

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2015.04.017

一种基于描述逻辑和要素投影的事件本体形式化方法

刘 炜*, 丁 宁, 张雨嘉, 谭 悦, 刘宗田

(上海大学计算机工程与科学学院, 上海, 200444)

摘 要: 文本事件的表示一直缺乏针对事件要素的有效表示和推理方法, 采用传统描述逻辑对基于事件的知识进行形式化表示存在表达能力不足的问题. 提出一种新的事件本体结构模型, 在此基础上对描述逻辑的子语言 SROIQ 进行扩展, 同时提出事件要素投影理论实现对事件本体的形式化. 该方法利用 SROIQ 丰富的表达能力, 将动态的事件转换为静态的复杂概念, 既统一了事件与事件状态的表示方法, 也建立起了事件之间、事件要素之间的语义关系. 基于 SROIQ 的事件要素投影方法能够有效表示各领域的事件类、事件实例与事件要素, 提取事件、事件关系在事件要素上的普遍规律, 有助于领域事件本体的构建和形式化, 以及针对事件要素的推理.

关键词: 事件本体, 事件要素投影, 形式化, 扩展描述逻辑

中图分类号: TP391

文献标识码: A

An event ontology formalization method based on description logic and elements projection

Liu Wei*, Ding Ning, Zhang Yujia, Tan Yue, Liu Zongtian

(School of Computer Engineering and Science, Shanghai University, Shanghai, 200444, China)

Abstract: Compared with traditional concept, event as a knowledge unit has numerous advantages in terms of knowledge representation. An event consists of a variety of elements including action, object, time and place, etc. But the complexity of event structure brings about difficulties on formalization and inference on events. Due to the lack of effective methods of representation and reasoning for the event elements in text, and the deficiencies of traditional description logic expression on event knowledge, an event element projection is proposed as a new formalization method. By means of powerful expression of extended description logic sublanguage, SROIQ, and based on a new event ontology model, this method has many advantages. Event element projection unifies representation of events and event status, and builds the semantic relations between events and elements. Based on SROIQ, event element projection is able to effectively represent event class, event instances and event elements in all areas, and to abstract the universal elemental features of events or event relations. It also contributes to the construction of domain event ontology and reasoning on event elements. An example of formalization on water pollution emergencies ontology is provided based on SROIQ and element projection method. The general process and steps of event ontology

基金项目: 国家自然科学基金(61305053, 61273328), 上海市自然科学基金(12ZR1410900)

收稿日期: 2015-05-16

* 通讯联系人, E-mail: liuw@shu.edu.cn

formalization are proposed as well. The semantics of event relations based on element projection and reasoning on event relations are also discussed at last. Event element projection makes element inference compatible with event class inference, simplifies syntax of formalization framework, and enriches the semantic definitions of various event relations. Based on this method and SROIQ, the expression of formalization framework could be enhanced and the reasoning ability could be ensured.

Key words: event ontology, event elements projection, formalization, extended description logic

互联网的文本数据记录了丰富的现实社会中发生的事件信息. 近年来, 从 Web 文本中自动获取事件信息并对事件进行推理已成为知识表示和推理领域的一项具有挑战性的工作^[1-2]. 通过建立关于事件的语义模型, 推导其中的隐含知识, 使计算机能够捕获网络突发事件并进行自动预警等是当前国内外相关研究团队所关注的研究热点. Van Hage *et al*^[3-4]将不同领域的事件进行抽象, 构建了一种能够适应不同领域的 SEM 事件模型. 该模型以简洁的语义结构实现较强的适用性. Corda *et al*^[5]提出了一种基于历史事件的事件本体模型, 考虑了事件的基本属性以及历史事件之间因果关联. 刘宗田等^[6]提出了事件六要素模型和事件本体的概念, 将本体理论引入到了中文事件信息处理中, 实现了基于事件的相关应用^[7].

对事件、事件要素以及事件类进行形式化表示, 从而为事件本体提供逻辑基础, 是研究事件本体的一项基础工作. 描述逻辑 (Description Logic) 是一族基于对象的知识表示的形式化语言, 已成为语义 Web 本体 OWL 的逻辑基础. 作为一种知识表示的有效机制, 描述逻辑具有清晰的模型—理论机制, 很适合于通过概念分类学来表示应用领域的静态知识, 是对特定模型进行形式化的有效方法^[8-11]. 基于 SHOIN (D) 等描述逻辑子语言对特定本体的形式化研究在理论和应用上已经取得了很多成果^[12-14]. 已有的针对事件概念或事件知识的形式化方法主要是将事件作为动作进行表示, 侧重描述事件的过程性, 如事件演算^[15]、情景演算^[16]等; Kaneiwa *et al*^[17-18]在提出一种序类逻辑 (order-sorted logic) 的基础上对不同类型的事

件和事件之间的因果关系进行表示; Scherp *et al*^[19]提出了一种 F-A 模型将事件中的对象、相关性、因果关系等构造为特定的模式; Liu *et al*^[20-21]对描述逻辑进行扩展, 将事件作为一种包含动作的特殊对象进行表示, 在一定程度上描述了事件的动态特性. 上述方法共同特点是未充分考虑对事件要素的表示, 不同程度忽略了事件要素与事件之间的语义关系, 因此造成事件各要素是孤立的、无联系和静态的, 也容易造成事件与事件要素的表示方式不统一、事件状态的表示与事件及事件要素的表示不统一等情况, 最终使事件知识推理变得困难.

基于上述问题, 本文通过对描述逻辑子语言 SROIQ^[9]进行扩展, 并提出事件要素投影方法 (Event Element Projection) 对事件本体的表示进行形式化. SROIQ 作为 SHOIN 等描述逻辑子语言的后续扩展, 引入一般化角色层次 (generalized role inclusion), 支持角色的自反性、非自反性、反对称性、否定角色断言、复杂角色包含等特性. 相比之前的可判定的描述逻辑语言, SROIQ 具有更强的表达能力, 因此能够更有效地表示事件模型结构中的复杂概念和动态联系, 并有助于实现事件、事件关系等的相关推理. 而通过事件要素的投影可将事件要素的表示方法引入到形式化框架中, 建立事件 (类) 内部和外部的在要素上的动态联系. 其利用 SROIQ 的逻辑构造算子建立包含各个事件要素的复杂概念, 将多种要素投影到关键要素上, 提取和建立事件 (类) 之间在要素概念上的规则公理, 从而实现对事件模型结构的形式化和相关推理. 例如, 存在以下两个事件: “在 2008 年汶川大地震中, 彭州初中生雷楚年勇救 7 名同

学”和“汶川抗震救人小英雄雷楚年涉嫌诈骗”。两个事件中的对象要素都是“雷楚年”，如果孤立地看待对象要素，很难对后续事件和相关对象做出推理。如果结合事件其他要素来进行推理，就能够较准确地对事件对象进行语义理解和推理。基于扩展 SROIQ 的事件要素投影方法的意义在于它能够有效地描述事件要素之间的动态联系，统一事件、条件状态、要素的表示方法，有助于帮助我们把握事件关系在要素层面的隐含特征并实现相关推理。

1 事件本体相关概念

传统本体的核心是概念及其之间的关系，目前有关知识表示的研究大多集中在概念的形式化和推理上面^[22]。事件类常常只是被作为一类特殊概念或概念与概念之间的关系。这种本体模型适合于表达事物类知识，但不容易表达随着时间变化而变化的行为类知识。事件本体^[6]是在传统本体的基础上突出和增加了对事件类及其关系的描述，事件类的要素中不仅包含了对象、时间、地点的相关知识，而且包含了动作、过程状态断言等关于动态特性的知识及语言表现，因此能够将客观的事件与表示它的可变化的语言表现区别开来，减少了问题的复杂性。

