

基于定性模型的定性仿真方法*

薛冬白

石纯一

(山西大学计算机系 太原 030006)

(清华大学计算机系 北京 100084)

摘要 定性仿真在定性推理中起着核心作用. 本文将介绍基于定性模型的定性仿真法的基本内容, 讨论支持其走向实用的主要方法和技术, 并展示其在若干领域中的应用.

关键词 定性推理, 定性仿真, 基于模型的推理, 定性微分方程, 常识推理.

以专家系统为代表的传统知识工程方法, 在解决如下问题时显得束手无策: 物理世界的常识推理; 特定领域的定性推理; 遵循“第一原则”的基于模型的推理; 反映动态特性的时态推理; 反映直觉思维的因果推理.

定性推理试图通过对物理系统的结构、行为和功能的描述, 在定性级抽象层次上研究物理系统的表示和推理方法, 从而有效地求解上述问题. Kuipers 在文献[1]中建立了一种定性推理的框架, 在文献[2]中又进一步在数学上将此框架规范化. 这2篇文章奠定了基于定性模型的定性仿真方法的基础, 成为定性推理的3种基本方法之一.

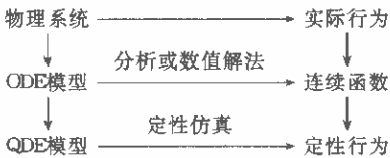


图1 抽象关系图

Kuipers 的定性仿真法建立在图1所示的抽象关系之上. 常微分方程 ODE 和定性微分方程 QDE 都是对物理系统的抽象, QDE 又是对 ODE 的抽象. 但 QDE 能表示不完全知识.

定性仿真是从结构的定性描述, 导出行为的定性描述的过程, 它能够预测一物理系统的可能行为, 而这一物理系统的结构是由不完全知识所表示的. 结构的定性描述即 QDE 模型, 由该系统的物理参数和施加于物理参数之上的约束关系组成, 参数是时间的光滑函数; 行为描述是参数的值随时间变化的情况. 参数的值取自一有序集合, 称为界标值, 参数取界标值的时刻称为时间区分点, 相邻两区分点构成一时间区间. 参数的定性状态为该参数在时间区分点或时间区间上取值和变化的情况. 参数的定性行为是该参数的定性状态随时间变化的序列.

Kuipers 给出的由结构描述推导出行为描述的算法称为 QSIM. 该方法的思想是: “提出转变——过滤不一致组合.” 由物理系统的初始状态开始, QSIM 根据转换表决定出每一参数所有可能的后继状态, 然后使用约束关系检查状态组合的一致性, 并过滤掉不一致行为.

* 作者薛冬白, 1964年生, 讲师, 主要研究领域为人工智能应用基础及应用. 石纯一, 1935年生, 教授, 博士导师, 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: 薛冬白, 太原 030006, 山西大学计算机系

本文 1994-12-29 收到修改稿

由于定性的约束弱于定量约束,一状态可能有多个后继,这时最终得到的定性行为可能是树状的。

QDE 是 ODE 的抽象,是指量空间由实数域抽象为由界标值组成的有序集合,算术和微分约束被扩展为描述方向变化的单调函数约束. Kuipers 在文献[2]中证明,ODE 和 QDE 的解之间也存在抽象关系,该抽象关系是有效的(soundness)、不完备的(incompleteness). 将解常微分方程和定性仿真算法看作定理证明系统,有:

$$\text{DiffEqs} \vdash \text{ODE} \wedge \text{State}(t_0) \rightarrow \text{Beh}. \quad (1)$$

$$\text{QSIM} \vdash \text{QDE} \wedge \text{QState}(t_0) \rightarrow \text{or}(\text{QBeh}_1, \dots, \text{QBeh}_n). \quad (2)$$

有效性指对任一 QDE 描述的 ODE, $\text{State}(t_0)$ 被 $\text{QState}(t_0)$ 所描述,则 ODE 的解必被 QDE 的解 $\text{QBeh}_1, \dots, \text{QBeh}_n$ 之一所描述. 不完备性指(2)式析取项中的一些定性行为可能是虚假的,它不是 ODE 中任何一真实解的抽象.

