

文章编号: 1001-0920(2009)07-0990-06

基于最大公约子范畴的应急决策知识匹配研究

王庆全, 荣莉莉, 于 凯

(大连理工大学 系统工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 在范畴化知识结构的基础上, 提出一种基于最大公约子范畴的知识匹配方法, 其解决的主要问题就是通过
对决策者的需求和背景知识的匹配, 有效量化决策知识的语义处理, 提高决策背景知识的萃取效率. 实验结果表明,
该方法能够同时提高知识匹配过程中的精度和召回率.

关键词: 应急决策支持; 知识匹配; 范畴论; 最大公约子范畴

中图分类号: F062.3

文献标识码: A

Emergency decision-making knowledge matching based on greatest common subcategory

WANG Qing-quan, RONG Li-li, YU Kai

(Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China. Correspondent: WANG Qing-quan, E-mail: dlwqq@hotmail.com)

Abstract: Based upon the categorical knowledge structures, a knowledge matching method for supporting decision making based on greatest common subcategory is presented. This method focus on matching the requirements of decision makers to background knowledge, quantizing the semantic processing of decision-making knowledge, and raising the efficiency of decision-making knowledge acquisition. Experimental results show that the method can improve the precision and recall in knowledge matching simultaneously.

Key words: Emergency decision-making support; Knowledge matching; Category theory; Greatest common subcategory

1 引 言

面对不同的突发公共事件(如地震、雪灾、恐怖袭击、疫病流行、飓风、海啸、空难、集体中毒和重大工业事故等), 各级政府和应急反应机构的决策者需要在很短的时间内, 针对发生的突发事件情境, 作出高效的决策和指挥, 这就离不开有效的应急决策支持系统. 应急决策支持是同各级政府制定的应急相关法律、法规和预案紧密相关的, 但随着这类应急文档数量的增多, 根据特定突发事件情境来获得决策背景知识就比较困难, 尤其是如何更为有效地从以往突发事件应对的经验中快速获得背景知识就变得愈发困难. 在我国 2008 年发生特大雪灾和汶川强烈地震后, 这种对决策者的背景知识的有效支持就显得尤为重要. 因此, 利用现有的计算机和网络技术, 快速而有效地向决策者提供必要的决策背景知识是

应急反应的一项重要内容, 人为的筛查和判断往往显得力不从心. 根据复杂的应急情境, 对背景知识进行重组^[1] 是提供决策背景知识的重要环节, 为实现这一过程, 高精度知识匹配量化便成为面向语义的应急决策知识获取的重要前提.

目前, 面向语义的知识匹配大多是基于语义相似度计算的匹配方法, 如基于概念图^[2] 和面向本体^[3] 的语义匹配. 为提高知识匹配的精度, 需要避免大幅度的降维, 以及大量语义信息的缺失带来精度的降低. 基于定型范畴论^[4], 决策者需求和应急文档中的背景知识都可以被表示成为一种范畴化的知识结构——知识片断^[5], 它是具有网状拓扑特性和高维语义特征的知识结构. 范畴论中, 子范畴^[6] 通常意味着提取一个对象子集和与其相关联的态射集, 若在两个或两个以上的知识片断之间, 存在着一个相

收稿日期: 2008-07-05; 修回日期: 2008-10-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70571011, 70431001).

作者简介: 王庆全(1974—), 男, 黑龙江虎林人, 博士生, 从事知识管理、智能计算方法的研究; 荣莉莉(1964—), 女, 辽宁大连人, 教授, 博士生导师, 从事应急知识管理等研究.

同的子范畴,则这些知识片断显然具有一定的匹配相似性.鉴于这种思想,本文提出一个基于最大公约子范畴(GCS)的用于高精度决策背景知识获取的匹配方法,用以解决高维知识结构上的匹配量化问题.

2 范畴化知识结构

各类应急文档中蕴含的知识和信息覆盖了大部分可能发生的应急问题,通常会给出具体的解决办法、流程等.但是由于这类文档数量巨大,不同地区的应急文档实际上具有相互的可借鉴性,高精度知识匹配在应急反应过程中就显得尤为重要.为了实现高精度应急知识匹配的目标,领域知识表示就必须有效地维持知识的高维度语义特性,而范畴化知识结构能在一定程度上满足这个需求.

