

文章编号: 1001-0920(2003)02-0181-04

基于可能性理论的案例决策方法研究

周凯波, 冯 珊, 莫 赞, 唐 超
(华中科技大学 系统工程研究所, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 提出基于可能性理论与基于案例推理相结合的双层 CBDT 决策方法。第 1 层: 决策者应用基于案例推理方法, 通过建立在连续集合上问题的可能性分布, 结合不同的决策方法对决策问题的不确定性进行定性分析; 第 2 层: 利用期望效用理论在与问题的可能性分布相关联的方案中选择具体方案。该方法可避免以往基于案例决策方法中所蕴含的一些技术难题。

关键词: 基于案例推理; 可能性理论; 决策
中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Case-based reasoning in decision making based on possibility theory

ZHOU Kai-bo, FENG Shan, MO Zan, TANG Chao

(Institute of System Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Case-based decision theory (CBDT) which combines principles from decision theory and case-based reasoning is studied. A CBDT formalization based on possibility theory and case-based reasoning is presented, which is realized as a two-stage process. In the first stage, the decision maker applies case-based reasoning for quantifying his uncertainty associated with different decisions in form of possibility distributions over the set of consequences. In the second stage, generalizations of expected utility theory is used for choosing acts among associated distributions.

Key words: Case-based reasoning; Possibility theory; Decision making

1 引 言

Gilboa 和 Schmeidler 结合决策理论并基于案例推理方法, 提出了基于案例的决策理论 (CBDT)^[1,2]。在该理论中, 基于相似度的认知能力起到非常重要的作用, 其主要思想是: 假定一个决策者面对一个决策问题, 他可利用过去所遇到的相似问题的解决方案作为基础方案来解决当前问题。

人们在研究中所关注的问题主要集中于决策理论模型和结构形式^[3]。本文在前人研究成果的基础上, 提出一种基于可能性理论的案例决策方法, 并

前人提出的案例决策方法在形式上进行对比分析, 同时探讨了其中基于案例的学习问题。

2 相关研究工作

考虑 CBDT 的形式化问题, 令 Q 是决策问题集, A 是可能方案集, R 表示可能的结果集, 案例库 $C = Q \times A \times R$ 。假定选择 A 中的方案 a 来解决问题集 Q 中的问题 p , 最后产生结果 $r = r(p, a) \in R$, 效用函数 $u: R \rightarrow U$ 分配效用, 给出相应结果, 令 $\text{sim}_Q: Q \times Q \rightarrow [0, 1]$ 和 $\text{sim}_R: R \times R \rightarrow [0, 1]$ 分别度量问题之间与结果之间的相似度函数。这里, 区间 $[0, 1]$

收稿日期: 2001-12-10; 修回日期: 2002-03-13。

基金项目: 国家自然科学基金九五重大项目 (79990580)。

作者简介: 周凯波 (1972—), 男, 湖北天门人, 博士生, 从事基于案例推理、决策理论与方法等研究; 冯珊 (1935—), 女, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统的建模与仿真、Agent 理论与应用等研究。

是相似度的刻画标度形式, 相同的表示也同样适用于效用函数 u 。

假想决策者在以往处理决策问题过程中建有一案例库 $C = \{(p_1, a_1, r_1), (p_2, a_2, r_2), \dots, (p_n, a_n, r_n)\}$ 。在该案例库中, $(p_k, a_k) \in Q \times A, r_k = r(p_k, a_k) \in R, k = 1, 2, \dots, n$, 当对某一决策问题进行决策时, 用到的只是案例库 C 中与当前问题相似的某个案例集 $M \subseteq C$ 。假如案例库中任一确定方案 $a \in A$ 都不能很好地解决问题 p_0 , 那么决策者一般不确定关于效用 $u(r(p_0, a))$ 的结果 $r(p_0, a)$ 。立足于 CBDT 的一系列假设, 便能在以往相似问题解决解决方案的基础上估计出解决新问题的一个新方案。

