

协商推理机制中的需求序关系研究^①

陈 武^{1,2}

1. 西南大学 计算机与信息科学学院, 重庆 400715; 2. 西南大学 逻辑与智能研究中心, 重庆 400715

摘要: 在多 AGENT 系统的协商推理机制设计中, 协商需求的序一直扮演着重要角色. 为了设计合理的协商推理机制, 一些研究者基于经典命题逻辑提出协商需求的序需要满足逻辑限制, 但是命题逻辑表达常识推理的能力有限. 近年来, 越来越多的研究者选择表达常识推理更为有效的回答集程序作为协商背景知识表示的工具. 为了设计基于回答集程序的合理协商推理机制, 首先将逻辑限制转换成命题逻辑的模型表示, 形成等价的模型限制, 然后将模型限制的思想应用到回答集程序中形成回答集限制. 同时, 也证明了研究者们提出的基于需求出现次数的序满足回答集限制.

关键词: 回答集; 协商; 序; 限制

中图分类号: B819

文献标志码: A

协商大量存在于现实生活中, 例如国与国之间的经贸、政治协商以及家庭之间的纠纷协商处理等. 协商问题一直以来是博弈论研究的重要内容, 同时也是人工智能领域多 AGENT 研究的重要组成部分. 近年来, 人们从信念修正的思想出发, 采用逻辑的方法对协商的推理机制进行研究逐渐成为新的研究热点^[1-3]. 基于逻辑的协商推理机制研究是未来自动讨价还价机制设计和自动股市交易等机制设计的基础和必由之路. 基于逻辑的协商推理机制研究将协商双方的背景知识和最终的协商结果都采用适当的逻辑表示. 在协商过程中, 协商双方都有自己的协商需求, 每一方对自己的协商需求都存在偏好. 协商需求之间存在优先序关系, 如何设计需求的序一直是协商推理机制设计的关键技术和是否设计合理的核心. 为了设计合理的协商推理机制, 一些研究者基于经典命题逻辑提出协商需求的序需要满足逻辑限制(Logical Constraint, 简称 LC)^[4]. 但是, 由于命题逻辑表达常识推理的局限性, 限制了逻辑推理机制的设计和进一步发展. 因此, 考虑对表达常识推理更有效的逻辑推理机制进行协商需求的序研究就成为必然. 回答集程序(Answer Set Program, 简称 ASP)是一种具有高效的强有力的表示常识推理的新型工具^[5]. 一些研究者基于 ASP 对协商机制进行了相应的研究, 但是缺乏保证协商需求的序合理设计的机制^[3, 6-7]. 为了有效解决这一问题, 需要对 ASP 中的回答集进行一些限制. 因此, 本文首先将 LC 转换成命题逻辑的模型表示, 提出等价的基于模型的逻辑限制条件, 然后将模型限制(Model Constraint, 简称 MC)的思想应用到 ASP 中对回答集进行限制, 从而使得基于 ASP 协商中的序设计更加合理.

① 收稿日期: 2013-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61003203); 重庆市人文社会科学重点研究基地资助项目(09SKB35); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(XDJK2014C040); 西南大学博士基金资助项目(SWU109003).

作者简介: 陈 武(1976-), 男, 四川武胜人, 博士, 副教授, 主要从事知识表示与推理、多 AGENT 协商机制设计等的研究.

1 基础知识

1.1 ASP

假设 L 是具有有限原子集的命题语言. 一个文字就是原子(如 a , 称为正原子)或者是原子的否定(如 $\neg a$, 称为负原子). a 和 $\neg a$ 被称为是互补的文字. 文字集 S 如果不包含互补的文字, 那么 S 是协调的, 否则就是不协调的或者说是矛盾的. 规则 r 定义为

$$L_0 \leftarrow L_1; \dots; L_m; \text{not } L_{m+1}; \dots; \text{not } L_n (0 \leq m \leq n)$$

其中, 每个 $L_i (0 \leq i \leq n)$ 是一个文字, not 是缺省否定(也称作否定即失败). 我们用 $\text{Head}(r) = \{L_0\}$ 记规则 r 的头, 用 $\text{Pos}(r) = \{L_1; \dots; L_m\}$ 记规则 r 的正体, 用 $\text{Neg}(r) = \{L_{m+1}; \dots; L_n\}$ 表示规则 r 的负体. 如果 $\text{Pos}(r)$ 和 $\text{Neg}(r)$ 同时都是空集且 $\text{Head}(r)$ 不是空集, 那么称公式 r 是事实. 如果 $\text{Head}(r)$ 是空集并且 $\text{Pos}(r)$ 或 $\text{Neg}(r)$ 非空, 那么称规则 r 是约束. ASP 就是由规则 r 组成的有限集合^[5].