范畴论^[7]是一个年轻的数学分支,它着重于将不同数学领域的结构化概念,通过统一的方式进行表示^[8].范畴论早在 20 世纪 90 年代初期就被引入了计算机科学领域^[9],同时也被看作是知识科学和知识工程的数学基础^[4],其构造已被用于本体融合^[10]和依照句法的软件融合^[11]等知识相关领域.从定型范畴论的视角,一个知识片断就是一个定型范畴^[12],它由一类对象、一类态射、一类态射定型和一类定型组合规则构成,并具有两点间多边的网状的拓扑结构,它能在相对充分语义信息的基础上,通过对范畴化结构间的相似度计算,实现有效的知识匹配.在范畴化知识结构上的匹配,更多地体现在其特有的拓扑结构上,即求得知识片断间的类似于最大拓扑子范畴^[13]的最大公约子范畴.

3 知识匹配过程

3.1 最大公约子范畴的定义

在范畴论中,建立范畴间的关系是通过函子来实现的.知识片断是依照概念间的语义关系建立的,建立两个知识片断中对象集间和态射集间的完全映射很困难,因而量化知识匹配需要求得知识片断间交叠部分所占的大小或比例.若能按照一定数量的对象和态射及其对应的相似度,求得最大化的交叠部分,即最大公约子范畴,并且在一定的匹配阈值约束下,知识片断间获得的最大公约子范畴是唯一的.当两个或两个以上的知识片断具有公共子范畴,并求得其最大公约子范畴时,便可求得知识片断间的匹配相似值.

概念和概念之间,关系与关系之间都应当存在从属的相似性,扩展到整个范畴化知识结构,态射的定型同样也具有这样从属的相似性.下面将给出公约子范畴和最大公约子范畴的具体定义.

定义 1 对象 O_1 是对象 O_2 的子对象,当且仅当 O_1 作为概念可以被抽象为 O_2 ,表示为 $O_1 < O_2$.例如

“地震”可以被抽象为一种“自然灾害”,因此可将“地震”作为“自然灾害”的一个子对象.

定义 2 态射 f_1 是态射 f_2 的子态射,当且仅当忽略了连接的对象后, f_1 仍然可能保持一种对 f_2 的被包含关系,表示为 $f_1 < f_2$.例如,在应急反应过程中,态射“疏散”就是“营救”的一个子态射,尽管它们关联了不同的对象.

可以看出,这种对象和态射相互间的所属关系,是一种明显的领域知识,需要有领域专家进行预先定义,它们通常具有层次化的树形结构^[14].

定义 3 给定两个定型 t_1 和 t_2 ,当同时满足如下 3 个条件:

$$\begin{cases} [\text{dom}(t_1) < \text{dom}(t_2)] & [\text{dom}(t_1) = \text{dom}(t_2)], \\ [\text{cod}(t_1) < \text{cod}(t_2)] & [\text{cod}(t_1) = \text{cod}(t_2)], \\ [\text{mor}(t_1) < \text{mor}(t_2)] & [\text{mor}(t_1) = \text{mor}(t_2)], \end{cases} \quad (1)$$

则 t_1 是 t_2 的一个子定型,表示为 $t_1 < t_2$.其中: $\text{dom}(t)$ 为定型 t 的域, $\text{cod}(t)$ 为定型 t 的共域, $\text{mor}(t)$ 为定型 t 的态射值.例如:“组织建立 应急控制中心 建立 救援队”可以被看作“组织 建立 组织”的一个子定型.

定义 4 给定两个定型范畴 $K_1 = (O_1, M_1, T_1, R_1)$ 和 $K_2 = (O_2, M_2, T_2, R_2)$,当满足下列条件时,称 K_1 是 K_2 的一个子范畴.

即对于对象集 O_1 中的每一个定型 t_i ,在对象集 O_2 都有唯一的一个定型 t_j 与之对应,并使得

$$(t_i = t_j) \quad (t_i < t_j). \quad (2)$$

定义 5 给定两个定型范畴 $K_1 = (O_1, M_1, T_1, R_1)$ 和 $K_2 = (O_2, M_2, T_2, R_2)$,其公约子范畴 $K_{12} = (O_{12}, M_{12}, T_{12}, R_{12})$ 定义如下:

T_{12} 是定型集 T_1 和 T_2 的交集,记为

$$T_{12} = T_1 \cap T_2. \quad (3)$$

两个定型间的 $t_i = t_j$ 和在一定阈值范围内的 $t_i < t_j (t_i \in T_{12}, t_j \in T_1 \cup T_2)$ 都可看作相等关系,并且有

$$M_{12} = M_1 \cap M_2, O_{12} = O_1 \cap O_2, \quad (4)$$

其中 M_{12} 包含 O_{12} 中所有的单位态射.如果 K_{12} 中的所有态射都是单位态射,则知识匹配仅是面向对象的匹配,即面向语义结构的知识匹配可以近似地降为基于关键词的匹配.图 1 描述了定型范畴 K_1, K_2 和其生成的公约子范畴 K_{12} .在实际情况中,由于范畴化知识结构的特性,两对象间的态射数量可以大于 1.