2.1 Gilboa 和 Schmeidler 的研究工作^[1,2]

Gilboa 和 Schmeidler 在研究 CBDT 过程中, 规定以相关案例结果效用的相似度加权和来估计方案 $a \in A$ 对于当前问题 p_0 的效用值为

$$U(a) = U_{p_0, M}(a) = \sum_{(p, a, r) \in M} \text{sim}_Q(p, p_0) u(r) \quad (1)$$

与期望效用理论中的处理过程一样, 当等式右边求和函数的值最大时, 决策者将获得最好的决策方案估计 (如果案例库为空, 则方案的效用估计值为 0)。如果将式 (1) 中的 $\text{sim}_Q(p, p_0)$ 用一般相似度函数 (一种归一化的平均相似度函数形式)

$$\text{sim}(p, p_0) = \frac{\sum_{(p, a, r) \in M} \text{sim}_Q(p, p_0)}{\sum_{(p, a, r) \in M} \text{sim}_Q(p, p_0)}$$

代替, 便可得到式 (1) 所示的线性函数的一般形式。关于 CBDT 的其他理论细节, 文献 [1, 2] 中已有详细描述, 这里不再赘述。

2.2 CBDT 的 Fuzzy 模型形式^[4]

文献 [4] 基于 Fuzzy 的案例决策方法提出一种基于相似性的近似推理方法。令“ \sim ”是一种多值蕴含连接, 对于待求解的新问题 p_0 , 给定解决新问题的案例库子集 $M \subseteq C$ 。解决新问题方案 a 的效用估计值定义为

$$U_{p_0, M}(a) = \min_{(p, a, r) \in M} \text{sim}(p, p_0) u(r) \quad (2)$$

式 (2) 表明, 如果选择与问题 p_0 相似的问题解决方案 a 来解决问题 p_0 , 则总能得到较好的结果。式 (2) 的特殊形式为

$$U(a) = U_{p_0, M}(a) = \min_{(p, a, r) \in M} \max\{\text{sim}(p, p_0), u(r)\} \quad (3)$$

更好的描述形式为

$$U(a) = U_{p_0, M}(a) = \max_{(p, a, r) \in M} \min\{\text{sim}(p, p_0), u(r)\} \quad (4)$$

从式 (4) 可以看出, 至少有一个类似于问题 p_0 的问题解决方案 a 能解决问题 p_0 , 并能得到较好的结果。式 (3) 只有当案例库至少包含一个问题方案二元对 (p, a) 且 $\text{sim}(p, p_0) = 1$ 才有效, 否则会出现式 (3) 中方案估计过高的情形。如果案例库中没有问题与当前问题 p_0 相似, 那么为了克服这些困难, 本文提出修改式 (3) 和其优化的描述形式方法。该方法是建立在每个方案的一般性相似函数基础上的, 但式 (3) 和 (4) 描述的不完整性为计算 p_0 的相似性问题带来了一定的困难。

3 基于可能性理论的案例决策方法

在第 2 节关于 CBDT 形式化描述的基础上, 定义问题、方案二元对 $s = (p, a)$ 为某一具体案例, 并用 $S = Q \times A$ 表示案例中所有问题和方案二元对的集合, 由 sim_Q 可得一关于 S 的相似度估计 sim_S 为

$$\text{sim}_S((p, a), (p', a')) = \begin{cases} \text{sim}_Q(p, p'), & a = a', \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad p, p' \in Q$$

该定义在式 (1) 中作为一种累积作用具有相同的影响: 为了估计用来解决问题 p_0 方案 a 的有效性, 必须将案例的相同方案都考虑进去。尽管如此, sim_S 仍用更一般的方法定义, 以便方案的假设建模。