1 主要方法和技术

在以下主要方法和技术的支持下,定性仿真方法得以逐步走向实用.

1.1 定性建模

基于定性模型 QDE 实现定性仿真,使 QDE 模型的表示和仿真算法可独立于 QDE 模型的构造方法. 由不同的本体论出发,现有 3 种编译器可产生为 QSIM 所用的 QDE:(1) CC—基于 de Kleer 的成份连接方法建造 QDE 模型;(2) QPT—基于 Forbus 的定性过程理论建造 QDE 模型;(3) MISQ—从行为描述自动生成 QDE 模型.

1.2 全局过滤

由于 QSIM 的不完备性,解中可能包含虚假行为,在实际应用中,虚假行为的存在在严重地影响着系统的效率. 构造一组合适的全局过滤器已成为定性仿真要解决的首要问题,下面是 5 种通用过滤器的构造法^[3]:

- 时间和界标值的有限组合法. 构成定性状态的时间、界标值和变化方向的有限种可能组合是有效的过滤条件.

- 高阶求导法. 某些未被约束的行为或振荡行为可通过高阶求导而被删去. 当然对函数求导需要更多的假设.

- 忽略细节法. 通过忽略某些定性特性,振荡的行为可化为单一描述,同时不需要增加新的假设,但代价是可能引出新的虚假.

- 定性相空间中轨线不相交法. 微分方程的解可看作是相空间中的一条轨线,这些轨线在有限时间内不可相交.

- 动能定律法. 从更一般意义上讲, QDE 可视为在力的作用下运动的表示形式. 在行为的任何阶段,系统动能的变化必须等于守恒和非守恒功之和.

1.3 操作域转移

在一些复杂的应用背景中,往往存在多个 QDE 模型,它们分工协作共同描述一系统. 每一 QDE 总有其适用域,当行为要越界时,仿真就在域的边界处停了下来. 假如这时有另一模型它的域在当前域边界的另一边时,一个转移就被建立. 由域转移所连接的两状态在时

间上被认为是同一点,对于此有两种不同的解释,导致不同的处理方法.一种观点认为,域转移是两个有不同约束的域对共享边界上的状态有着相同的描述,这样,同一物理状态在时间上交替被两域所描述.另一种观点则认为,域转移中的两状态可看作是一不连续变化的两边.不连续变化指量的变化在瞬时完成,解决方法有两种:近似法和直接法.

1.4 时间规模抽象

QSIM 算法存在一个问题,使它无法真正应用于大规模复杂系统.这就是界限假设的个数与参数的个数呈指数增长关系,而界限分析是 QSIM 的基本操作之一. Kuipers 在文献 [4]中提出了时间规模抽象法,把一复杂系统分解为由简单的、相互作用的平衡机制构成的层次结构,每一机制操作在不同的时间规模上.这样,快机制可视慢机制为恒定的,是其共享参数的来源,而慢机制则把快机制看作是瞬时的,在快机制看来存在一演变过程的共享参数,在慢机制看来则是一函数关系.

图 2 是一个三级时间规模层次图,显示在一初始扰动的影响下焦点和信息在各层次间的切换和传递过程.给定一初始扰动①,与此相关的某机制开始仿真,产生一系列定性状态最终到达平衡;这时 QSIM 识别与此机制共享参数的某快机制,一个传播发生,以决定快机制的平衡状态②;与此机制共享参数的某慢机制也被识别,共享参数作为扰动引起慢机制的仿真③;慢机制同样向下传播平衡状态④⑤.