定义 6 给定两个知识片断 $K_1 = (O_1, M_1, T_1, R_1)$ 和 $K_2 = (O_2, M_2, T_2, R_2)$; $K_{12} = (O_{12}, M_{12}, T_{12},$

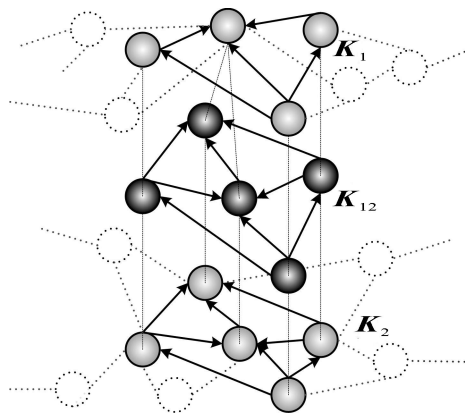


图 1 最大公约子范畴

R_{12}) 是其最大公约子范畴,当且仅当任何新增的对象或态射都会导致在特定匹配阈值下的错误结果.即满足公约子范畴的最大对象和态射的数量,这个公约子范畴就是最大公约子范畴.

生成 GCS 依赖于定型范畴的各元素相似程度的判定,它可以通过判定定型范畴中的元素间(包括对象、态射和定型)的语义距离来实现.这些元素的重要程度会影响语义距离的求解,进而影响生成 GCS 的距离阈值.同时,GCS 也是一个定型范畴,它同时是参与匹配的两个或两个以上定型范畴的子范畴.

3.2 GCS 的求取步骤

从最大公约子范畴的定义可以看出,求取 GCS 的步骤主要就是寻找两个或两个以上的定型范畴间的具有相似关系的定型.其过程可分为以下几步:

- 1) 首先匹配出两个定型范畴符合一定相似阈值的对象;
- 2) 然后提取出对象间的态射,并判断这些态射之间的语义相似度是否符合特定的阈值;
- 3) 判断这些态射和对象组成的定型,每一定型需要进行逐一匹配判断,判断它们之间的语义特征是否相似;
- 4) 最后,对匹配定型和对象进行连接,形成这两个定型范畴的 GCS.

显然,产生的 GCS 的结果依赖于对象、态射和定型的相似性计量,如果匹配过程中没有态射或定型的匹配符合阈值条件,则可通过适当地调整相似的阈值,来降低匹配的精度.如果只有对象符合匹配阈值条件而没有定型的匹配,则匹配就被认为是基于关键词的离散型的匹配.实际上,这种匹配可以部分地被看作是一种网络匹配^[15].下面通过一个例子来考察最大公约之范畴的构建过程.

给定两个知识片断 K_1 和 K_2 ,它们的拓扑结构见图 2.为了方便显示,忽略概念间相似的一对多情

况,以及两个对象间的多态射情况.

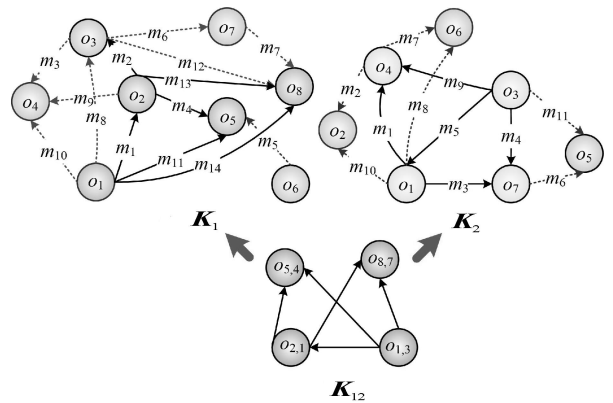


图 2 最大公约子范畴

首先,根据对象间的相等或相似判断的相似阈值,有

$$\begin{cases} o_{1(2)} = o_{2(1)} \text{ (OR } o_{1(2)} < o_{2(1)} & o_{1(2)} > o_{2(1)}), \\ o_{1(1)} = o_{2(3)} \text{ (OR } o_{1(1)} < o_{2(3)} & o_{1(1)} > o_{2(3)}), \\ o_{1(5)} = o_{2(4)} \text{ (OR } o_{1(5)} < o_{2(4)} & o_{1(5)} > o_{2(4)}), \\ o_{1(8)} = o_{2(7)} \text{ (OR } o_{1(8)} < o_{2(7)} & o_{1(8)} > o_{2(7)}), \end{cases} \quad (5)$$

