

一种因果推理形式*

王 镛 石纯一

(清华大学计算机系 北京 100084)

摘要 针对定性推理在有冲突情况下进行传播时所存在的问题,本文提出了一种因果关系形式,引入了“时间”和“效果”概念,给出了因果推理过程:先建立因果关系图,再传播原因变量的行为,并应用定性代数方法来处理冲突问题.这种因果推理形式推广了 Iwasaki 因果推理方法.

关键词 因果推理, 因果关系, 因果关系图, 定性代数.

中图分类号 TP18

因果推理是定性推理领域内的重要问题,源于对物理系统中各变量之间的相互确定关系的讨论,可用来对物理系统的行为进行推理、仿真及解释.例如,变量 A 的值(变化)已经确定了,依因果关系可以确定变量 B 的值(变化),而且这种确定性可以继续传播.这种传播可通过变量间因果关系图来描述.因果推理形式可从讨论变量之间值的决定关系推广到讨论事件之间的决定关系,但其问题的核心仍然是变量值之间的相互确定关系.

本文讨论的因果推理环境是定性仿真框架中基于询问的因果推理,针对用户感兴趣的询问,仿真给出问题的结果和相应的因果解释.

因果推理过程可归纳成 2 个步骤.第 1 个步骤:根据已有的各种关于系统的结构、行为和功能的知识构造出因果关系图.如 Iwasaki 和 Simon 的因果顺序理论,针对系统方程组与系统初值状态构成的平衡自容结构,通过不断求解最小完备子集及导出结构,直到最高阶导出结构中不再有自容的子集.此时各方程中变量按其分属不同阶的最小完备子集就构成了因果依赖关系,进而构成了因果关系图.^[1,2]第 2 个步骤:依因果关系图及关于系统的原有知识,对变量行为进行传播,对系统的行为进行仿真,回顾仿真过程中的重要行为序列,便可对系统行为作出解释.值得指出的一点是,若从生成因果解释的角度出发,不需要生成完整而精确的行为状态序列.

本文针对因果关系图中确定性(变化)的传播,提出了一种因果推理形式,进而讨论了传播原则、方法和因果关系图的构造问题.

* 本文研究得到国家自然科学基金资助.作者王镛,1971年生,硕士,主要研究领域为人工智能,认知.石纯一,1935年生,教授,博士生导师,主要研究领域为人工智能应用基础,知识工程.

本文通讯联系人:王镛,北京 100084,清华大学计算机系

本文 1996-04-27 收到修改稿

1 问题描述

已知一个系统的结构、行为和功能的知识以及场景的描述,当用户给出一个询问,如“某些特定变量的值发生了变化(原因),那么我们感兴趣的另一些变量的值将会怎样(结果)?”为此需先构造对于回答这一询问充分并且尽可能必要(尽量简单)的因果关系图,而后将原因变量的变化沿因果路径传播到结果变量,从而分析出结果变量的变化,并结合前述因果路径及传播过程生成因果解释.如图 1 所示.

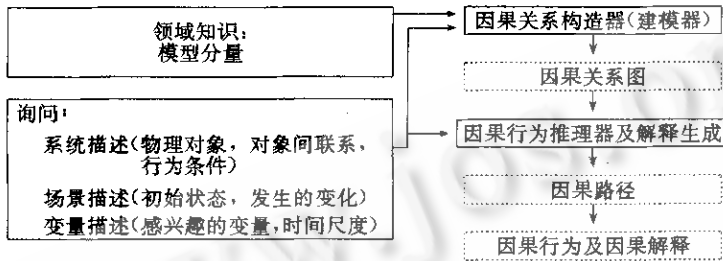


图1 因果推理结构描述图

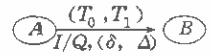


图2 因果关系基本形式图

建模器构造解释系统的一个合适模型,结果构成了因果关系图,图中蕴含着回答上述询问中感兴趣的变量的行为所需的因果路径,即外部项尤其是发生变化的变量到感兴趣变量的有向路径.因果行为推理器的任务是根据因果关系图中的因果路径将原因变量的行为传播到结果变量,从而分析出结果变量的行为,并得到相应的因果解释(因果路径及传播过程),即整个因果推理的最终输出.

2 因果关系图

因果关系图是描述一个系统内各属性之间因果关系的基本模型.通常是将系统内各重要属性抽象为各自值域上的变量,将存在于各属性之间的因果关系抽象成变量之间的因果关系图.一般图中的节点由变量构成,节点之间的有向弧就代表着变量之间的因果决定关系.因果决定关系中伴随的因果语义在因果推理过程中起着关键作用.

2.1 因果关系图的形式

本文引入的因果关系图的形式如图 2 所示.图中节点代表变量,表示系统内某一方面的属性.节点之间的因果决定关系由有向弧表示,弧上还标注有 (T_0, T_1) , I/Q 和 (δ, Δ) 等因果语义.

