

$$(P3-1) \models x \wedge (\neg x \vee y) \rightarrow y$$

$$(P3-2) \models (\neg x \vee y) \wedge (\neg y \vee z) \rightarrow (\neg x \vee z)$$

$$(P4-1) \models \varphi \wedge \psi \leftrightarrow \psi \wedge \varphi$$

$$(P4-2) \models \varphi \vee \psi \leftrightarrow \psi \vee \varphi$$

$$(P4-3) \models \varphi \wedge (\chi \wedge \psi) \leftrightarrow (\varphi \wedge \chi) \wedge \psi$$

$$(P4-4) \models \varphi \vee (\chi \vee \psi) \leftrightarrow (\varphi \vee \chi) \vee \psi$$

$$(P4-5) \models \varphi \wedge (\chi \vee \psi) \leftrightarrow (\varphi \wedge \chi) \vee (\varphi \wedge \psi)$$

$$(P4-6) \models \varphi \vee (\chi \wedge \psi) \leftrightarrow (\varphi \vee \chi) \wedge (\varphi \vee \psi)$$

$$(P4-7) \models \neg(\varphi \wedge \psi) \leftrightarrow \neg\varphi \vee \neg\psi$$

$$(P4-8) \models \neg(\varphi \vee \psi) \leftrightarrow \neg\varphi \wedge \neg\psi$$

$$(P4-9) \quad \Box \neg \neg \varphi \leftrightarrow \varphi$$

$$(P5-1) \quad \Box \neg x \wedge x \rightarrow x$$

$$(P5-2) \quad \Box \neg x \vee x \rightarrow x$$

$$(P6-1) \quad \Box x \rightarrow x \wedge (x \vee y)$$

$$(P6-2) \quad \Box \neg x \wedge x \rightarrow \neg x \wedge x \wedge y$$

$$(P7-1) \quad \Box x \wedge y \leftrightarrow x \vee y$$

其中 φ^* 为 φ 的对偶式, φ' 与 φ 在经典逻辑中语义等值(即 $\models_{CL} \varphi \leftrightarrow \varphi'$), 且 $Atom(\varphi) = Atom(\varphi')$.

性质(P1-1)~(P2-2)描述了意图后承关系与经典逻辑后承关系的一些重要的相似与不同之处;(P3-1),(P3-2)揭示了在“意向范围”之内的可推性,但由(P2-2)可看出意图后承关系又不在经典逻辑后承关系下封闭;(P4-1)~(P4-9)表明系统保留了所有不含副作用而且有用的范式化简功能;(P5-1),(P5-2)说明意图矛盾部分不可分解;(P6-1),(P6-2)表明系统排除了逻辑等值副作用;(P7-1)为“意图意向性”包含的一种极端情形,说明 L_{m5c} 系统中意图后承关系既可是充分关系,又可是必要关系,还可以是这两种的混合关系,体现了系统的通用性.

4 结 论

在 L_{m4c} 系统的基础上,我们通过添加指派值 Δ ,并赋予其最低的抽象级别,将公式中出现的原子与未出现的原子区分开来,使得意图后承关系的后件不会含有前件中未出现的原子;又通过修改指派值的运算关系,使 $\iota \wedge f = 0, \iota \vee f = 1$,将偶然的意图内容与非偶然的意图内容区分开来,使得非偶然的意图子内容不能够分解;通过引入相关概念,将经典逻辑与 L_{m5c} 系统联系起来.分析表明, L_{m5c} 在继承 L_{m4c} 优点的同时克服了其残存的缺陷,因而提供了一个更为恰当的理论模型. L_{m5c} 系统使用最基本的意向包含性来刻画意图后承关系,使得该系统具有很好的通用性.基于该系统,我们的相关工作有:(1) 由于 L_{m5c} 系统是一个基于内部观点的意图逻辑系统,所以其判定问题在理论和实用两方面都具有重要意义.第3节给出了 L_{m5c} 的一个判定算法,但其时间复杂度较高.经过对系统的仔细考察,我们得到一个实验数据,表明平均性能较好的判定算法,并证明了算法的正确性;(2) 由于实际推理过程中,意图不可避免的要与信念、愿望进行交互;不同的 Agent 进行推理时将采取不同的推理策略.通过在系统构建的基础上,对若干要素的定义加以合适的限制,使得推理在信念、愿望、策略等的前提之下进行;(3) 假定由于某种原因,当前意图已不能被实现.此时合理的 Agent 应能针对具体情况,对当前意图进行修改后重新承诺.修改得到的新意图不但需要具有可行性,而且还需要与修改前的意图保持一定的“意向接近”性.通过修改 L_{m5c} 系统,加入对“接近”程度的衡量,以适应这种要求.由于篇幅所限,我们将另文对这些问题进行讨论.