根据 CBR 假设的基本思想 (两种问题越相似, 越能肯定二者结果是相似的), 采用确定规则的概念可得到关于 CBDT 恰当的形式化描述: X 越接近于 \tilde{A} , 越能确定 Y 接近于 \tilde{B} 。该形式为一特殊的模糊规则, 这里 \tilde{A} 和 \tilde{B} 是模糊集。根据 Zadeh 提出的基于可能性理论的近似推理方法^[5], 这一规则对以上界形式 $\pi(y|x) = \max\{1 - \tilde{A}(x), \tilde{B}(y)\}$ 描述的二元对 (x, y) 的可能性强加了一约束。将该方法应用于 CBDT 问题, 发现案例库子集 M 中每一案例对不可知结果 $r_0 = r(p_0, a)$ 的可能性都强加了一个约束, 这里 $a \in A$ 且 $r_0 \in R$ 。由于确定词义学对应于模糊规则中的蕴含方法, 与这些规则关联的一些案例可相互组合到一起, 因此用最小算子给一般联结过程建模, 将模糊集与相应的相似度函数相关联, 并应用最小定律, 可得到如下可能分布

$$\pi_{a, M}(r) = \min_{(p, a, r) \in M} \max\{1 - \text{sim}_S((p_0, a), (p, a)), \text{sim}_R(r, r)\} \quad \forall r \in R \quad (5)$$

该分布描述了在选定方案 a 的情况下, 结果 r_0 的不确定性。对于某一确定应用领域, 考虑 CBR 假设成

立的度, 式(5)可改写为

$$\pi_{a,M}(r) = \min_{(p,a,r) \in M} \max \{1 - m(\text{sim}_S((p_0, a), (p, a))), \text{sim}_R(r, r)\}, \quad \forall r \in R \quad (6)$$

其中知识适应度函数 $m: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ 。式(6)对应于一般 CBR 决策者的知识形式, 并允许 m 有足够的知识适应性。例如, $m = 0$ 意味着各种情况的相似度不包括结果的相似度, CBR 假设根本不适用。实际上, 式(6)是下式的一种特殊描述形式。

$$\bar{\mu}_{a,M}(r) = \min_{(p,a,r) \in M} \eta_{\text{sim}_S((p_0,a), (p,a))}(\text{sim}_R(r, r)) \quad \forall r \in R \quad (7)$$

式中 $\{\eta_k | 0 \leq \alpha \leq 1\}$ 是模糊测度的参量等级。这样, 选择 A 中的某一方案 a 的问题便转变为从可能性分布集 $\{\pi_{a,M} | a \in A\}$ 中选择一方案的问题。这种情况与统计决策理论十分相似。有多种解决方法, 例如: 采用可能性理论方法, 并将得到的可能性分布作为上近似的概率分布; 然后根据 Choquet 期望效用理论(采用 Choquet 积分形式)^[7] 估计方案 $a \in A$ 。该理论定义了一般性期望效用, 尤其是期望效用的上界

$$U(a) = \text{CEU}(\pi_{a,M}) = (\text{Ch})_R(u \circ r) d\pi_{a,M}$$

式中: CEU 为 Choquet 期望效用的表示符, (Ch) 为 Choquet 积分形式。尽管如此, 到目前为止, 如果通过线性序数比例的一般形式(在 $[0, 1]$ 区间内)可度量相似、是否和偏好等情况, 且式(6)中的“ $1 - (\cdot)$ ”能用相似规模的逆序函数所替代(假定与优先权规模是相对应的), 则本文方法也可用纯粹的定性方法来解释。经保序函数 h 作用后, 我们认为似乎合理与偏爱两种情形是相通的, 那么文献[6]的定性决策理论就可以应用, 且导致如下悲观的方案估计

$$U(a) = \text{QU}(\pi_{a,M}) = \min_r \max \{n[h(\pi_{a,M}(r))], u(r)\}, \quad a \in A \quad (8)$$

其中: n 为逆序函数, QU 为悲观效用的表示符。另外, 建议在使用式(8)时, 用式(6)的另一种形式, 即

$$\pi_{a,M}(r) = \max_{(p,a,r) \in M} \text{sim}_Q(p_0, p), \quad \forall r \in R \quad (9)$$