时间对 (T_0, T_1) 表示因果决定关系所对应的因果影响是需要延迟一定时间的.其中 T_0 是初步响应时间,即结果变量有初步变化所需要的时间.从另一角度来说,在 T_0 时刻前可以忽略该因果决定关系. T_1 是响应稳定时间,即 T_1 时刻后结果变量已处于稳定状态.

I/Q 项表示因果决定关系的类型,其中 Q 表示函数型因果决定关系,即原因变量发生变化才能导致结果变量发生变化; I 表示积分型因果决定关系,即原因变量不发生变化也能导致结果变量发生变化.

(δ, Δ) 表示结果变量所受影响的效果.其中 Δ 是稳定响应时的效果,对应着稳定响应时

间 T_1 后的时域. 对于从响应到稳定过程中的效果, 将其简化为线性过程, 即 T_0 和 T_1 之间时域内的效果为 $\delta * t$. δ 和 Δ 的定性值域参见 3.3 节, 均包含了方向和强度, 一般稳定响应最为重要, 本文着重分析 Δ 的作用.

设 0 时刻原因变量发生了变化, 将结果变量的响应近似为一个延迟的阶跃响应, 此时 (T_0, T_1) 和 (δ, Δ) 的关系见图 3.

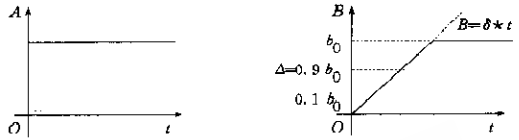


图3 (T_0, T_1) 和 (δ, Δ) 的关系图

2.2 因果关系形式的比较

在 De Kleer 和 Brown 的 ENVISION 中, 提出了虚构的因果性理论. 不久, Iwasaki 和 Simon 提出了因果顺序理论. 这些有影响的因果推理方法中, 因果决定关系在有向弧上只标注有 $+/-$, 表示方向而没有效果中的强度概念, 既没有标明因果关系的类型, 也没有体现时间的作用. 后来 Vescovi 和 Iwasaki 等人的 CFRL 中因果决定关系有向弧上除了注有 $+/-$ 项外, 还注有 $(<, =, \leq)$ 项, 在时间上指出时序关系. 然而原因变量发生变化在时间上总是早于或至少等于结果变量发生变化的时刻, 所以该项不能作为一个时间过程长短的衡量标志. 这一点和本文因果关系基本形式中的时间一项有所不同. 也没有标明因果关系的类型.^[3] 在 Rickel 和 Porter 参与的 TRIPEL 中因果决定关系有向弧上也注有 $+/-$ 项. 另外他们把时间规模(timescale)的概念引入了因果决定关系, 含有 I/Q 项和 $h/m/s$ 项. I/Q 项的含义与本文中的相似但不相同, I 表示微分影响, 对应一个过程的效果, 有着一个表示该影响效果变为明显所需的最快时间规模, 如小时、分钟、秒等, 即 $h/m/s$ 项; Q 表示函数型影响, 是瞬时性的, 在任何时间规模上都是明显的.^[4] 这比本文因果关系中的时间项语义简单.

3 因果推理

3.1 因果关系图的建立

利用组合式建模方法构造回答询问所需的模型, 即一个模型分量的集合, 进而构成回答问题所需的因果关系图. 直观地, 可以把所用的定性建模算法理解为做 2 个选择: ①对目标项的可能因果影响进行反向串连, 决定需要哪些假设集合; ②对回答询问所需要的建模假设进行推理, 决定从每个假设集合中选择哪个可组合模型分量. 该算法是这样一个循环过程: 选择假设集合, 从每个假设集合中选择一个可组合模型分量, 决定针对哪一项进一步进行反向串连.^[5] 每个状态下的仿真模型中, 一个模型分量就对应一个因果关系子图, 而由所有模型分量就可以得到该状态下的因果关系图.

3.2 因果关系图中变量行为的静态传播

本文的主要工作是得到回答问题所需的因果关系图后, 由图中路径将原因变量的行为传播到结果变量的方法和过程. 原因变量指询问中发生变化的项, 或者领域知识库中明确给出的外部项. 结果变量特指询问中给出的用户感兴趣的变量. 变量的行为是指一个项的值, 或者动态的定性值序列.

因果决定关系有 2 类, 对应着因果关系图中的一条弧和一条路径, 可如下确定.

定义 1. 对于每个状态下的因果关系图, 一个单独的因果决定关系是指:

(1) $\emptyset \rightarrow A$. 对于任一最初的原因变量 A (询问中给出的发生变化的项, 或领域知识库中

明确给出的外部项)。

(2) $A \rightarrow B$. 对于因果关系图中任一有向弧 $A \rightarrow B$, 若其对应的初步响应时间 T_0 小于询问中给出的时间规模 T .