1.2 基于序关系的信念修正

信念修正的开创性工作是由 1985 年由 Alchourrón, Gärdenfors 和 Makinson 创立的 AGM 模型^[8]. 信念修正理论具有很强的现实背景, 几乎与更新有关的问题都能看见信念修正的影子, 因此将信念修正的思想应用到其它学科进行科学研究的情形非常普遍, 比如: 研究者在研究基于逻辑的协商(Negotiation)问题中引入信念修正的思想^[1], 这类问题的研究已经成为国际重要学术刊物和人工智能顶级会议等关注的热点^[1-3]. 信念修正是人工智能的分支之一, 与计算机软件理论有广泛的联系, 比如: 被广泛应用到计算机软件理论的 Reiter 诊断理论(Diagnosis Theory)^[9], 它们与信念修正理论有紧密联系.

AGM 模型提出了 8 条信念修正的准则(postulate), 它们已经成为信念修正的关键思想和方法. Gärdenfors 和 Makinson 于 1988 年基于认知防御(Epistemic Entrenchment, 简称 EE)的思想提出了 5 条新的信念修正准则(EE1-EE5)^[10]. 它的核心思想就是放弃原有信念的时候考虑先去掉那些认知度较差的信念. 该认知度由一个二元关系来刻画, 通过如下的符号来描述认知防御:

$p \leq q$: p 至多有 q 的防御度.

$p < q$: p 小于 q 的防御度, 即 $((p \leq q) \& \neg (q \leq p))$.

$p \equiv q$: p 和 q 有相同的防御度, 即 $((p \leq q) \& (q \leq p))$.

Gärdenfors 提出了认知防御度应有的如下 5 条准则, 它们通常被认为是防御的标准规则.

EE1(Transitivity): 如果 $p \leq q$ 和 $q \leq r$, 则 $p \leq r$.

EE2(Dominance): 如果 $p \vdash q$, 则 $p \leq q$.

EE3(Conjunctiveness): $p \leq (p \& q)$ 或者 $q \leq (p \& q)$.

EE4(Minimality): 如果信念集 K 是协调的, 则 $p \notin K$ 当且仅当对任意的 q , $p \leq q$.

EE5(Maximality): 如果对任意的 q , 有 $q \leq p$, 则 $p \in Cn(\emptyset)$.

2 基于命题逻辑的协商需求序关系

每一个 AGENT 对自己的信念集可以随意根据自己的主观评价进行排序. 尽管如此, 这些主观评价也需要遵循一些客观准则. 这些精细的客观准则被用于获得信念刻画的精度. 其中包含如下所定义的 LC:

定义 1 全序分部 $(K, P, <)$ 是一个完美序分部(NOP), 如果满足如下的逻辑限制条件:

如果 $A_1, \dots, A_n \vdash B$, 则 $r(B) \leq \max\{r(A_1), \dots, r(A_n)\}$

该 LC 的直观意思是一个逻辑推理更弱的公式应该有更好的信念防御度, 即具有更低的排名(rank).

显然该逻辑限制能够推出如下的排名性质:

- 1) 如果 $A \vdash B$, 则 $r(B) \leq r(A)$,
- 2) $r(A \vee B) \leq r(A)$ 和 $r(A \vee B) \leq r(B)$,
- 3) $r(A) = r(A \wedge B)$ 或 $r(B) = r(A \wedge B)$.

一些研究表明^[1], 利用上述这些性质, 可以容易得出 NOP 和 EE 的关系如下所示:

定理 1 对任意的信念集 K , 如果 $<$ 满足准则(EE1) – (EE3), 则存在一个 $\text{NOP} = (K, P, <)$, 使得对任意的 $A, B \in K$,

$$r(A) < r(B) \text{ 当且仅当 } B < A$$

反之, 对任意的 $\text{NOP} = (K, P, <)$, 存在一个序关系 $<$ 满足(EE1) – (EE4) 和对任意的 $A, B \in K$,

$$A < B \text{ 当且仅当 } r(B) < r(A)$$

显然, 在 NOP 中的序关系 $<$ 本质上是 EE 序关系的反转. 然而, NOP 弱于 EE. 一个 NOP 仅仅确定了相关信念集, 它不一定必须满足(EE5).