4 比较分析

4.1 结构形式方面

第 3 节提出的基于可能性理论的 CBDT 方法与第 2 节方法的主要区别在于: 后者使用的是建立在相似度和效用概念基础上的一种决策方法, 而前者将信念与效用的相似度结合在一起研究, 是统计决策理论的扩展。事实上, 基于案例推理并不是用在

直接选择某一方案上。确切地讲, 案例库子集 M 中的案例只能看作一个观察值, 并且当前问题与 M 中的案例基于相似度的信息关联度, 会影响决策者的价值(信念)取向, 这里所描述的情况是建立在 R 上的可能性分布。例如: 考虑到方案 a 对于当前问题的相似问题已能很好解决, 这可能会增强决策者选择方案 a 解决当前问题的信念。事实上, 第 3 节方法实现了两层处理过程, 其中真正的决策问题只能在第 2 层, 需依靠统计决策理论来解决。

本文考虑用相似度—信念的连接形式取代相似度—效用的连接形式, 原因有以下 3 点:

1) 决策者在采用具有启发式特征的 CBR 推理方法决策时, 可减小决策结果的不确定性。之所以认为 CBR 对决策者作决策具有启发性, 是因为决策者可从案例库中与新问题相似案例的决策方案上受到启发, 从而采用更好的方案来解决当前问题。

2) 采用基于案例推理来辅助决策可避免很多技术困难。在案例库中没有案例与当前问题相似的极端情况下(即案例库实质上是空的), 这一优势更加明显。此时, 基于案例的推理可用来估计解决当前问题所选方案的效用。在基于案例推理的效用估计结果完全被忽略的情况下, 给所选方案一缺省效用值是非常自然的事情, 当式(6)中可能性分布 $\pi = 1$ 时可反映这种情况。更一般的情况是: 与点估计相比, 不确定测度更能再生成案例库中案例的确信特征。如式(1)的方案效用估计值不能区分“案例库中包含一种问题且有许多属性与当前问题相似”和“案例库中包含许多问题且存在有大量属性与当前问题一点也不相似”两种情况^[4]。

3) 两种连接形式差异。前者描述知识, 后者作决策, 从设计智能系统的角度看, 前者具有一定的优势。在知识表示层上, 不同信息资源的集成要比在决策层上做同样的工作减少很多麻烦, 尤其是后者在传统统计决策理论基础上还要做相应的工作。第 3 节方法允许在知识表示层上得到的 CBR 推理过程结果, 可较为容易地与用模糊规则描述的一般背景知识相结合。

4.2 基于案例的学习

比较上面提到的几种不同的决策方法, 案例库中案例所包含的信息会影响决策方案的估计, 这些决策方案的不同从式(1)、(3)和(4)中可体现出来。根据式(3), 每个被考察的案例只能减少一个方案的效用估计值, 这反映出决策规则的悲观或谨慎特征; 与此相反, 根据式(4), 每个被考察的案例只能对方

案的效用估计值产生积极影响。式(6)和(9)中所包含的可能性结果的相对特征也很重要,由式(9)可知,由于未作任何考察,决策者应尽可能多地考虑所有结果,每个新案例作为一种约束,减少了确定性结果的可能性。若在 $[0, 1]$ 区间上考察式(7),令 $\eta_{1[x, 1]}$,这一点尤为明显。这样,在 $\bar{\mu}_{a, M}(r) \in \{0, 1\}$,且对于方案A中给出的一个方案a的可能结果为

$$O_{a, M} = \{r \in R \mid \text{sim}_S((p_0, a), (p, a)) \in \text{sim}_R(r, r)\}$$

因而每个新案例完全不包含确定性的结果。虽然如此,我们仍注意到决策者经常在学习过程中取消这种不包含性或减少其产生的可能性程度。通过式(6)所表现出的函数 m ,被考察的案例会重新获得它的CBR知识。这种学习能力的结合应认为是基于式(6)的CBDT研究方法的一个重要方面。

根据式(9),决策者从可能分布 $\pi = 0$ 开始,每个新案例充当确信结果证据的角色,并相应地增加可能性。宽松一点说,如果决策者依赖式(6),他便知道什么可能发生,什么不可能发生。从某种意义上讲,可认为式(9)是一种数据驱动的方法,而式(6)则是一种知识驱动的方法。