本节将介绍事件本体相关的概念。

1.1 事件模型结构 文本事件一般会由特定结构的要素构成。例如“2014 年 12 月 31 日晚 23 时，上海外滩发生踩踏，多人伤亡”，里面包含了时间、地点、对象及其状态等诸多要素，并且“踩踏”作为事件的核心词标识出了事件的类别信息。所以，针对某个特定的时间和地点发生的，由若干角色参与，表现出若干动作特征，并伴随着对象内部状态变化的一件事情可以表示为一个事件。

定义 1 事件 (Event) 对事件的定义可以通过一个形式化的六元组表示：

$$event := \langle A, O, T, P, S, L \rangle$$

其中： A 为动作或动作序列集合，对应于文本事件的触发词； O 为一个事件中的对象集合，分为

主体和客体； T 为一个事件的时间要素，分为绝对时间和相对时间； P 为事件发生的地点； S 为事件发生过程中对象的状态集合（包括前置条件、后置结果）； L 为事件的语言表现，主要包括事件核心词表现、事件核心词搭配。语言表现是事件的语言表现规律，能够表示句子中非核心词与核心词之间的位置关系或固有的搭配模式。

定义 2 事件类 (Event Class) 指具有共同特征的事件的集合，用 EC 表示定义如下：

$$EC = (E, C_A, C_O, C_T, C_P, C_S, C_L)$$

$$C_i = \{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{im}, \dots\}$$

$$i \in \{A, O, T, P, S, L\}, m \geq 0$$

其中， E 是事件的集合； C_i 称为事件类的内涵，其元素 c_{im} 是事件类中每个事件在第 i 个要素上具有的一个共同特性。 c_{im} 也可以称为事件的要素类。

事件(类)之间的关系包括两个类别：分类关系(包含关系或父子关系)和非分类关系(组成关系、跟随关系、因果关系和并发关系)，描述的是事件或事件类之间多种内在的语义关系。

包含关系(subsumption 或 is_a)是事件类之间的种属关系，形式化为 $EC_1 \sqsubseteq EC_2$ 。

因果关系(causal)：事件类 EC_1 的实例事件发生以一定的概率导致了事件类 EC_2 的实例事件发生，发生的概率大于给定的阈值，则称两事件类之间存在因果关系，形式化为 $EC_1 \rightarrow EC_2$ 。

跟随关系(follow)：在一定长度的时间段内，事件类 EC_1 的实例事件发生后，存在事件类 EC_2 的实例事件接着发生，则称两事件类之间存在跟随关系，形式化表示为 $EC_1 \triangleright EC_2$ 。

并发关系(concurrence)：在一定长度的时间段内，存在事件类 EC_1 的实例事件和 EC_2 的实例事件同时或先后发生，即两个事件实例发生的事件存在重合，则称两事件类之间具有并发关系，形式化为 $EC_1 \parallel EC_2$ 。

组成关系(isComposedOf)：当事件类 EC_1 中的一个事件实例由事件类 EC_2 中的某个事件实例组成时，称事件类 EC_1 由事件类 EC_2 组成，或称事件类 EC_2 是事件类 EC_1 的组成事件

类,形式化为 $EC_1 \angle EC_2$.

非分类关系既可以描述事件类之间的关系,也能够描述各个事件实例之间的关系.

图1的事件模型对事件、事件类及事件(类)关系的结构进行表示,并严格区分事件类和事件个体.该模型借鉴了大多数术语词典中

的类的表示方法,同时也适用于传统本体中概念和个体.此外,在事件模型中,除了语言表现以外的事件要素类都是可以独立存在的,并且可以与现有的一些本体库(概念术语库)进行对接.通过建立这些要素类和现有本体术语的等价关系,能够极大地提高事件要素的可重用性.

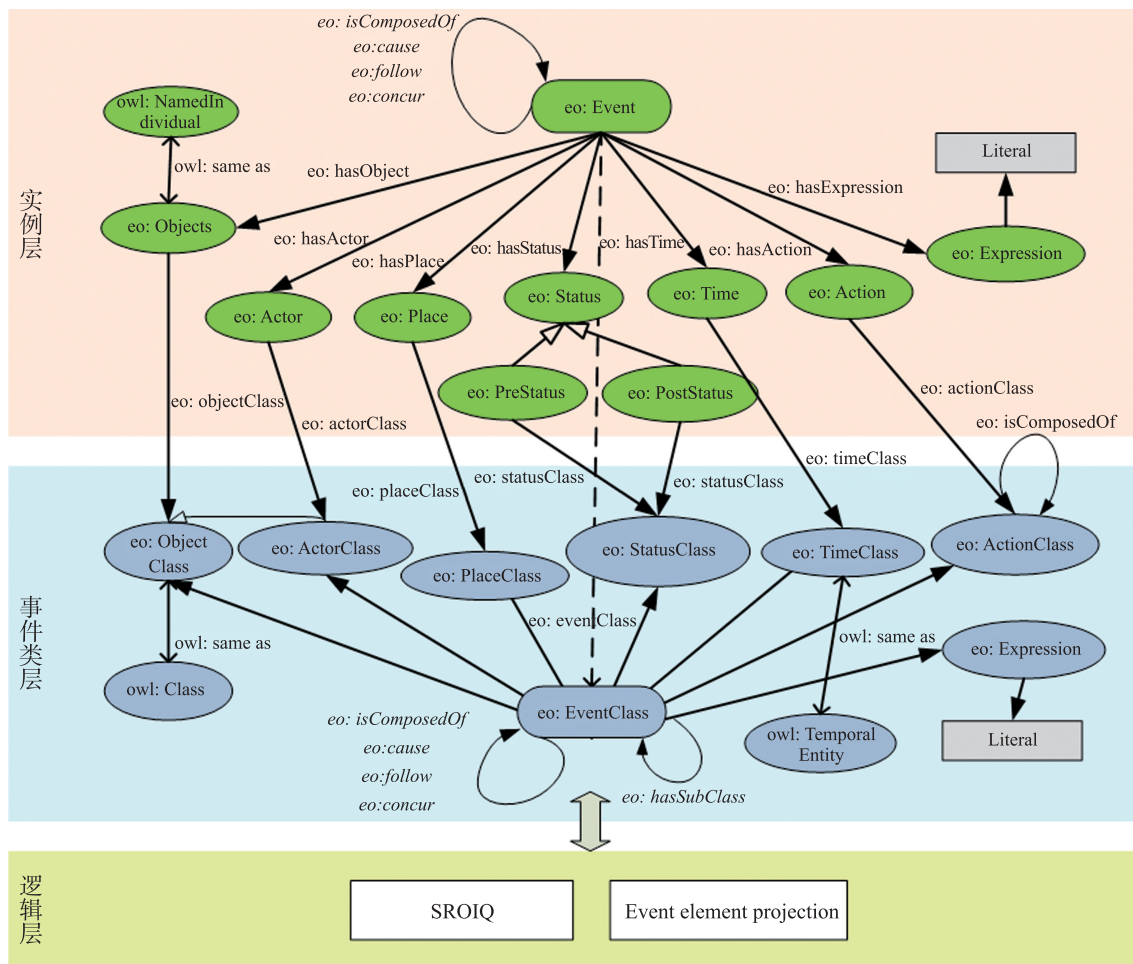


图1 事件模型结构图

Fig. 1 Structure of event model

需要注意的是,在事件模型结构中,虽然定义了六个要素,但是在文本处理中,只需要一个事件触发词(一般是事件包含的动作)就可以识别或构建一个事件类或事件实例,其他的要素可以省略.因此,从文本中可以方便地构建抽象事件类,从而保证了事件类的精简程度和可重用性.这种简单通用的事件模型,意在针对不同领域的事件及事件类进行描述,并且没有把事件

或事件要素约束在具体领域的术语中.这体现了事件模型的设计初衷,即使用最小的语义约束保证事件或事件类之间最大的互操作性.