定义 2. 对于每个状态下的因果关系图, 一个传递的因果决定关系是指因果关系图中的一条有向路径, 其每条边对应的初步响应时间 T_0 的累加和小于询问中的时间规模 T .

对于询问中的感兴趣变量, 因果推理所需要的只是整个因果关系图的一个子图, 其中只包括所有从外部项到感兴趣变量的传递的因果决定关系, 除去了冗余的部分. 尤其是累计初步响应时间相对于时间规模 T 过长的路径, 被认为是准平衡态过程, 而忽略了. 简化步骤也可以考虑结合于定性建模过程内, 即建模器的输出就是已结合了对时间考虑后的无冗余因果关系图.

为解决原因变量的行为在因果关系图中的传播问题, 分析因果影响对变量的效果(该变量的相对变化), 建立下述原则.

原则 1. 当有一条单独的因果决定关系路径(如图 4)时, 原因变量 A 行为的传播服从以下原则:

(1) 路径为函数型. 当 A 无相对变化时, 结果变量 B 也无相对变化, 并且无需响应时间. 当 A 有相对变化 $\Delta A/A$ 时, 结果变量 B 有相对变化 $(\Delta A/A) * \Delta_1$. (带下标表示 2.1 节介绍的 Δ 项的一个赋值, 即一个常量.)

(2) 路径为积分型且收敛(指其对应过程的效果收敛). 当 A 无相对变化时, B 有相对变化 $A * \Delta_1$. 当 A 有相对变化 $\Delta A/A$ 时, B 有相对变化 $(A + \Delta A) * \Delta_1$.

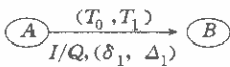


图4 1条单独的因果决定关系路径时静态传播原则示例图

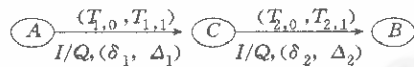


图5 2条单独的因果决定关系路径时静态传播原则示例图

原则 2. 当有 2 条(或 2 条以上)单独的因果决定关系路径串联时, 该因果路径中相对变化的传播依据原则 1 串连传播, 且计算路径累计响应时间 ΣT 的原则为:

(1) 路径为函数型的, 根据其原因变量有无变化, 决定是否将其稳定响应时间 T_1 列入累计.

(2) 路径是积分型且收敛的, 将其稳定响应时间 T_1 列入累计.

原则 3. 当有 2 条(或 2 条以上)单独的因果决定关系并联, 即同时作用到一变量时, 如图 5.

依据原则 1, 由多路径传播过来时, C 应有的相对变化分别为 $(\Delta C/C)_1, (\Delta C/C)_2$, 则综合后 C 的相对变化应为 $(\Delta C/C)_1 + (\Delta C/C)_2$. 依据原则 2 得到的路径响应时间分别为 $(\Sigma T)_1$ 和 $(\Sigma T)_2$, 则综合后的路径累计响应时间 $\Sigma T = \text{Max}\{(\Sigma T)_1, (\Sigma T)_2\}$.

此条原则表示考虑的是稳定以后的综合效果, 即稳态响应.

原则 4. 若有一条因果路径累计响应时间 ΣT 大于询问中给出的时间规模 T , 则该路径不再向下传播. 即已超过了用户感兴趣的时间范围.

这里涉及的运算, 如 +, *, Max 等, 直观地可以理解成典型的实数域上的运算. 但是实际人们在因果推理中经常使用定性量级的概念, 需使用定性论域及其上的 $\oplus, \otimes, \text{Max}$ 等

运算.

由原因变量向后传播行为的算法流程类似于关键路径法:由初始节点 \emptyset ,先传播到初始的原因变量的外部项,并且根据原则 1~4 向后传播,直至到达结果变量(感兴趣的变量).

3.3 定性代数

这里讨论在定性传播中涉及的定性论域以及其上的运算.为讨论问题简便起见,不妨假设所有变量均已进行了标准化,即 $A \rightarrow 1$ (对应下文中的 M), $(\Delta A/A) \rightarrow \Delta A$.

规定标准化后的变量所属的定性论域为 $\{-\infty, -L, -M, -S, -\varepsilon, +\varepsilon, +S, +M, +L, +\infty\}$,其绝对值分别可为 $\varepsilon, S, M, L, \infty$,含义如下: ε 对应 0 附近一个邻域,直观含义为无穷小; S 对应 0 和 1 之间的一段区域,直观含义为小数; M 对应 1 附近一个邻域,直观含义为中数; L 对应 1 和 ∞ 之间的一段区域,直观含义为大数; ∞ 直观含义为无穷大.