其中 $o_{i(j)}$ 表示第 i 个定型范畴中第 j 个对象.

这里假设对象间的态射都具有相似性,并且有态射间定型的相似性如下:

$$\begin{cases} f_t(o_{1(1)}, o_{1(2)}) > f_t(o_{2(3)}, o_{2(1)}), \\ f_t(o_{1(1)}, o_{1(5)}) > f_t(o_{2(3)}, o_{2(4)}), \\ f_t(o_{1(1)}, o_{1(8)}) > f_t(o_{2(3)}, o_{2(7)}), \\ f_t(o_{1(2)}, o_{1(5)}) > f_t(o_{2(1)}, o_{2(4)}), \\ f_t(o_{1(2)}, o_{1(8)}) > f_t(o_{2(1)}, o_{2(7)}). \end{cases} \quad (6)$$

因而,可以根据定型范畴 K_1 和 K_2 生成出它们的 GCS,见图 2 中的 K_{12} .

3.3 定型范畴的相似度计算

概念间的距离判定是一种重要的面向语义的知识处理方法,其被广泛用于知识处理等领域.但是,仅依据概念来计量匹配,对应急决策过程中的高精度知识处理是不充分的.事实上,在范畴知识结构,它们的态射、定型或者更为复杂的可交换图,都可以被考虑在内.知识处理对概念距离判断的依赖,通常体现在层次化的概念模型或描述概念所属关系的领域本体.在范畴化知识结构基础上,本文提出一种度量知识片断中两个对象之间、态射之间、定型之间距离的测定方法,并将其用于测量两个定型范畴之间的相似度计量.定型范畴的各类元素的提升,有利于提高应急决策知识获取的可靠性和高精度知识处理.

概念之间的关系除了具有特定的所属关系外,还存在着大量其他类型的关系.例如“人”同“水”在

其概念所属关系上并没有明显所属关系,但在语义层面,它们却有很强的关联关系.正如层次化的概念组织,概念间的关系也可被组织在一个层次的结构中.

命题 1 给定两个对象 o_1 和 o_2 ,如果它们在领域概念模型中存在着继承关系,并且距离小于一定的阈值 δ ,则 o_1 和 o_2 相似,用 $o_1 \sim o_2$ 表示;如果 o_1 和 o_2 之间存在继承关系以外的关系,并且在领域概念模型中的步长小于一定阈值 δ ,则 o_1 和 o_2 是紧密关联的,表示为 $a \cong b$.

命题 2 给定两个对象 o_1 和 o_2 ,若 $o_1 \sim o_2$,则它们之间的相似度 $S_o(o_1, o_2)$ 可以定义为

$$S_o(o_1, o_2) = \begin{cases} 1, & o_1 = o_2; \\ \frac{L(o_1) + L(o_2) - 2L(o)}{L(o_1) + L(o_2) - 2L(o)}, & o < L(o_1) + L(o_2) - 2L(o); \\ 0, & L(o_1) + L(o_2) - 2L(o) > \delta. \end{cases} \quad (7)$$

其中 $L(o_i)$ 为 o_i 在领域概念模型所处的层数,对象 o 是对象 o_1 和对象 o_2 的公共上层父概念,是这两个概念间最大可能距离的阈值.相似地,可以给出两个态射之间的相似度 $S_m(m_1, m_2)$.

命题 3 给定两个定型 t_1 和 t_2 ,它们之间的相似度可以定义为

$$S_t(t_1, t_2) = \mu(S_o(d(t_1), d(t_2)) + (1 - \mu)S_o(c(t_1), c(t_2))) + (1 - \mu)S_m(m(t_1), m(t_2)). \quad (8)$$

其中: $(0 \leq \mu \leq 1)$ 是定型中域的重要程度系数; $\mu(0 \leq \mu \leq 1)$ 是对象相对于态射的重要程度系数; $d(t), c(t)$ 和 $m(t)$ 分别是定型 t 的 $\text{dom}(t), \text{cod}(t)$ 和 $\text{morp}(t)$ 的缩写.