进一步的工作包括对给定意图的所有“子意向”进行分类.这是因为 Agent 做计划时,思维是有“框架”的.例如,某个 Agent 有一个意图“要么达到目标 a 和目标 b ,要么达到目标 $\neg a$ 和目标 $\neg b$ ”.这里“目标 a ”和“目标 $\neg a$ ”都是原意图的“子意向”.表面看来似乎矛盾,其实,两者分处于 Agent 思维的两个不同“框架”之中.任意“框架”内部都是无矛盾、合理的.由于以上原因,我们需要对“框架性”这一概念进行形式化描述,使意图推理能够顺利进行.

致谢 周建君硕士、诸世卓硕士及中国科学技术大学 AI 逻辑小组的其余组员对本文的完成提出了很多有益的建议,在此一并表示感谢.

References:

- [1] Chen, X., Liu, G.A. Logic of intention. In: Dean, T., ed. Proceedings of the IJCAI'99. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1999. 172~177.
- [2] Cohen, P.R., Levesque, H.J. Intention is choice with commitment. Artificial Intelligence, 1990,42(2~3):213~261.
- [3] Chen, Xiao-ping, Liu, Gui-quan. Intention logic. Computer Science, 1997,24(3):21~26 (in Chinese).
- [4] Rao, A.S., Georgeff, M.P. Modeling rational agents within a BDI-architecture. In: Allen, J., et al., eds. Proceedings of the 2nd International Conference (KR'91). San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1991. 473~484.
- [5] Meyer, J.-J.Ch., van der Hoek, W., van Linder, B. A logical approach to the dynamics of commitments. Artificial Intelligence, 1999,113(1~2):1~40.

- [6] Chen, Xiao-ping, Liu, Gui-quan, Guo, Bao-gui. A formal theory of intention consequences. *Studies in Dialectics of Nature*, 2000,16(Addition):28~31 (in Chinese).
- [7] Konolige, K., Pollack, M.E. A representationalist theory of intention. In: Bajcsy, R., ed. *Proceedings of the IJCAI'93*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1993. 390~395.
- [8] Hu, Shan-li, Shi, Chun-yi. An intention model for agent. *Journal of Software*, 2000,11(10):965~970 (in Chinese).
- [9] Hu Shan-li, Shi Chun-yi. The side-effect problem with formalization of intention. *Computer Science*, 2000,27(7):66~68 (in Chinese).

附中文参考文献:

- [3] 陈小平,刘贵全.意图逻辑. *计算机科学*,1997,24(3):21~26.
- [6] 陈小平,刘贵全,郭宝贵.一个意图后承的形式理论. *自然辩证法研究*,2000,16(增刊):28~31.
- [8] 胡山立,石纯一. Agent的意图模型. *软件学报*,2000,11(10):965~970.
- [9] 胡山立,石纯一.意图形式化中的副作用问题. *计算机科学*,2000,27(7):66~68.

A New Formal System of Intention Consequences L_{m5c} *

ZHU Zi-ru¹, CHEN Xiao-ping^{1,2}, ZHOU Yi¹

¹(Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China);

²(Open Laboratory of Computational Intelligence and Signal Processing, Anhui University, Hefei 230039, China)

E-mail: fmatthews@263.net

<http://www.ustc.edu.cn>

Abstract: To establish a formal inferential system of intention consequences is an important issue in the formal study of intention. In this paper, a new formal system of intention consequences L_{m5c} based on “reduced implication” is proposed which provides a norm of intention consequences. Compared with other known formal systems of intention consequences, this system is simpler and possesses many desired properties, such as free from all cases of the known side-effects. Besides, it is powerful in reasoning about intention so that the agent itself can use it to perform tasks such as intention inference and goal revising.

Key words: agent; BDI modeling; intention logic; side-effect problem; multi-valued logic

* Received December 13, 2000; accepted May 22, 2001

Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.69875017