另外,到目前为止,我们注意到面向CBDT的方法或多或少地忽视了对案例信息的依赖。假设有两个问题 p 和 p 都和当前问题 p_0 相似,且方案a能很好地解决问题 p 和 p ,那么我们是否有足够的证据相信方案a也能很好地解决问题 p_0 ,这依赖于问题 p 和 p 的相似度。例如,给定方案a为问题 p 的解决方案,如果方案a同时能很好地解决问题 p ,那么对于问题 p 和 p 或多或少有些相同,我们不应感到惊奇。然而,如果问题 p 和 p 相似度很小,那么方案a只是解决问题 p_0 的一般化解决方案。更概括地说,如果一个方案能很好地解决两个或更多问题(这些问题是相似的,但不相同)的观察,将强有力地支持CBR的假设;反之,CBR假设也进一步支持再使用该方案解决相似的问题。

5 应用举例

某天晚上,张三手中有两部电影(一部为《大腕》,另一部为《指环王》),由于时间关系他想从中选择一部观看。这属于新决策问题。

张三已知道有关这两部电影的一些案例,如表1所示。其中每个人对所看电影的满意度表示案例的结果集,满意度的取值在 $0 \sim 1$ 之间,值越高表示

满意度越高。

表1 张三用于推理的案例子集

案例号	问题域	方案(电影名)	结果集(满意度)
case 1	李四	大腕	0.9
case 2	王五	指环王	0.6
case 3	杨云	大腕	0.6
case 4	童军	指环王	0.4
case 5	魏天	大腕	0.9
case 6	周东	指环王	0.8

已知张三与李四、王五、杨云、童军、魏天、周东等6人在个人爱好(看电影)方面的相似度分别为0.8, 0.7, 0.5, 0.7, 0.4, 0.1。

应用式(1)和平均相似度的计算公式,估计张三的两个备选方案的效用值分别为

$$U_{\text{大腕}} = \frac{0.8}{0.8 + 0.5 + 0.4} \times 0.9 + \frac{0.5}{0.8 + 0.5 + 0.4} \times 0.6 + \frac{0.4}{0.8 + 0.5 + 0.4} \times 0.9 = 0.81$$

$$U_{\text{指环王}} = \frac{0.7}{0.7 + 0.7 + 0.1} \times 0.6 + \frac{0.7}{0.7 + 0.7 + 0.1} \times 0.4 + \frac{0.1}{0.7 + 0.7 + 0.1} \times 0.8 = 0.52$$

因为 $U_{\text{大腕}} > U_{\text{指环王}}$,因此张三会选择在当天晚上观看电影《大腕》。

6 结语

本文在简述前人研究CBDT的基础上,提出了基于可能性理论和基于案例推理方法相结合的双层CBDT决策方法。第1层:决策者应用基于案例推理方法,通过建立在连续集合上的可能性分布,结合不同的决策方法对决策问题的不确定性进行定性分析;第2层:在方案中利用期望效用理论的一般方法,尤其是在与问题可能性分布相关联的方案中选择具体方案。该方法可避免以往基于案例决策研究方法中所蕴含的一些技术难题,可产生CBR和CBDT的启发特征,在问题案例不确定性的情况下建立决策模型。

对于基于案例的决策方法,例如不确定性问题之间相似度的获得,案例的表示形式以及案例检索技术等问题尚有待于继续深入研究。

(下转第189页)

主体可以由于年纪或缺乏能量的原因而死亡。超级主体中一些主体的死亡, 将导致服务的终止(如果超级主体中没有其他主体提供相同的服务)或不会导致服务终止(如果在超级主体中存在该主体的一个复制)。

(11) 多样性

生物免疫网络的主体层提供了足够的多样性。我们可以设计带有不同行为的多主体, 用于执行相同任务以确保足够的多样性。为了确保进化过程涉及到足够范围的行为因素, 而且导致的服务能执行自然选择使得系统适应和进化, 以满足许多种类的环境条件。