1.2 事件本体模型结构

定义3 事件本体 事件本体是对某个客观存在的事件类系统的可共享的、精简的形式化说明,其逻辑结构可定义为一个四元组: $EO = \langle UECs, ECs, R, Rules \rangle$, 其中:

(1) $UECs$ 是事件本体中的顶层事件分类 ($Up\ Event\ Class$) 集合, 每个 UEC 表示一个分类, 所有的 UEC 构成一个事件的树形分类结构;

(2) $ECs = \{EC_1, EC_2, \dots, EC_n\}$, 表示事件类集合;

(3) $R = \{r \mid r \text{ 是 } \langle EC_i, EC_j \rangle \text{ 上的关系}, r \in R_{is_a}, R_{composeOf}, R_{cause}, R_{follow}, R_{concurrency}\}$.

(4) $Rules$ 是由逻辑语言表示的规则集合, 包括针对上层事件分类的推理规则和事件关系的推理规则. 这些规则最初是建立在领域本体上的, 在领域事件本体的不断学习过程中, 规则也可得到不断充实.

2 基于 SROIQ 的事件要素投影方法

在现有的针对事件的形式化研究成果^[18-21]中, 通过扩展描述逻辑来对事件要素进行表示的研究非常少. 原因有两方面: 传统的描述逻辑语言存在语法上的局限性, 其表达能力不够丰富, 不能很好适应对复杂要素特征和联系的描述; 另一方面, 缺乏一种让事件、事件状态和事件要素在表示方法上实现统一并互通的理论基础.

SROIQ 相比之前的描述逻辑子语言做了大量扩展, 引入一般化角色层次 (generalized role inclusion), 支持角色的自反性、非自反性、反对称性、否定角色断言、复杂角色包含等特性, 其表达能力更强, 因此能够更有效地表示事件模型结构中的复杂概念和动态联系, 实现事件、事件关系、事件要素等的相关推理. 因此 SROIQ 能够解决第一个问题.

而要解决第二个问题, 本文将引出事件要素投影方法. 该方法将多种要素投影到某一个要素上, 利用 SROIQ 的逻辑构造算子, 建立包含各个事件要素的复杂概念, 提取和建立事件 (类) 之间在要素概念上的规则公理, 从而实现对包含各个要素的事件模型结构的形式化和相关推理, 为事件与事件要素之间表示与推理方法实现互通. 譬如对不同事件的某类要素存在的包含、等价或不相交关系, 要素投影能够将事

件之间的关联反映到要素之间的关联上, 其优势在于对事件的表示和推理能够具体到各个要素上. 同时, 由于事件状态也是由针对不同事件要素的断言组成, 因此对事件状态的内部结构的描述和事件本身的要素结构很相似. 这使得事件要素投影方法同样适用于事件状态的形式化, 从而为解决第二个问题提供了理论基础.

更重要的是, 事件要素投影弥补了之前研究工作仅仅在事件实例和事件类层面的形式化的局限性, 从而使对事件模型的形式化表示分成了事件与要素两个层面, 形成一套更加完整的、细化的面向事件的形式化表示方法. 下面首先介绍 SROIQ 用于表示事件相关概念的语法和语义.

2.1 事件类、事件关系、事件要素语法与语义

定义 4 针对事件 (类) 及事件要素的描述逻辑 SROIQ 解释 $I = (\Delta^I, \cdot^I)$, 其中非空概念集合 Δ^I 和函数 \cdot^I 构成的二元组. 其中, Δ^I 为 I 的论域, 所描述的是一般概念; 在事件层面, 指的是各种事件类; 在要素层面, 一般为对象、时间、地点要素. $R^I \subseteq \Delta^I \times \Delta^I$ 描述的是概念之间的属性关系: 在事件层面描述的是事件类之间的分类关系和非分类关系; 在要素层面, 可用于表示事件动作 (如施动者与受动者之间的关系). 因此, 这里的事件及要素的语法是相通的. 表 1 是事件类与事件要素 SROIQ 语法与语义, 其基本沿用了标准的 SROIQ 语法和语义表示, 从而没有增加概念推理的复杂度. 根据对事件非分类关系的定义, 扩展四类描述事件非分类关系符号, 相关的语法和语义描述见表 2.

2.2 事件术语集和断言集

定义 5 事件术语集 (Event-TBox) 用于描述与事件相关的概念术语, 包括了在事件中定义的概念 (类)、角色 (属性关系) 等. 具体地说, Event-TBox 包含了两个层面的术语集合, 一方面是对事件 (类) 的概念和关系角色的定义以及相关公理的描述; 另一方面, 是通过要素投影建立事件 (类) 在要素层面的定义和关联, 包括各个事件要素的概念和事件核心触发词的角色功能描述, 以及相关公理.

定义 6 事件断言集 (Event-ABox) 用于将事件概念和角色关系实例化。同样,事件的断言陈述也可以分为两个层面:一方面,包含了大量的事件实例和角色关系实例;另一方面,包含

了针对各个事件要素概念的个体实例描述。

定义 7 事件角色集 (Event-RBox) 用于描述事件中角色及角色的逆、一般化角色包含公理等内容。

表 1 事件类、事件要素 SROIQ 语法与语义

Table 1 SROIQ syntax and semantics of event class or element

构造算子	语法	语义
事件类、要素概念	C	$C^I \subseteq \Delta^I$
非空概念集	\top	Δ^I
空概念集	\perp	\emptyset
非(negation)	$\neg C$	$\Delta^I \setminus C^I$
析取(disjunction)	$C \sqcup D$	$C^I \cup D^I$
合取(conjunction)	$C \sqcap D$	$C^I \cap D^I$
概念包含	$C \sqsubseteq D$	$C^I \subseteq D^I$
(事件关系、要素属性)角色	R	$R^I \subseteq \Delta^I \times \Delta^I$
存在限定(exist restrict)	$\exists R. C$	$\{x \mid \exists y \langle x, y \rangle \in R^I \wedge y \in C^I\}$
值限定(value restrict)	$\forall R. C$	$\{x \mid \forall y \langle x, y \rangle \in R^I \Rightarrow y \in C^I\}$
角色的逆	R^-	$\{\langle x, y \rangle \mid \langle y, x \rangle \in R^I\}$
角色包含	$R_x \sqsubseteq R_y$	$R_x^I \subseteq R_y^I$
一般化角色包含公理	$R_1 \circ \dots \circ R_n \sqsubseteq R_m$	$\{\langle x_1, x_n \rangle \mid \langle x_1, x_n \rangle \in \Delta^I \times \Delta^I, x_1, \dots, x_n \in \Delta^I, \langle x_i, x_{i+1} \rangle \in V_i^I\}$

表 2 基于扩展 SROIQ 的事件关系的语法与语义

Table 2 SROIQ syntax and semantics of event relations

事件关系	语法	语义
因果关系	$EC_1 \rightarrow EC_2$	$\{\langle e_1, e_2 \rangle \mid \arg \max(P(e_2 \mid e_1))\}$
并发关系	$EC_1 \parallel EC_2$	$\{\langle e_1, e_2 \rangle \mid e_1^{[t_{11}, t_{12}]} , e_2^{[t_{21}, t_{22}]} , [t_{11}, t_{12}] \cap [t_{21}, t_{22}] \neq \emptyset\}$
跟随关系	$EC_1 \triangleright EC_2$	$\{\langle e_1, e_2 \rangle \mid e_1^{[t_{11}, t_{12}]} , e_2^{[t_{21}, t_{22}]} , t_{12} \leq t_{21}\}$
组成关系	$EC_1 \angle EC_2$	$\{\langle e_1, e_2 \rangle \mid e_1^{[t_{11}, t_{12}]} , e_2^{[t_{21}, t_{22}]} , [t_{11}, t_{12}] \subseteq [t_{21}, t_{22}] , C_{O1} \subseteq C_{O2}\}$