进而可以定义该定性论域上的定性运算 $\oplus, \otimes, \text{Max}$.由于篇幅所限,这里只涉及了与本文工作有关的一些最基本的关于定性代数的内容,可参见文献[6].前文涉及的有关效果项,如 $(\Delta A/A)$ 就是定义在上述定性论域的,并且在该定性论域上定义了定性运算 \oplus ,因此可以通过定性运算对综合效果进行评估.很重要的一点是,在有冲突的情况下,可以在相当程度上得到处理.

3.4 动态增量分析

由静态传播规则不能处理非收敛的积分型路径,更不能处理振荡型(如三角波等)的路径.进一步地可以由动态传播规则加以解决,即引入一个仿真节拍 t ,利用 $\delta \otimes t$ 对因果行为进行有限步定性因果仿真.

4 结 语

由于在因果关系图中传播因果行为时经常遇到“+”与“-”相冲突的情况,此时传统的“+/-”因果语义有明显的局限性.本文对因果关系引入了“时间”和“效果”等因果语义,使在此基础上的因果推理方法具有了处理传播过程中常见的冲突问题的能力.

De Kleer 和 Brown 的虚构的因果关系理论通过引入一个扰动,跟踪该扰动在约束网络中的传播路径,同时加入一些辅助的启发性规则以解决传播停滞情况.这些扰动传播路径即所得因果关系图.^[7]Iwasaki 和 Simon 的因果顺序理论,针对系统方程组与系统初值状态构成的平衡自容结构,不断求解最小完备子集及导出结构,直到最高阶导出结构中不再有自容的子集.此时各方程中变量按其分属不同阶的最小完备子集就构成了因果依赖关系,进而构成了因果关系图.^[1,2]而有限表分析方法和算法,将其应用范围推广到非数值领域.^[8]本文所涉及的因果关系图的构造是基于组合式定性建模的,组合建模方法由 Falkenhainer 和 Forbus 1991 年首先提出,由论域知识提供一个模型分量集,每个模型分量描述着系统的一个方面,通过选择该模型分量集的子集来构造一个模型.在构造模型的过程中,关键问题就是构造从原因到结果的因果路径,从而也解决了因果关系图的构造问题.

Iwasaki 提出因果顺序理论的初衷是想从形式化良好的方程组中提取出非对称性的、和物理背景相一致的因果决定关系.然而根据其方法构造的因果决定关系,并不总是和物理背景相一致,有时甚至是明显错误的.本文因果关系图的构造是基于组合建模方法,因为模型分量库是作为领域知识给出的,从因果路径应与系统结构真实存在的拓扑路径保持一致这

一点来说,构成的因果关系图是可靠的.

在引入“时间”和“效果”等因果语义的基础上,本文提出了因果行为的静态传播规则,从因果关系图本身能得出感兴趣变量的行为.传统的因果推理方法,由于因果语义“+/-”过于简单,往往由于冲突导致在因果关系图中行为传播无法继续.

参考文献

- 1 Iwasaki Y, Simon H A. Causality in device behavior. *Artificial Intelligence*, 1986, 29(1): 3~32.
- 2 Iwasaki Y. Causal ordering in a mixed structure. *AAAI-88*, 1988. 313~318.
- 3 Vescovi M, Iwasaki Y, Fikes R *et al.* CFRL: a language for specifying the causal functionality of engineered devices. *AAAI-93*, 1993. 626~633.
- 4 Rickel J, Porter B. Automated modeling for answering prediction questions: selecting the time scale and system boundary. *AAAI-94*, 1994. 1191~1198.
- 5 Iwasaki Y, Levy A Y. Automated model selection for simulation. *AAAI-94*, 1994. 1183~1190.
- 6 陈见,石纯一. 定性代数的形式框架 FAQA. *计算机学报*, 1995, 18(6): 417~423.
- 7 De Kleer J, Brown J S. Theories of causal ordering. *Artificial Intelligence*, 1986, 29(1): 33~61.
- 8 蔡勇,石纯一. 定性推理中一种因果分析方法. *模式识别与人工智能*, 1995, 8(3): 203~209.

A CAUSAL REASONING METHOD

WANG Qiang SHI Chunyi

(Department of Computer Science Tsinghua University Beijing 100084)

Abstract It is known that existed causal reasoning methods will have problems to propagate the causal behaviors when there are some conflicts. To solve this problem, the authors provide a causal relation formulation, which introduces the concepts of 'time' and 'effect'. Then a process for causal reasoning is provided: constructs the causal relation graph, then propagates the causal behaviors of the reason variables (exogenous variables), and uses qualitative algebra to solve conflicting cases. It is an extension of Iwasaki's causal reasoning method.

Key words Causal reasoning, causal relation, causal relation graph, qualitative algebra.

Class number TP18