定义 2 协商模型 $G = ((X_1; \leq_1); (X_2; \leq_2))$, 其中 $X_i (i = 1, 2)$ 是语言 L 中协调的逻辑公式集; \leq_i 是一个 X_i 上的全序且满足如下的 LC:

如果 $A_1, \dots, A_n \vdash B$, 则存在一个 $k (1 \leq k \leq n)$, 使得 $A_k \leq_i B$

二元关系 $(X_i; \leq_i)$ 被称为参与者 i 的具有优先性的需求集.

显然, 一个协商模型是一个协商情形的形式化表示, 其中每个参与者用逻辑公式表示自己的需求和利用一个全序关系来刻画这些需求的优先性. 自然地, 可以假设每个参与者有协调的需求. 每个参与者的优先序都影响着参与者保卫它的需求防御度. LC 意味着如果需求 A 是需求 A_1, A_2, \dots, A_n 的逻辑推论, 那么 A 不应该比所有的 A_i 都具有更少的防御度, 因为如果放弃需求 A , 那么至少应该放弃 A_1, A_2, \dots, A_n 中的一个(否则就不应该放弃需求 A). 易知这个序关系类似于 Gärdenfors 和 Makinson 的认知防御度^[10]. LC 首先被文献[1]介绍, 它实际等价于认知防御序关系的 EE2 和 EE3^[4]. 因此, 可以获得如下结论:

命题 1 设 \leq 是一个 X 上的全序关系, LC 等价于如下的条件:

- 1) $A \vdash B$, 则 $A \leq B$
- 2) $A \leq A \wedge B$ 或者 $B \leq A \wedge B$

证 假设 \leq 满足 LC, 即满足“如果 $A_1, \dots, A_n \vdash B$, 则存在一个 $k (1 \leq k \leq n)$, 使得 $A_k \leq B$ ”. 显然满足 $A \vdash B$, 则 $A \leq B$. 又因为 $A, B \vdash A \wedge B$, 根据 LC 即可得 $A \leq A \wedge B$ 或者 $B \leq A \wedge B$.

反过来, 假设 \leq 满足如下两条性质: “若 $A \vdash B$ 则 $A \leq B$ ” 和 “ $A \leq A \wedge B$ 或者 $B \leq A \wedge B$ ”. 由题设 $A_1, \dots, A_n \vdash B$, 那么易知 $A_1 \wedge \dots \wedge A_n \vdash B$. 由 \leq 满足性质 “ $A \vdash B$, 则 $A \leq B$ ” 可得 $A_1 \wedge \dots \wedge A_n \leq B$. 显然 $A_1, \dots, A_n \vdash A_1 \wedge \dots \wedge A_n$. 多次利用 \leq 满足性质 $A \leq A \wedge B$ 或者 $B \leq A \wedge B$ 可得到存在一个 $k (1 \leq k \leq n)$, 使得 $A_k \leq A_1 \wedge \dots \wedge A_n$. 题设知道 \leq 是一个全序关系, 那么利用传递性即可得存在一个 $k (1 \leq k \leq n)$, 使得 $A_k \leq B$. 所以 \leq 满足性质 LC. 证毕.

3 基于 ASP 的协商需求序关系

3.1 LC 的模型表示

为了将 LC 推广到 ASP 中, 我们首先将 LC 模型化. LC 可以表述如下:

如果 $A_1, \dots, A_n \vdash B$, 则存在一个 $k (1 \leq k \leq n)$, 使得 $B \leq A_k$.

LC 可以转化为 MC:

如果 $\text{Model}(A_1, \dots, A_n)$ 是 $\text{Model}(B)$ 的子集, 则存在一个 $k (1 \leq k \leq n)$, 使得 $B \leq A_k$.

上述两种限制实际是同一问题的不同表述, 即它们是等价的.

命题 2 LC 等价于 MC.

证 1) LC \longrightarrow MC: 如果 $\text{Model}(A_1, \dots, A_n)$ 是 $\text{Model}(B)$ 的子集, 那么一定有 $A_1, \dots, A_n \vdash B$, 由 LC 可知存在一个 $k(1 \leq k \leq n)$, 使得 $B \leq A_k$.

2) MC \longrightarrow LC: 如果 $A_1, \dots, A_n \vdash B$, 那么 $\text{Model}(A_1, \dots, A_n)$ 是 $\text{Model}(B)$ 的子集, 由 MC 可知存在一个 $k(1 \leq k \leq n)$, 使得 $B \leq A_k$. 证毕.