2.3 事件要素投影

定义 8 事件要素投影 (Event Element Projection, EEP) 将事件要素抽象为类或角色,利用逻辑构造算子构造出某一要素 α 类型的复杂类,该复杂类中包含了事件中其他要素所对应的类或角色,这个复杂类被称作事件在要素 α 上的投影。

在一个事件内部,能够表征事件类型的关键要素是动作要素(或某些特定事件中的核心触发

词);同时,无论是受动者或被动者的对象要素,或者是时间要素和地点要素,都是通过动作要素或核心触发词作为中间桥梁进行联系的,即动作要素可以描述其他任意两个要素间的角色关系,而对象、时间、地点等要素一般作为类或者概念。图 2 描述了事件各个要素投影到对象 1 要素上,构造一个复杂对象要素的情景。

例如有文本事件“昨日上午,一辆面包车在广中路口闯红灯”,将其投影到对象要素

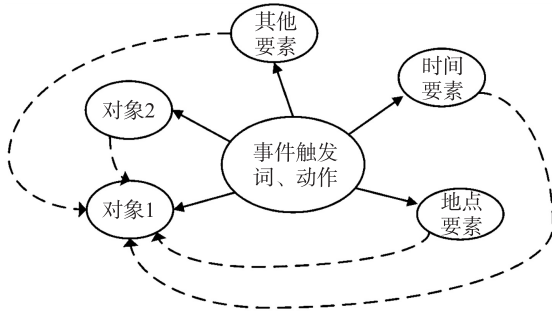


图 2 事件结构内部的要素投影

Fig. 2 Event element projection in event model

“面包车”上,则事件的要素投影可以描述为“一辆昨日上午在广中路口闯红灯的面包车”。这里投影后描述的是“面包车”,但是其包含了事件的全部要素信息。

而在对事件进行形式化与推理过程中,要素投影也有着十分重要的意义.如果按照这种投影方法来定义描述逻辑中的概念和角色,动作要素需要创建多维度的角色来完成不同要素之间关联.具体地说,可以将动作要素扩展为三个维度,建立三种角色关系:在面向对象要素的维度,动作要素表示为角色 Vr ,关联施动者 Os 和受动者 Oo ;在面向时间要素的维度,动作要素表示为角色 $Vwhen$,关联对象要素 Os 和时间要素 T ;在面向地点要素的维度,动作要素表示为 Vat ,关联对象要素 Os 和地点要素 P .同时,结合 2.1 中的事件要素描述逻辑构造算子,可以构造出事件要素投影下的特定要素的复杂概念.本文将事件 E 在特定要素 m 上的投影使用 $E|_m$ 表示.

从表 3 可以看出,要素越多的事件对应的要素投影概念就越复杂.在表示事件时,如何选择将事件投影到哪一个要素上,依赖于事件本身的特征以及它与其他事件之间的关系.例如,在表示两个并发关系的事件时,往往投影到时间要素 T 上,构造两个涵盖事件所有要素的时间复杂概念,然后通过概念之间包含关系来表现两个事件在时间上的一致性.因此,事件要素投影方法可以按照实际需要将事件(类)投影到不同的要素,提高知识表示的灵活性,方便不同的事件要素推理.

表 3 事件要素投影一般公理

Table 3 Event element projection axioms

事件(类)	投影要素	要素投影公理
E_1	对象要素 (施动者 Os)	$E_1 _o := Os \sqcap \exists Vr. Oo$
E_2	对象要素 (施动者 Os)	$E_2 _o := Os \sqcap \exists Vwhen. T \sqcap \exists Vat. P \sqcap \exists Vr. Oo$
E_3	时间要素 T	$E_3 _T := T_1 \sqcap \exists Vwhen. Os$
E_4	地点要素 P	$E_4 _P := P_1 \sqcap \exists Vat. Os$

对于从文本中提取的事件,可以利用事件要素投影的方法进行形式化表示,并在要素粒度下对事件类的包含关系、事件实例与事件类的实例化关系进行证明.

事件 e_1 : 一辆轿车撞上迎面而来的卡车.

其中,事件实例 e_1 存在轿车个体 a 与卡车个体 b .这里通过要素投影方法定义了 e_1 的事件类 E_1 ,并证明它与交通事故类 $TranfficCollision$ 之间的包含关系.

$$E_1|_o := Car \sqcap \exists Collide. Truck$$

$$E_1(e_1); Car(a), Truck(b), Collide(a, b)$$

$$TranfficCollision|_o := Vehicle \sqcap \exists Collide. Vehicle$$

$$Car \sqsubseteq Vehicle$$

$$Truck \sqsubseteq Vehicle$$

$$E_1|_o \sqsubseteq TranfficCollision|_o$$

$$E_1 \sqsubseteq TranfficCollision$$

$$TranfficCollision(e_1), Vehicle(a), Vehicle(b)$$

在以上过程中,事件类 E_1 与交通事故类 $TranfficCollision$ 的施动者和受动者对象要素分别存在包含关系;并且动作要素的角色关系是相同的.所以,事件类 E_1 包含于交通事故类 $TranfficCollision$,并且实例中的个体 a 与 b 可以映射为交通事故类 $TranfficCollision$ 的各个对象要素上.

2.4 条件状态的要素投影 事件投影方法不仅能够对事件进行形式化,而且能够用来表示事件的状态.采用事件要素投影的好处是能与事件相关的状态信息(事件前置或后置状态)的表示方式与事件的表示方法统一起来.过去

基于描述逻辑的事件形式化研究中,并没有明确提出事件状态的表示方法,逻辑程序的公理中也没有体现事件状态的语义信息,并且状态表示与事件表示是孤立开的、非统一的,不便于之后的推理.将事件的状态融入到事件表示体系中的难点在于,事件反映了一个个静止状态的变化过程,在这个动态的过程中又包含了事件要素状态的变化.

由于自然语言文本中的事件状态存在着与事件模型类似的要素结构,事件要素投影方法同样也可以应用于表示事件的状态.也就是说,能够采用相似的方法将事件状态中的各个要素投影到某一个特定要素上,将其转化为一个复杂概念,从而完成对事件状态的形式化.例如,一个事件(类) E 有前置状态和后置状态(S_{pre} , S_{post}),那么如果对其状态投影到对象要素:

$$\begin{aligned} S_{pre}|_O &:= Os_1 \sqcap \exists V_r. Oo_1, S_{pre}|_T := \\ &T_1 \sqcap \exists V_{when}^-. Os_1 \\ S_{post}|_O &:= Os_2 \sqcap \exists V_r. Oo_2, S_{post}|_T := \\ &T_2 \sqcap \exists V_{when}^-. Os_2 \end{aligned}$$

其中, V_r 是描述事物状态的动词或核心词,在自然语言中往往出现在名词的复杂定语中,如“装有化学品的卡车”中的“装有”,“携带消防工具的官兵”中的“携带”.如果事件和前置状态都统一转换成要素投影的形式,投影到同类概念上,那么可以通过概念合取表示事件和它的条件(状态),如 $S_{pre}|_O \sqcap E|_O$.这样,事件要素投影就使得事件和状态能够以统一的表示方法进行描述.

以下提供一个事件示例予以说明.

事件 e_2 : 武警官兵成功解救了被绑匪劫持的儿童.

该事件需要进行分解,提取出事件主体和前后状态.