(12) 通讯机理

生物网络结构中的主体必须能够通讯。一个主体能够简单地观察或检测它所处环境中的一些状态, 以获取信息。

3.3 原型实现

目前, 本文已采用 Windows 2000 运行环境和 Java 语言编程环境实现了生物网络平台软件, 通有主体和仿真器的部分功能。Java 的网络通讯模块支持 Sockets, URL 通讯和分布式对象协议(RMI), 很容易实现分布主体间的通讯; 标准 Java 虚拟机、对象序列化机制和基于 Server 的软件结构等特点, 使移动 Agent 技术在 Java 中易于实现。在具体设计时, 采用面向 Agent 和面向对象的程序设计技术。

在生物平台仿真软件中, 有生物网络结构的不同软件包, 如仿真器、图形用户界面、节点和主体等。我们通过搭建虚拟网络, 并在其上运行生物网络平台软件, 显示生物网络各个组成部分的基本操作, 并研究了突现行为: 首先独立地设计每个单个元件, 然后将所有元件看作一个组来构造局部网络, 再通过局部网络来构造全局网络, 从而发现超级主体, 展现

突现行为。我们还验证了一些生物机理, 例如管理主体的生命周期循环, 提供初始化、复制、变异、重组、交叉、销毁等操作; 能量管理服务; 资源分配; 社会网络服务; 关系管理服务以及发现主体的方法等。

4 结 语

生物免疫网络结构是生物信息学、免疫学、突现计算、智能科学、计算机科学、系统工程、数学、物理和哲学等领域的交叉研究。本文的生物网络结构将为未来网络结构的自组织、自维护、自修复、安全、优化和控制等研究开辟一条新颖的途径, 提供一个良好的理论研究的仿真环境和实际应用实验平台。在此平台上可研究未来 Internet 网络结构及设计 Internet 新的信息智能服务和应用。其进一步的工作是扩充生物网络软件仿真平台的功能, 并在此平台上进一步开发生物网络结构应用和服务的仿真器, 实现和构造复杂的生物网络结构的服务和应用。

参考文献(References):

- [1] 李夏, 戴汝为. 突现(emergence)——系统研究的新观念[J]. 控制与决策, 1999, 14(2): 97-102
(Li X, Dai R W. Emergence—A new concept of system research [J]. *Control and Decision*, 1999, 14(2): 97-102)
- [2] Bhalla U S, Lyengar R. Emergent properties of networks of biological signaling pathways [J]. *Science*, 1999, 283(5400): 381-387.
- [3] Zak P. Immune network—Model inspired by immune system [J]. *Neural Network World*, 1997, 7(6): 739-756
- [4] 丁永生, 任立红. 人工免疫系统: 理论与应用[J]. 模式识别与人工智能, 2000, 13(1): 44-51
(Ding Y S, Ren L H. Artificial immune systems: Theory and applications [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2000, 13(1): 44-51)

(上接第 184 页)

参考文献(References):

- [1] Gilboa I, Schmeidler D. Case-based decision theory [J]. *Quarterly J of Economics*, 1995, 110(3): 605-639
- [2] Gilboa I, Schmeidler D. Case-based knowledge and induction [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, 2000, 30(2): 85-95
- [3] 田大钢. DSS 结构的联接主义观点[D]. 武汉: 华中理工大学, 1999
- [4] Dubois D, Esteva F, Garcia P, et al. Fuzzy modeling of case-based reasoning and decision [A]. *Case-based Reasoning Research and Development. Proc ICCBR-97* [C]. New York: Springer-Verlag, 1997. 1266: 599-610

- [5] Zadeh L A. 模糊集与模糊信息粒理论[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2000
- [6] Dubois D, Prade H. Decision-theoretic foundations of qualitative possibility theory [J]. *European J of Operational Research*, 2001, 128(3): 459-478
- [7] Schmeidler D. Subjective probability and expected utility without additivity [J]. *Econometrica*, 1989, 57(3): 571-581