命题 4 给定两个定型范畴 K_1 和 K_2 ,其中 K_2 是 K_1 的子范畴,它们之间的距离 $d(K_1, K_2)$ 可被定义为类型集合间的欧氏距离,表示为

$$d(K_1, K_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^w (t_1(i) - t_2(i))^2}. \quad (9)$$

其中: w 是 K_2 中的定型数量, $t_1(i)$ 和 $t_2(i)$ 分别表示 K_1 和 K_2 中具有相似关系的第 i 个定型.从而可以得出两个定型范畴之间的语义距离

$$d(K_1, K_2) = d(K_1, K_{12}) + d(K_2, K_{12}), \quad (10)$$

其中 K_{12} 是 K_1 和 K_2 的 GCS.由此可以求得两个定型范畴之间的相似度为

$$S(K_1, K_2) = \begin{cases} 1, & d(K_1, K_2) = 0; \\ 1 - \frac{d(K_1, K_2)}{\delta}, & d(K_1, K_2) < \delta; \\ 0, & d(K_1, K_2) > \delta. \end{cases} \quad (11)$$

其中 $\delta = \max(d(t_1(i), t_2(i))) > 0$,是指定的两个定型范畴之间的最大距离阈值.

上面计算的是两个定型范畴之间的相似度问题.在实际问题中,一个应急问题的情境通常被从不同的角度描述为若干知识片断,称之为需求知识片断;同时,针对它需要搜索知识库中的知识片断,以进行知识的匹配操作,称之为供给知识片断.

假定根据某一特定应急事件中决策者的知识需求,描述 m 个需求知识片断,并且通过粗略的知识片断检索,萃取出 n 个供给知识片断,这两个知识片断集的匹配情况可通过它们之间的平均最大相似度 S^M 来计算,即

$$S^M = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S(K_{(i)}, K_{(j)})}{m \cdot n}. \quad (12)$$

3.4 时间复杂性

下面考察该匹配方法运算的时间复杂性.设调用一次概念间相似度运算的单位时间为 t ,则计算一次定型的相似度的时间约为 $3t$,完成一次知识片断间的匹配操作所用的时间消耗 TC 可表示为

$$TC = \frac{w_1}{2} \frac{w_2}{2} t + \frac{w_1}{2} \frac{w_2}{2} t + w_1 w_2 t = \frac{3}{2} w_1 w_2 t = \frac{3}{2} w^2 t, \quad w_1 = w_2, \quad (13)$$

其中 w_i 表示匹配的知识片断中定型的数量.其计算内容分别包括对域对象、共域对象和态射关系的相似度计算所消耗的时间.

面向决策者的需求,可将单一问题描述成 n 个需求知识片断进行合并,整合成为单一的知识片断.因此,当判断一个提取出来的 n 个决策背景知识片断与其进行匹配时,其时间消耗为

$$TC = \frac{3}{2} n w^2 t. \quad (14)$$

因此可以粗略地估计针对一个应急问题决策需求的时间复杂性为

$$O\left(\frac{3}{2} n w^2\right) = O(w^3), \quad (15)$$

其中 w 为知识片断中的定型数量.

4 实验结果

以国家级突发公共卫生事件为例,检验基于最大公约子范畴的匹配度,以及 μ 和 δ 对匹配结果的影响.实验样本取自国家关于突发卫生公共事件的法律、法规和预案 11 篇,见表 1.

文本性的知识片断划分是按照政策文件中的条款或自然段落进行划分.按照段落和条款,将这 11 篇文档划分为 1440 个知识片断和包含在内的 1394

表1 突发公共卫生事件政策文档

文件名称	发布日期	发布者	文号
重大动物疫情应急条例	2005-11-16	国务院	第450号
传染病防治法	2004-12-01	国家主席	第17号
传染病防治法实施办法	1991-12-06	卫生部	第17号
突发公共卫生事件应急条例	2003-05-07	国务院	第376号
食品卫生法	1995-10-30	国家主席	第59号
进出境动植物检疫法实施条例	1997-01-01	国务院	第206号
动物防疫法	1997-07-03	国家主席	第87号
国境卫生检疫法	1986-12-02	国家主席	第46号
出境动植物检疫法	1991-10-30	国家主席	第53号
植物检疫条例	1992-05-13	国务院	
国境卫生检疫法实施细则	1989-03-06	卫生部	第2号