3.2 基于 ASP 的协商机制

在各种协商中, 一个参与者可能具有大量的目标需要经过协商过程来实现. 一个参与者就是通过与其他参与者协商达成一个协议来达到或者部分实现目标. 如果一个参与者不能达到它的所有目标, 那么它就需要在目标上具有一个优先顺序, 进而尽量达成优先权较高的目标. 由此可以看出目标的优先性设计就变得非常重要. 一个协商模型应该包含参与者的知识、协商目标以及在目标上的刻画优先性的序. 因此, 可以给出如下协商模型^[7]:

定义 3 二人协商模型是一个二元组

$$M = ((\prod_1; G_1; \leq_1); (\prod_2; G_2; \leq_2))$$

其中对每个 $i(i=1$ 或 $2)$, \prod_i 是一个逻辑程序, G_i 是参与者 i 的目标集, 每个目标由一个文字集决定, \leq_i 是一个在 G_i 上的序关系.

请注意: 上述定义 3 中每个参与者可能有多个互为析取关系的目标, \leq_i 是全序, 表示参与者 i 对自己目标的偏好关系.

3.3 协商模型的序关系限制

如果不设计序关系对二人协商模型中参与者提出的目标进行适当的限制, 可能会出现序关系违反自然规律而得到不理性结果的情形, 因此在实际的协商中都自然会讨论这种非常重要的序关系设计规则. 例如, 一些研究者在基于 ASP 的协商中设计的序关系定义如下所示^[3]:

定义 4 $a \leq_i b$ 当且仅当 $|\{A \text{ 是 } \prod_i \text{ 的回答集: } a \in A\}| \leq |\{B \text{ 是 } \prod_i \text{ 的回答集: } b \in B\}|$.

不难看出, 该序的核心思想是出现在回答集中次数多的文字的序更优先. 上述的序关系设计有其合理性. 但是, 该序关系有时也存在局限性. 例如, 表示一个参与者的 ASP Π 如下:

$a \leftarrow \text{not } b$;

$b \leftarrow \text{not } a$;

$c \leftarrow a, \text{ not } d, \text{ not } e$;

$d \leftarrow a, \text{ not } c, \text{ not } e$;

$e \leftarrow a, \text{ not } d, \text{ not } c$;

$h \leftarrow b, \text{ not } f$;

$f \leftarrow b, \text{ not } h$

通过对该 ASP 的回答集计算不难得到, \prod 的回答集为 $\{a, e\}, \{a, c\}, \{a, d\}, \{b, h\}, \{b, f\}$. 显然在这些回答集中, 文字之间的顺序应该为 $\{c \leq d, d \leq c, c \leq e, e \leq c, c \leq f, f \leq c, c \leq h, h \leq c, d \leq e, e \leq d, d \leq f, f \leq d, d \leq h, h \leq d, e \leq f, f \leq e, e \leq h, h \leq e, f \leq h, h \leq f, c \leq b, d \leq b, e \leq b, f \leq b, h \leq b, b \leq a, c \leq a, d \leq a, e \leq a, f \leq a, h \leq a\}$. 该顺序的优点就是文字之间的序关系是一个全序(线性序). 由于该顺序是通过出现在回答集中次数来设计的, 所以很难反映 ASP 中的关于逻辑推理的性质. 比如从该参与者表示规则 $a \leftarrow \text{not } b$ 和 $b \leftarrow \text{not } a$ 来看, 易知文字 a 和 b 应该是平等的机会, 但是, 从上述的序关系设计中可以知道, a 在回答集中出现的次数是 3 次, 多于 b 在回答集中出现的次数 2 次, 因

此 a 优先于 b , 这个序关系并未反映出利用 ASP 来表述参与者的属性. 为了能准确地反映出参与者的逻辑推理属性, 本文提出一种基于逻辑推理限制的序关系设计来避免上述问题.

首先可以根据模型的包含性获得一个基于 ASP 的回答集限制 (Answer Set Constraint, 简称 ASC) 如下:

对 \prod_i 的任意的回答集 A , 如果 $a \in A$ 就有 $b \in A$, 则 $a \leq_i b$.

命题 3 定义 4 中的序关系 \leq_i 满足 ASC.

证 设 \leq_i 是定义 4 中定义的序关系. 假设 A 是 \prod_i 的任意一个回答集, 如果 $a \in A$ 就有 $b \in A$, 那么可知集合数量比较关系 $|\{A \text{ 是 } \prod_i \text{ 的回答集: } a \in A\}| \leq |\{A \text{ 是 } \prod_i \text{ 的回答集: } b \in A\}|$ 成立. 由定义 4 可知 $a \leq_i b$, 所以定义 4 中的 \leq_i 满足 ASC. 证毕.

从二人协商模型 (定义 3) 中可以看出, 该协商模型缺少一个基于 ASC 的协商性质, 所以本文提出受到一般回答集限制 (General Answer Set Constraint, 简称 GASC) 的二人协商模型.