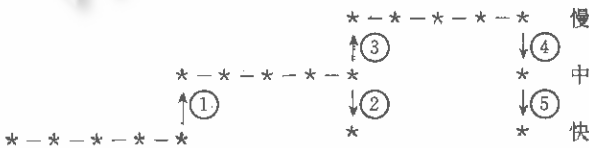


图2 焦点切换示意图

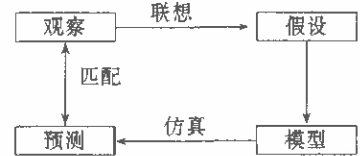


图3 作为因果解释特例的诊断

1.5 定性与定量的结合

定性方法之所以具备推理能力,是以放弃对物理量描述的精确性,引入更多的不确定性为代价.在定性描述中恰当地加入定量信息,既能利用额外的先验知识,减少不确定性,又能解释系统得到的定量观察,在实际应用中是十分必要的.给定一 QDE 模型,通过用实区间注释界标值,用实值函数作为受限包络注释单调函数,可将一定的定量信息加入定性模型中.所得模型称为准定量微分方程 SQDE,基于 SQDE 实现混合推理的方法有如下几种.[5]

- Q2:受限范围传播法.在 QSIM 预测出定性行为的基础上,Q2 在每一时间区分点上采用范围传播算法,计算该点上的参数的受限范围.受限范围可通过约束传播以得到更紧的范围.Q2 的缺点为,其定量预测精度与定性行为的粒度有密切关系.当定性区分点少时,所产生的受限范围太保守.

- Q3:自适应离散化方法.为克服 Q2 的缺点,Q3 采用了自适应离散化技术,使定性粒度可通过插入一些额外的定性状态而自动调整.

- 动态包络法.对给定的 SQDE 和初始状态,该法首先找出其极端方程组,来确定每一参数导数的受限变化范围;然后使用常规的数值仿真方法,如 Runge—Kuta 法,对极端方程进行仿真,得到参数的动态包络.

2 应 用

2.1 诊 断

从建模和仿真的观点看,诊断只是因果解释问题的一个特例.所谓给出一事件的因果解释,就是显示该事件是如何从一组规则和一组初始条件下推导出来的.这样诊断即为,通过一组规则和特定的初始条件来解释一组观察,或者说观察作为规则和初始条件的结果而被预测.图 3 是基于此观点的诊断框架,工作原理是:使用假设驱动法或基于模型的诊断法从观察中生成可能的故障假设;每一假设都与一机制和一原始原因相联系;在给定的初始条件下,相关的机制开始仿真,产生该假设系统可能行为的定性行为描述;仿真的结果将与观察匹配,如果假设被证实,定性仿真将产生关于外部观察和内部参数的丰富描述,以及它们是如何从原始原因推导出来的演绎过程.

在很多诊断应用中,一方面无法得到精确的故障模型,另一方面所得到的观察也不是完全的.在这种情况下,只有操作在定性层次上描述才是可能的.QSIM 方法使得这类问题可解且保证在数学上正确.^[6]

2.2 监 控

诊断任务可以很自然地融进监控中,但任务的根本出发点是不同的.诊断的任务是基于约束中止观点来寻找一最小冲突集.而监控的任务则是维持一机制的准确模型和机制的状态,即使发生故障和故障被修复.这一需求导致 Dvorak 和 Kuipers 构造了一监控器 MIMIC.^[7]MIMIC 不仅能够解释所获得的观察,还能预测行为的发展,以及预测在采取可能的控制行动后所产生的影响.其基本思想为:对照由若干模型预测出的系统行为,跟踪系统的观察状态.那些与观察不符的模型被新的、适当的模型所替代.

按照以上的思想,MIMIC 要想成功,关键在于存在有限个可行的模型来覆盖相当大的假设集.传统的 ODE 模型由于要求明确的函数形式和数值参数而难以胜任,基于定性模型是目前最佳选择.实际上在 MIMIC 中使用了 SQDE 模型,这使得 MIMIC 一方面继承了定性仿真的优点,能预测出系统所有可能的行为(罕见的行为也不会忽视,这一点对于监控系统是至关重要的),且适应于知识不完全和定量信息不可靠的应用背景;另一方面给每一定性行为附加定量信息,使得数值观察与行为预测可直接的比较,且增强了预测的准确性和及时性.