前置状态: 儿童被绑匪劫持

事件主体: 武警官兵成功解救了儿童

后置状态: 儿童获救

其中,事件实例 e_2 存在武警官兵个体 a 、绑匪个体 b 与儿童个体 c .这里通过要素投影方法

定义了 e_2 的事件类 E_2 ,与其前置状态 S_{2pre} 和后置状态 S_{2post} .

$$\begin{aligned} E_2|_O &:= Child \sqcap \exists Rescue^-. PoliceOfficer \\ S_{2pre}|_O &:= Child \sqcap Hijack^-. Kidnapper \\ S_{2post}|_O &:= Child \sqcap Saved \\ S_{2pre}|_O \sqcap E_2|_O &\sqsubseteq S_{2post}|_O \\ E_2(e_2); &PoliceOfficer(a), Kidnapper(b), \\ &Child(c), Rescue(a, c), Hijack(b, c), Saved(c) \end{aligned}$$

上述规则和断言描述了事件与前后状态,及其在要素上的联系. $E_2|_O$ 是“解救”事件在对象要素“儿童”上的投影,状态 $S_{2pre}|_O$ 和 $S_{2post}|_O$ 是前置状态和后置状态在各自对象要素上的投影.角色 $Rescue$ (“解救”)和 $Hijack$ (“绑架”)对应于事件和状态中的动作要素.

事件和状态中的要素往往存在等价或者包含关系,所以能够利用要素概念的合取将事件与前后条件状态在要素粒度下进行融合.

总之,事件要素投影可以解决多层次的语义表示问题,即可以应用于事件本体的构建,事件实例、事件类的表示与描述,甚至可以对事件本体模式的形式化提供理论支持.同时,要素投影方法在横向上对事件本身、条件状态、事件关系的表示也提供了有效方法.

3 事件本体形式化方法与应用案例

本节基于扩展描述逻辑,结合事件要素投影方法,建立在事件要素层面描述事件关系的方法,进而提出对事件本体进行形式化的步骤.本节还提供了一个事件本体的应用案例,阐述其形式化的过程.

3.1 事件关系的强关联和弱关联 事件之间的分类关系和非分类关系是事件本体的重要组成部分.在对事件之间的非分类关系进行形式化表示的时候,过去采用的做法是构造四种关系角色(R_{cause} , $R_{compositeOf}$, $R_{concurrence}$, R_{follow})来表示事件单元之间的因果关系、并发关系、跟随关系、组成关系.这种表示方法将事件(类)作为关联的基本单元,易于对事件关系进行表示和处理,但仅仅考虑了事件(类)之间的关联,忽略了

事件要素在事件关系中的作用. 而将事件之间的关系深入到事件要素层面, 往往能够帮助我们获得重要的语义关联信息.

为了与以往的事件关系表示方法相区分, 本文针对事件之间的关联性提出两个概念, 即强关联与弱关联.

定义 9 强关联 事件本体中各个事件类或实例通过分类关系或者非分类关系进行关联, 这种建立在事件类之间的关联称之为强关联.

定义 10 弱关联 在事件要素投影的基础上, 本文尝试在原有事件关系网络的基础上提取出那些存在强关联的不同事件(类)的事件要素之间的联系. 事件要素不再孤立地作为单个事件的组成部分, 而是连接不同事件的连接点. 这种建立在事件要素投影上的关联, 本文称之为弱关联(或事件关系投影). 弱关联能够帮助我们理解在事件关系中事件要素所起的作用, 可以表示为:

$$\begin{aligned} & \text{Relation} \mid_{\text{element}}, \text{Relation} \in \\ & \{ \text{cause}, \text{follow}, \text{concurrency}, \text{compositeOf} \}, \\ & \text{element} \in \{ A, O, T, P \} \end{aligned}$$

事件本身反映的是事务状态的变化过程, 而事件关系又将事件联系起来. 如果深入到要素层面, 所谓动态的、过程的, 指的是事件中各个要素的状态是不断变化的, 并且不同事件的要素之间往往存在着语义联系. 同时, 一些重要信息往往隐含在事件本身对前置状态和后置状态的定义中. 如何将事件单元之间的关系表示与事件要素之间的联系有机地结合起来, 是表示事件关系的一个难点. 找到事件类之间最关键的要素, 通过事件弱关联来表现事件关系, 是基于描述逻辑对事件关系进行形式化表示有效手段. 这里, 以并发关系为例, 可以利用在时间要素上的一致性关系得到下面的定理:

定理 1 并发关系的传递性 如果事件 E_1 和事件 E_2 是并发的, E_2 与 E_3 是并发的, 那么 E_1 与 E_3 是并发的.

证明 $ABox$ 存在 $R_{\text{concur}}(E_1, E_2)$, 则事件在时间要素上存在弱关联 $\text{concurrency} \mid_T$, 即时间要素上的事件投影存在关系 $E_1 \mid_T \sqsubseteq E_2 \mid_T$;

$ABox$ 存在 $R_{\text{concur}}(E_2, E_3)$, 同理可得 $E_2 \mid_T \sqsubseteq E_3 \mid_T$. 所以 $E_1 \mid_T \sqsubseteq E_3 \mid_T$. 存在解释 I 是 $(TBox, ABox)$ 的模型, 那么 $(E_1 \mid_T)^I \sqsubseteq (E_3 \mid_T)^I$, 即事件 E_1 与 E_3 在时间要素上存在一致性, E_1 与 E_3 是并发关系.

定理 2 跟随关系的时间要素不相交性

如果事件 E_1 和事件 E_2 是跟随关系, 那么 E_1 与 E_2 是的时间要素是不相交的.

证明 如果 $ABox$ 存在 $R_{\text{follow}}(E_1, E_2)$, 则事件在时间要素上存在弱关联 $\text{follow} \mid_T$, 即时间要素上的事件投影存在关系 $E_1 \mid_T \sqcap E_2 \mid_T \sqsubseteq \perp$; 如果 $ABox$ 存在 $R_{\text{follow}}(E_2, E_1)$, 同理可得 $E_2 \mid_T \sqcap E_1 \mid_T \sqsubseteq \perp$. 所以存在解释 I 是 $(TBox, ABox)$ 的模型, 那么 $(E_1 \mid_T)^I \sqcap (E_2 \mid_T)^I \sqsubseteq \emptyset$, 即事件 E_1 与 E_2 在时间要素上存在不相交性, E_1 与 E_2 存在时序上的先后性.

3.2 基于要素投影的事件本体形式化 事件本体的形式化包括对事件(类)、事件关系及相关规则的定义. 本节在利用事件类概念与事件关系角色进行描述的基础上, 在要素层面建立起事件要素之间的关联模型和语义信息.

这里给出基于要素投影方法来表示事件本体并得到逻辑程序公理的一般步骤.

步骤一: 抽象出事件本体中各个事件(类)的对象要素 O 、时间要素 T 、地点要素 P . (对象要素可能包含多个参与者并区分施动者和受动者).

步骤二: 取事件(类)对 E_i 和 E_j , 根据事件(类)之间的非分类关系找到存在联系的事件要素 $K(K \in \{O, T, P\})$, 即事件类针对特定事件关系的关键要素.

步骤三: 对将事件投影到关键要素上, 得到事件投影的概念描述 $E_i \mid K$.

步骤四: 判断事件(类) E_i 中是否存在影响事件关系的状态条件(前置状态 S_{pre} 或后置状态 S_{post}). 如果不存在, 针对不同的非分类关系, 建立事件要素投影之间的关系 $E_i \mid K \sqsubseteq E_j \mid K$; 否则, 执行步骤五.