个领域概念(不包括同义词标注),其中知识片断按照条款中的自然段进行自动化分,而概念的划分是在海量切词工具的辅助下,经过人工校正完成.根据应急卫生的特点,建立了领域概念和语义关系的层次结构.由于 λ 和 μ 三个参数同时变化的情况比较复杂,本文中根据经验,采用固定的 λ 来考察其他两个参数的变化情况及对匹配率的影响.通常较小的阈值会带来较高的精度和相对低的匹配召回率.本文成对选取相近的知识片断,计量它们之间的距离,取样结果基本满足 $\lambda \leq 6$,取 $\mu = 6$.

实验过程中,首先选取一个应急问题描述的知识片断,再经过人为的筛查,挑选出适宜该问题的,并在这11篇文档中的背景知识片断.通过对 λ 和 μ 样本取值实验,求取较优的参数组合,以考察该方法的精度和召回率.

图3和图4分别是对样本取值实验的结果.图3表示的是 λ 和 μ 取值对知识匹配精度的影响,图4表示的是 λ 和 μ 取值对知识匹配的召回率的影响.匹配精度在 $\lambda = 0.6$ 和 $\mu = 0.7$ 时取得最大值,召回率分别在 $\lambda = 0.3$ 和 $\mu = 0.6$, $\lambda = 0.5$ 和 $\mu = 0.9$,以及 $\lambda = 0.6$ 和 $\mu = 0.4$ 时,取得极大值.

从实验结果可以看出,在取不同参数值的情况下,知识匹配的精度和召回率都受到影响,其中匹配精度受到的影响最为明显.这表明,在传统的基于关

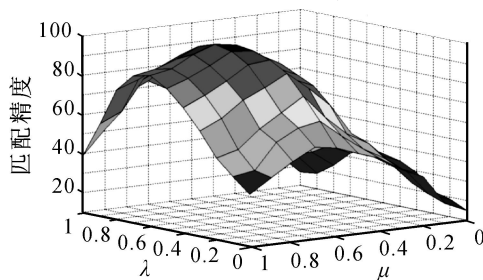


图3 匹配的精度

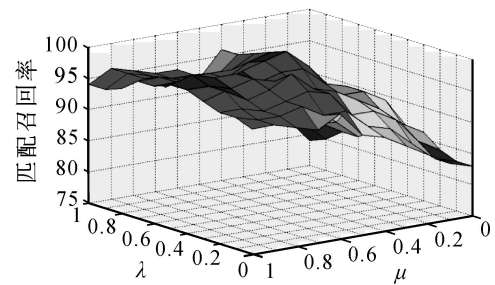


图4 匹配的召回率

键词的匹配过程中,隐含地存在着面向语义的不同术语间重要程度的差异,因而可通过参数的设置,实现匹配的一种最优组合.

这种基于最大公约子范畴的知识匹配方法能够有效地将这两项指标共同提升.本次测试采用封闭式测试的方式,由于应急文档的行文特点,这种封闭式测试具有一定的代表性,不会由于语料类型的不同,过多地影响知识匹配的结果.

通过合理的参数配置($\lambda = 0.6, \mu = 0.7, \lambda = 6$),这种方法的知识匹配的精度接近于99%,召回率接近于97%;而传统基于语义信息匹配中,一般的匹配精度在80%~94%之间,而召回率在75%~90%之间.

5 结论

综上所述,应急决策知识匹配是向决策者提供背景决策知识的一个关键环节,它可以有效提高应急决策支持的水平 and 自动化处理能力.只有实现高可靠性的应急决策知识匹配,才能够根据应急反应的不同情境,进行决策背景知识的有效重组.本文基于范畴论和定型范畴论,提出了一种在范畴化知识结构上进行高精度知识匹配的方法,利用求取两个定型范畴之间的最大公约子范畴来计量两个描述决策者需求和背景领域知识的匹配程度.最大公约子范畴的计量不仅仅依赖于语义概念及其之间的关系,而且依赖于由它们构成的更为复杂的范畴化知识结构.实验结果显示了该方法能够同时提升知识匹配过程中的精度和召回率.