2.3 设 计

人们常使用这样一些动词如“防止”、“保证”等来描述一装置的功能或目的.David^[8]通过定义和使用目的描述,将定性仿真应用到设计中去.所谓设计,即给出一装置的目的描述,包括设计规格说明和其它初始条件,找一结构,使其行为满足要求.设计过程是“提出—鉴定—修改”的反复过程.首先根据目的描述提出一初始结构,有了结构便使用定性仿真方法推导出其所有可能的行为,分析和评价这些行为是否满足条件,找出不想出现的行为,进而回溯发现引起这些行为的原因,帮助做出修改,再提出新的结构,直至满足目的描述指定的要求.目的描述不仅可用于指导设计还可用于设计复用和诊断.

2.4 相图分析

相图是表示非线性动力学系统并对其进行定性推理的有力工具.动力学系统的许多主

要特征都可由相图中轨线的几何特性反映出来. Lee 和 Kuipers^[9]提出的 Qportait 方法将定性仿真法应用于构造一类二维一阶、自治的、非平凡的微分方程的相图. 相图是轨线的集合, 轨线是系统状态随时间的变化, 系统状态被表示为相空间中的点. 与基于数值的构造方法相比, 基于定性仿真法的优点, 一是包容保证, 能捕获一系统相图的所有本质特征; 二是该系统可由不完全知识所描述.

3 结 语

基于定性模型的定性仿真方法有两个最本质的特征, 一是基于定性模型 QDE, 适用于知识不完全领域; 二是可产生所仿真物理系统的所有可能行为. 前者决定了该方法应用的广泛性, 后者决定了该方法应用的有效性. 有了这两点, 再结合相关支持技术, 相信该方法会不断成熟并应用于众多领域, 特别作为一种定性定量集成技术用于解决“开放的复杂巨系统”.

致谢 参加本文讨论的还有巩昌平、王镛、毛军、廖士中、顾宇红等, 在此一并致谢.

参考文献

- 1 Kuipers B J. Commonsense reasoning about causality; deriving behavior from structure. *Artificial Intelligence*, 1984, 24(1):169~203.
- 2 Kuipers B J. Qualitative simulation. *Artificial Intelligence*, 1986, 29(3):289~338.
- 3 Kuipers B J. Reasoning with qualitative models. *Artificial Intelligence*, 1993, 59(1):125~132.
- 4 Kuipers B J. Abstraction by time—scale in qualitative simulation. In: *Proceedings AAAI—87*, 1987. 621~625.
- 5 Key H, Kuipers B J. Numerical behavior envelopes for qualitative models. In: *Proceedings AAAI—93*, 1993. 606~613.
- 6 Kuipers B J. Qualitative simulation as causal explanation. *IEEE Trans. on Sys. Man, Cyber.*, 1987, 17(3):432~443.
- 7 Dvorak D, Kipers B J. Process monitoring and diagnosis; a model—based approach. *IEEE Expert*. 1994, 6(3):67~74.
- 8 Franke D W. Deriving and using descriptions of purpose. *IEEE Expert*. 1991, 6(4):41~47.
- 9 Lee W W, Kuipers B J. A qualitative method to construct phase portraits. In: *Proceedings AAAI—93*, 1993. 614~619.
- 10 石纯一等. 定性推理进展. 模式识别与人工智能. 1993, 6(2):62~68.

QUALITATIVE SIMULATION WITH QUALITATIVE MODELS

Xue Dongbai

(*Department of Computer Science Shanxi University Taiyuan 030006*)

Shi Chunyi

(*Department of Computer Science Tsinghua University Beijing 100084*)

Abstract Qualitative simulation plays a central role in qualitative reasoning. This paper introduces the method of qualitative simulation with qualitative models, discusses some key techniques of the method, and demonstrates its applications in some areas.

Key words Qualitative reasoning, qualitative simulation, model—based reasoning, QDE, commonsense reasoning.