步骤五: 针对不同的非分类关系, 建立事件要素投影之间的关系. 如果 E_i 与 E_j 是因果关系, 那么选择对结果发生起决定性作用的状态

(即发生概率最大的条件),得到 $E_i | K \sqcap S_p | K \sqsubseteq E_j | K$, 其中 $p \in \{pre, post\}$; 如果 E_i 与 E_j 是跟随关系, 选取先序事件 E_i 的后置条件 $S_{i\ post}$ 和后序事件 E_j 的前置条件 $S_{j\ pre}$, 公理 $E_i | K \sqcap S_{i\ post} | K \sqsubseteq E_j | K \sqcap S_{j\ pre} | K$; 如果 E_i 与 E_j 是并发关系, 一般地, 将事件 E_i 与 E_j 都投影到时间要素 T 上, 如果 E_i 或者 E_j 存在与事件语言表现相关的重要状态, 则也进行要素投影和概念合取, 得到 $E_i | T \sqcap S_p | T \sqsubseteq E_j | T$.

步骤六: 判断已经考察的事件之间是否存在组成关系, 如果存在更新事件组合关系公理 $E_a | K \sqcup E_b | K \sqcup \dots \sqcup E_j | K \sqsubseteq E_M | K$, 其中大事件 E_M 由小事件 E_a, E_b, \dots, E_j 构成, K 为各个事件的具有共性的关键要素.

步骤七: 判断是否还存在未判定的事件对, 如果存在执行步骤二; 否则, 执行步骤八.

步骤八: 将所有事件要素投影概念定义, 代入相应的包含公理中, 则得到了该事件本体基于描述逻辑程序.

值得注意的是, 当某些事件本体中事件类的划分粒度过细时, 有时事件本事就是其前序或后序事件的后置条件或前置条件, 那么相关的状态信息可以在形式化过程中予以缺省.

3.3 事件本体形式化应用案例 本节给出一个应用案例: 交通工具化学品泄漏水域污染事件本体. 选取其中本体中处于上游位置的若干事件类及它们之间的事件关系, 并扩展出各个事件类的各个要素, 如图3所示. 其中, 多个事件类投影到地点要素上, 并在不同事件类地点要素之间建立了弱关联, 如 $cause|_P$ 和 $follow|_P$. 这将有助于研究在围绕化学品泄露的各个事件在地点要素上的联系与变化. 譬如, 化学品泄露的区域往往包含于河流污染的区域, 动物死亡的区域往往又包含了河流污染的区域, 因为化学品污染影响的范围往往是不扩散的. 这些事件地点要素上的动态信息, 是以往的事件关系形式化过程中被忽略的, 将事件关系也投影到要素上是解决这一问题的有效方法. 并且, 事件类之间的弱关联是多元的, 即可以对不同的事件要素进行投影来表现事件关系. 如事件类 *Vehicle Chemical Leakage* (化学品泄露) 和事件类 *River Pollution* (河流污染) 之间通过投影到地点要素上建立弱关联 $cause|_P$, 同时又与事件类 *Traffic Accident* (交通事故) 之间通过投影到对象要素上建立弱关联 $cause|_O$.

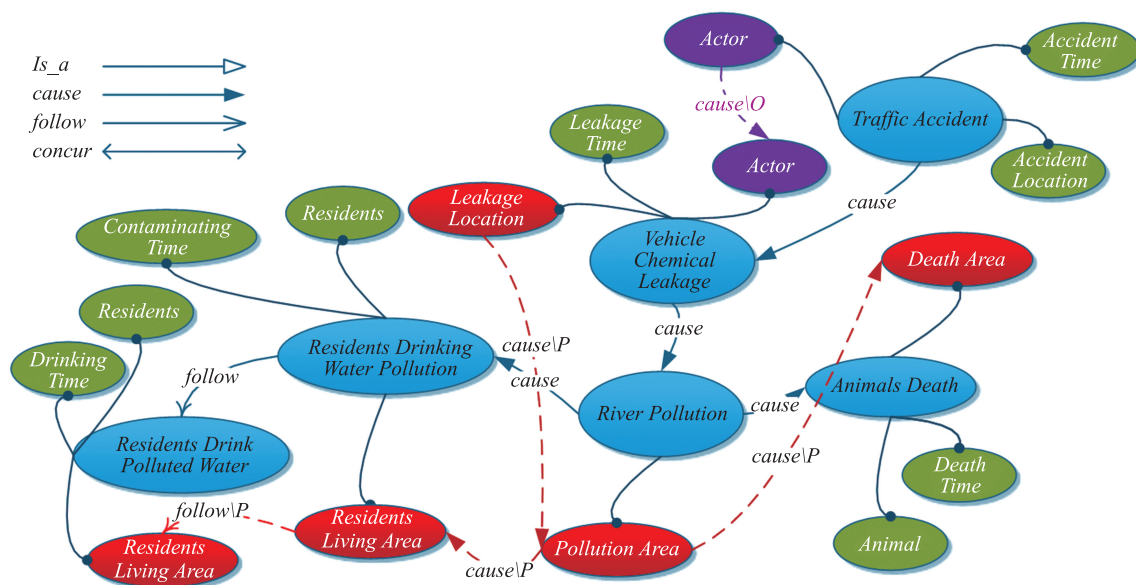


图3 交通工具化学品泄漏水域污染事件本体

Fig. 3 Vehicle chemical leakage water pollution emergency event ontology

本文选取该事件本体的前半部分进行形式化. 首先, 建立事件术语集 $Event-TBox$, 包含事件类 E_0, E_1, E_2, E_3 表示; 同时还包括各个事件类的要素对应的概念和角色. 其中, E_0 为事件类 *Traffic Accident* (交通事故); 概念 *Vehicle* 表示交通工具, 概念 *EncounterTrafficAccident* 表示遭遇交通事故的车辆; 角色 *Carry* 表示事件状态中的车辆“载有”某物, 这里主要描述的是交通工具再有化学品 *Chemical*. E_1 为事件类 *Vehicle Chemical Leakage* (化学品泄露), 将动作要素“泄露”扩展到不同的要素维度上, 得到两种角色 *Leak* 和 *Leakat*, 其中 *Leak* 描述的是施动者(即交通工具)对象和受动对象(即化学物品)之间的角色关系, *Leakat* 描述的是施动者与事件时间要素概念之间的角色关系. E_2 是事件类 *River Pollution* (河流污染), 角色 *PolluteAt* 是动作要素在地点维度的拓展, 描述为污染物(概念 *Pollutants*)“污染”某地(概念 *River*). E_3 为事件类 *Animals Death* (动物死亡).

依照基于事件要素投影的事件本体形式化方法, 本例对描述逻辑语法进行扩展, 得到的具体公理表示如下:

$$\begin{aligned}
 E_0|_O &= Vehicle \sqcap EncounterTrafficAccident \\
 S_{0\ pre}|_O &= Vehicle \sqcap \exists Carry. Chemical \\
 E_1|_O &= Vehicle \sqcap \exists Leak. Chemical \sqcap \exists Leakat. River \\
 E_0|_O \sqcap S_{0\ pre}|_O &\sqsubseteq E_1|_O \\
 E_1|_P &= River \sqcap \exists (Leak^- \circ Leakat)^-. Chemical \\
 E_2|_P &= River \sqcap \exists PolluteAt^-. Pollutants \\
 Chemical &\sqsubseteq Pollutants \\
 E_1|_P &\sqsubseteq E_2|_P \\
 E_3|_P &= Area \sqcap \exists DieAt^-. Animal \\
 E_2|_P &\sqsubseteq E_3|_P
 \end{aligned}$$

按照第 3.2 节中形式化方法的步骤八将上述公理将要素投影表达式进行回代, 并将概念合取做适当化简, 得到的如下公理:

$$\begin{aligned}
 Vehicle \sqcap EncounterTrafficAccident \sqcap \\
 \exists Carry. Chemical &\sqsubseteq \\
 Vehicle \sqcap \exists Leak. Chemical \sqcap \exists Leakat. River \\
 River \sqcap \exists (Leak^- \circ Leakat)^-. Chemical &\sqsubseteq
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 River \sqcap \exists PolluteAt^-. Pollutants \\
 Chemical &\sqsubseteq Pollutants \\
 River \sqcap \exists PolluteAt^-. Pollutants &\sqsubseteq \\
 Area \sqcap \exists DieAt^-. Animal
 \end{aligned}$$

这样, 就在事件要素层面对该事件本体进行了形式化, 这些规则公理能够体现事件关系中隐含的要素关联, 增强形式化系统的表达能力. 并且, 所有的事件投影都可以通过回代的方式转换为基于描述逻辑的复杂概念, 即描述逻辑的扩展符号全部可以最终消除, 所以不会对推理的可达性造成影响.