参考文献(References)

[1] Rong L L. A method of managing the knowledge in government documents for quick response[J]. Int J of Knowledge and Systems Sciences, 2005, 2(1): 67-73.
 [2] 谢红薇,李瑞霞,余雪丽,等.基于概念图匹配的语义相似性算法研究[J].微计算机信息,2007,23(21): 222-224.
 (Xie H W, Li R X, Yu X L, et al. Study on semantic similarity by matching concept graphs [J]. Microcomputer Information, 2007, 23(21): 222-224.)
 [3] 杨哲.基于启发式规则的本体概念语义相似度匹配[J].

- 计算机应用, 2007, 27(12): 2919-2921.
(Yang Z. Semantic similarity match of ontology concept based on heuristic rules [J]. J of Computer Applications, 2007, 27(12): 2919-2921.)
- [4] Lu R Q. Towards a mathematical theory of knowledge [J]. J of Computer Science and Technology, 2005, 20(6): 751-757.
- [5] Wang Q Q, Rong L L. Typed category theory —Based micro-view emergency knowledge representation [J]. Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2007, 4798(1): 568-574.
- [6] Walters R F C. Categories and computer science [M]. London: Cambridge University Press, 1991.
- [7] 贺伟. 范畴论 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
(He W. Category theory [M]. Beijing: Science Press, 2006.)
- [8] Ter-Hofstede A H M, Lippe E, Van-der-Weide Th P. Applications of a categorical framework for conceptual data modeling [J]. Acta Informatica, 1997, 34(12): 927-963.
- [9] 陆汝钤. 计算机语言的形式语义 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
(Lu R Q. Formal semantics of computer language [M]. Beijing: Science Press, 1992.)
- [10] Menzel C. Basic semantic integration [C]. Semantic Interoperability and Integration. Dagstuhl: Internationales Beginnings, 2005: 1-13.
- [11] Niu N, Easterbrook S, Sabetzadeh M. A category-theoretic approach to syntactic software merging [C]. 21st IEEE Int Conf on Software Maintenance. Budapest: IEEE, 2005: 197-206.
- [12] Wang Q Q, Rong L L. A structural knowledge representation approach in emergency knowledge reorganization [C]. Proc of the 8th Int Symposium on Knowledge and Systems Sciences. Lshikawa: Jaist, 2007: 179-186.
- [13] Menni M, Simpson A K. The largest topological subcategory of countably-based equilogical spaces [J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 1999, 20(1): 1-25.
- [14] 李敏强, 寇纪淞. 基于数据库的层次概念知识体系的一种获取方法 [J]. 控制与决策, 1999, 14(增 1): 541-544.
(Li M Q, Kou J S. Hierarchical concepts learning based on large databases [J]. Control and Decision, 1999, 14(S1): 541-544.)
- [15] Xiong D M. A three-stage computational approach to network matching [J]. Transportation Research Part C, 2000, 8(1-6): 71-89.

(上接第 989 页)

- [3] Manel Mart íez-Ram ón, Jos é Luis Rojo-Álvarez, Gustavo Camps-Valls, et al. Support vector machines for nonlinear kernel ARMA system identification [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2006, 17(6): 1617-1622.
- [4] Jos é Luis Rojo-Álvarez, Manel Mart íez-Ram ón, Mario de Prado-Cumplido, et al. Support vector method for robust ARMA system identification [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2004, 52(1): 155-164.
- [5] Shi Z W, Han M. Support vector echo-state machine for chaotic time-series prediction [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2007, 18(2): 359-372.
- [6] Hyung-joo Lee, Sungzoon Cho. Focusing on non-respondents: Response modeling with novelty detectors [J]. Expert Systems with Applications, 2007, 33(2): 522-530.
- [7] Tran Quang Anh, Li Xing, Duan Haixin. Efficient performance estimate of one-class support vector machine [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(8): 1174-1182.
- [8] David M J Tax, Robert P W Duin. Support vector data description [J]. Machine Learning, 2004, 54: 45-66.
- [9] Manuel Davy, Frédéric Desobry, Arthur Gretton, et al. An online support vector machine for abnormal events detection [J]. Signal Processing, 2006, 86(8): 2009-2025.
- [10] Jaewook Lee, Daewon Lee. Dynamic characterization of cluster structures for robust and inductive support vector clustering [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(11): 1869-1874.
- [11] 张正道. 复杂非线性系统故障检测与故障预报 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006: 62-63.
(Zhang Z D. Fault detection & fault prediction for complex nonlinear system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006: 62-63.)