定义 5 二人协商模型是一个二元组 $M = ((\prod_1; G_1; \leq_1); (\prod_2; G_2; \leq_2))$, 其中对每个 $i (i=1$ 或 $2)$, \prod_i 是一个逻辑程序, G_i 是一个目标集, 每个目标由一个文字集决定, \leq_i 是一个在 G_i 上的序关系. 它还将满足如下的 GASC 限制:

(GASC) 对任意的回答集 A , $\exists g_j, g_k \in G_i$, 如果 $g_j \subseteq A$, 就有 $g_k \subseteq A$, 则 $g_j \leq_i g_k$.

增加序关系后协商模型比没有对协商模型的序关系进行限制有很多优越的地方, 比如不会让那些不理性的目标排序成为协商的内容, 从而避免了不理性的协商出现. 在序关系限制下的协商性质探讨不是本文的重点, 将在未来的工作中讨论它们的协商性质.

4 总 结

本文通过对 LC 的模型表示, 将 LC 的思想引入到 ASP 之中, 从而使得基于 ASP 的协商需求的序设计更加合理. 同时还证明了文献 [3] 中提出的基于出现次数的序满足 ASC, 以及给出了新的受到回答集限制的二人协商模型.

参考文献:

- [1] ZHANG D, FOO N, MEYER T, et al. Negotiation as Mutual Belief Revision [C]. Proceedings of the Nineteenth National Conference on Artificial Intelligence. USA: AAAI Press / The MIT Press, 2004: 317—322.
- [2] ZHANG D. A Logic-Based Axiomatic Model of Bargaining [J]. Artificial Intelligence, 2010, 174(16/17): 1307—1322.
- [3] CHEN W, ZHANG M Y, WU M N. A Logic-Program-Based Negotiation Mechanism [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2009, 24(4): 753—760.
- [4] ZHANG D, ZHANG Y. An Ordinal Bargaining Solution with Fixed-Point Property [J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2008, 33: 433—464.
- [5] VLADIMIR L. Foundation of Logic Programming [M] // Principles Knowledge Representation. Ventura Hall: CSLI Publications, 1996: 69—127.
- [6] SON T C, SAKAMA C. Negotiation Using Logic Programming with Consistency Restoring Rules [C]. Proceedings of the 21st International Joint Conference on Artificial Intelligence. USA: AAAI Press, 2009: 930—935.
- [7] CHEN W, ZHANG D, WU M N. A Sequential Model of Bargaining Reasoning in Logic Programming [C]. Proceedings of the 12th International Conference on Logic Programming and Nonmonotonic Reasoning, Berlin: Springer-Verlag, 2013: 239—244.

- [8] ALCHOURRÓN C, GÄRDENFORS P, MAKINSON D. On the Logic of Theory Change: Partial Meet Contraction and Revision Functions [J]. *Journal of Symbolic Logic*, 1985, 50(2): 510—530.
- [9] REITER R. A Theory of Diagnosis from First Principles [J]. *Artificial Intelligence*, 1987, 32(1): 57—96.
- [10] GÄRDENFORS P, MAKINSON D. Revisions of Knowledge Systems Using Epistemic Entrenchment [C]. *Proceedings of the 2nd Conference on Theoretical Aspects of Reasoning about Knowledge*. Massachusetts: Morgan Kaufmann, 1988: 83—95.
- [11] ZHANG D, FOO N. Infinitary Belief Revision [J]. *Journal of Philosophical Logic*, 2001, 30(6): 525—570.

The Demand Order in Negotiation Reasoning Mechanism

CHEN Wu^{1,2}

1. College of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Center for the Study of Logic and Intelligence, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Demand order always plays an important role in negotiation reasoning mechanism design of multi-agent systems. In order to design rational negotiation reasoning mechanisms, some researchers, based on the classical propositional logic, put forward the order of negotiation demand, which needs to satisfy the logical constraint. However, the propositional logic has some limitations in representing commonsense reasoning. In recent years, more and more researchers select answer set program (ASP), which can represent commonsense reasoning more effectively than the propositional logic, as a tool to represent negotiation background knowledge. In order to design rational negotiation reasoning mechanisms based on ASP, this paper firstly transforms Logical Constraint into equivalent Model Constraint, and then applies the idea of Model Constraint to ASP to form Answer Set Constraint. At the same time, this paper proves that the order based on occurrence quantity put forward by some researchers satisfies the Answer Set Constraint.

Key words: answer set; negotiation; order; constraint

责任编辑 周仁惠