假设存在如下事件文本信息, 可以提取相关事件和要素来构建 $Event-ABox$:

“2014 年 6 月 11 日, 南阳西峡县重阳镇发生一起交通事故. 事故中装有化学品甲基叔丁基醚的罐车破裂, 33 吨液体泄漏, 流入路边的水峡河里. 河边的村民的饮用水被污染, 给村民的生活造成了极大影响. 另外, 附近水域的部分鱼类死亡.”

其中包含事件要素个体: 灌装卡车 a , 装载有甲基叔丁基醚 b , 南阳西峡县重阳镇水峡河 p , 河鱼 f . 那么参照 $Event-TBox$ 中的概念与角色定义, 可以得到 $Vehicle(a)$ 、 $Chemical(b)$ 、 $River(p)$ 、 $Animal(f)$ 等声明. 如果存在解释 $I=(\Delta^I, \cdot^I)$ 映射概念和角色到集合和关系, 那么可以得到:

$$\begin{aligned}
 a^I &\in Vehicle^I, a^I \in EncounterTrafficAccident^I, \\
 a^I &\in (\exists Carry. Chemical)^I, \\
 a^I &\in (\exists Leak. Chemical)^I, \\
 a^I &\in (\exists Leakat. River)^I, \\
 b^I &\in Chemical^I, p^I \in River^I, \\
 p^I &\in (\exists PolluteAt^-. Pollutants)^I, \\
 p^I &\in Area^I, \\
 f^I &\in Animal^I \\
 Vehicle^I \sqcap EncounterTrafficAccident^I \sqcap \\
 (\exists Carry. Chemical)^I &\sqsubseteq \\
 Vehicle^I \sqcap (\exists Leak. Chemical)^I \sqcap \\
 (\exists Leakat. River)^I & \\
 River^I \sqcap (\exists (Leak^- \circ Leakat)^-. Chemical)^I &\sqsubseteq \\
 River^I \sqcap (\exists PolluteAt^-. Pollutants) &
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Chemical}^I \sqsubseteq \text{Pollutants}^I \\
& \text{River}^I \cap (\exists \text{PolluteAt}^-, \text{Pollutants})^I \sqsubseteq \\
& \text{Area}^I \cap (\exists \text{DieAt}^-, \text{Animal})^I
\end{aligned}$$

总之,不同事件之间的关系,反映到本质上都是要素层面的状态变化或者联系.因此事件要素投影方法是描述事件关系的有效手段,也是对现有形式化方法的重要补充.

4 基于要素投影的事件关系推理

本节基于第3节提出事件要素投影方法,对事件关系进行语法和语义的描述,并讨论基于要素投影的事件关系推理.

4.1 基于要素投影的事件关系语义

表4 基于要素投影的事件关系语义描述

Table 4 Event relations semantic definition based on EEP

包含关系: $EC_1 \sqsubseteq EC_2$
$R_{is_a} = \{(EC_1, EC_2) EC_1 _O \sqsubseteq EC_2 _O\}$
因果关系: $EC_1 \rightarrow EC_2$
$R_{cause} = \{(EC_1, EC_2) EC_1 _O \sqsubseteq EC_2 _O\} \cup \{(EC_1, EC_2) \exists EC_3, \text{then } EC_1 _O \sqsubseteq EC_3 _O, EC_3 _O \sqsubseteq EC_2 _O\}$
并发关系: $EC_1 \parallel EC_2$
$R_{concur} = \{(EC_1, EC_2) EC_1 _T \sqsubseteq EC_2 _T\}$
跟随关系: $EC_1 \triangleright EC_2$
$R_{follow} = \{(EC_1, EC_2) EC_1 _T \sqcap EC_2 _T \sqsubseteq \perp, \exists a, b, EC_1(a), EC_2(b), \text{then } \text{After}(a, b) \text{ or } \text{After}(b, a)\}$
(其中, After 是表示时间先后的角色关系)

4.2 相关性质及推理

4.2.1 事件类实例检测推理 基于事件要素投影,结合包含关系的要素性质有助于解决事件类实例推理问题.

例如,对于动物中毒事件类 *Poisoning* 描述的是动物(*Animal*)接触了有毒物质(*Toxic-Substances*),可以表示为:

动作要素: *Intake* 接触

对象要素: $\{Animal \text{ 和 } ToxicSubstances \text{ 类对象}\}$

前置状态: 对象 = $\{Animal \text{ 类对象}\}$ 核心触发词 = $\{\text{“正常”, “健康”}\}$

后置状态: 对象 = $\{Animal \text{ 类对象}\}$ 核心触发词 = $\{\text{“死亡”, “昏厥”, “呕吐”, “抽搐”}\}$

语言表现: 接触动作事件 = $\{\text{“吃”, “喝”, “饮用”, “吸入”, “食用”}\}$.

对于事件实例 e_1 : “家鸭吃了问题饲料之后,出现大量死亡的现象”.该事件实例中包含要素个体有: “家鸭” a , “问题饲料” b .事件类实例检测过程如下:

$$\begin{aligned}
& E_1|_O := Duck \sqcap \exists Eat. PoorQualityFeed \\
& E_1(e_1); Duck(a), PoorQualityFeed(b), Eat(a, b) \\
& Poisoning|_O := Animal \sqcap \exists Intack. ToxicSubstances \\
& Duck \sqsubseteq Animal \\
& PoorQualityFeed \sqsubseteq ToxicSubstances \\
& S_{1post}|_O := Duck \sqcap Dead \\
& E_1|_O \sqcap S_{1post}|_O \sqsubseteq Poisoning|_O \\
& Eat \sqsubseteq Intack \\
& E_1 \sqsubseteq Poisoning \\
& Poisoning(e_1); Animal(a), ToxicSubstances(b)
\end{aligned}$$

在上例中,基于事件要素投影方法,首先对事件实例的各个要素进行概念抽象,得到要素个体对应的概念(*Duck*等);之后验证这些要素与中毒事件类 *Poisoning* 的各个要素类(*Animal*等)的包含关系,以及核心触发词的角色包含关系;从而建立事件实例的抽象类 E_1 与中毒事件类 *Poisoning* 之间的包含关系.从而证明 e_1 是事件类 *Poisoning* 的实例,实现事件实例检测推理.

4.2.2 包含关系与并发关系的传递性

(1)包含关系的传递性:存在事件类 E_1 、 E_2 、 E_3 ,存在 $E_1 \sqsubseteq E_2$ 和 $E_2 \sqsubseteq E_3$,则 $E_1 \sqsubseteq E_3$.证明如下:

$$\begin{aligned}
& E_1 \sqsubseteq E_2, E_2 \sqsubseteq E_3 \\
& E_1|_O \sqsubseteq E_2|_O, E_2|_O \sqsubseteq E_3|_O \\
& V_1 \sqsubseteq V_2, V_2 \sqsubseteq V_3 \\
& E_1|_O \sqsubseteq E_3|_O, V_1 \sqsubseteq V_3 \\
& E_1 \sqsubseteq E_3
\end{aligned}$$

依靠事件要素投影方法,事件类之间的包含关系的推理可以从事件要素层面进行有效推理,将事件类的包含问题转换为要素概念和要素角色的包含问题.

(2)并发关系的传递性:存在事件类 E_1 、 E_2 、 E_3 ,存在 $E_1 \parallel E_2$ 和 $E_2 \parallel E_3$,则.证明如下:

$$\begin{aligned}
& E_1 \parallel E_2, E_2 \parallel E_3 \\
& E_1|_T \sqsubseteq E_2|_T, E_2|_T \sqsubseteq E_3|_T \\
& E_1|_T \sqsubseteq E_3|_T \\
& E_1 \parallel E_3
\end{aligned}$$

并发关系传递性的推理思路在于并发关系在时间要素上的一致性.

4.2.3 对称性动作要素的事件在因果关系中的推理 如果存在因果关系 $EC_1 \rightarrow EC_2$ 与 $EC_1 \rightarrow EC_3$, 且 $EC_1 \equiv EC_3$, EC_1 中的主被动对象要素分别是 EC_2 与 EC_3 中的对象要素, 那么 EC_1 动作要素角色 V_1 则存在 $V_1^- \sqsubseteq V_1$.

$$\begin{aligned}
& EC_1 \rightarrow EC_2, EC_1 \rightarrow EC_3 \\
& EC_1|_{O_S} := O_S \sqcap \exists V_1. O_O \\
& EC_1|_{O_O} := O_O \sqcap \exists V_1^-. O_S \\
& EC_2|_O \sqsubseteq EC_1|_{O_S}, EC_3|_O \sqsubseteq EC_1|_{O_O} \\
& EC_2 \equiv EC_3 \\
& V_1 \sqsubseteq V_1^-
\end{aligned}$$

例如, “昨日上午, 市区一位张姓男子与一位李姓男子发生激烈肢体冲突导致双方均受伤, 张姓男子伤势较重被立即送医, 随后李姓男子也自行前往医院接受医生救治”.

上述例子中存在三个事件实例:

e_1 : 昨日上午, 市区一位张姓男子与一位李姓男子发生激烈肢体冲突导致双方均受伤

e_2 : 张姓男子伤势较重被立即送医

e_3 : 李姓男子也自行前往医院接受医生救治

事件实例中, 存在对象要素个体“张姓男子” a 和“李姓男子” b , 以及“医生” c . 首先, 将 3 个事件实例进行抽象得到事件类 EC_1 、 EC_2 、 EC_3 , 有 $EC_1(e_1)$ 、 $EC_2(e_2)$ 、 $EC_3(e_3)$.

$$\begin{aligned}
& EC_1 \rightarrow EC_2, EC_1 \rightarrow EC_3 \\
& EC_1(e_1), EC_2(e_2), EC_3(e_3) \\
& EC_1|_{O_S} := People \sqcap \exists fight. People \\
& EC_1|_{O_O} := People \sqcap \exists fight^-. People \\
& S_{1\text{ post}}|_{O_S} := People \sqcap Injured \\
& EC_2|_{O_O} := Patients \sqcap \exists Treat^-. \top \\
& EC_3|_{O_O} := Patients \sqcap \exists Treat^-. Doctor
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& S_{1\text{ post}}|_{O_S} \sqsubseteq Patients \\
& EC_2|_{O_O} \sqcap S_{1\text{ post}}|_{O_S} \sqsubseteq EC_1|_{O_S}, EC_3|_{O_O} \sqcap \\
& S_{1\text{ post}}|_{O_S} \sqcap EC_1|_{O_O} \\
& EC_2 \equiv EC_3 \\
& fight \sqsubseteq fight^- \\
& People(a), People(b), Doctor(c) \\
& fight(a, b) \equiv \bar{fight}(b, a)
\end{aligned}$$

在上面的过程中, 由于事件实例 e_2 的核心词“送医”和 e_3 的核心词“救治”的语言表现经过相似度计算具有较高的相似值, 可以判定它们所属的事件类是等价的. 同时, e_1 事件与 e_2 , e_3 存在因果关系, 并且对象要素在事件和状态之间存在对应关系, 所以可以推出事件 e_1 的动作要素具有对称性.

5 结束语

本文提出的事件要素投影方法充分考虑了事件要素在事件本体形式化中的作用, 统一了事件、事件要素、条件状态的表示方法, 充分考虑了要素之间的动态联系. 同时, 要素投影方法还对事件关系的描述做了延伸, 提出了强关联和弱关联的概念以及从要素层面研究事件关系的新思路, 并基于该方法对 SROIQ 进行扩展, 进而提出事件本体的形式化方法, 并给出了应用案例. 更重要的是, 基于事件要素投影方法建立的逻辑程序, 所有的公理中的扩展符号都可以最终消除, 这意味着该方法符合标准的描述逻辑语法, 不会对整个形式化框架的可判定性造成影响. 另外, 本文提出的基于要素投影的推理方法把事件关系转化为要素的关系, 有效地降低了事件非分类关系的语义维度, 为解决事件关系的推理提供了新的思路. 但是, 基于要素投影的推理研究工作刚刚起步, 对于非分类事件关系的推理还需要结合不同事件类的要素特点和语言表现做进一步的研究.

参考文献

- [1] Hatzivassiloglou V, Filatova E. Domain-independent detection, extraction, and labeling of atomic events. In: Proceedings of Recent

- Advances in Natural Language Processing (RANLP), Borovetz, Bulgaria, 2003:145–152.
- [2] Vanderwende L, Banko M, Menezes A. Event-centric summary generation. Working Notes of DUC, 2004, 127–132.
- [3] Van Hage W R, Malaisé V, Segers R, *et al.* Design and use of the Simple Event Model (SEM). Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web, 2011, 9 (2): 128–136.
- [4] Van Hage W R, Malaisé V, de Vries G K D, *et al.* Abstracting and reasoning over ship trajectories and web data with the Simple Event Model (SEM). Multimedia Tools and Applications, 2012, 57(1): 175–19
- [5] Corda I, Bennett B, Dimitrova V. A Logical model of an event ontology for exploring connections in historical domains. In: Workshop on Detection, Representation and Exploitation of Events in Semantic Web, Tenth International Semantic Web Conference (ISWC). Bann, Germany, 2011.
- [6] 刘宗田, 黄美丽, 周 文等. 面向事件的本体研究. 计算机科学, 2009, 36(11): 189–192.
- [7] 仲兆满, 李存华, 刘宗田等. 面向 Web 新闻的事件多要素检索方法. 软件学报, 2013, 24 (10): 2366–2378.
- [8] Pittet P, Cruz C, Nicolle C. Modeling changes for SHOIN(D) ontologies: An exhaustive structural model. In: IEEE Seventh International Conference on Semantic Computing (ICSC), California, USA: IEEE, 2013: 104–109.
- [9] Horrocks I, Kutz O, Sattler U. The even more irresistible SROIQ. In: Proceedings of the 10th International Conference of Knowledge Representation and Reasoning. UK: AAAI Press, 2006, 6: 57–67.
- [10] Mosurovic M, Krdzavac N, Graves H, *et al.* A decidable extension of SROIQ with complex role chains and unions. Journal of Artificial Intelligence Research, 2013, 47(1): 809–851.
- [11] Kazakov Y. An extension of complex role inclusion axioms in the description logic mathcal { SROIQ }. Automated Reasoning, 2010, 472–486.
- [12] Carral D, Scheider S, Janowicz K, *et al.* An ontology design pattern for cartographic map scaling. The Semantic Web: Semantics and Big Data. Springer Berlin Heidelberg, 2013, 76–93.
- [13] Martínez D C, Janowicz K, Hitzler P. A logical geo-ontology design pattern for quantifying over types. In: Proceedings of the 20th International Conference on Advances in Geographic Information Systems. New York, USA: ACM, 2012: 239–248.
- [14] Hu Y, Janowicz K, Carral D, *et al.* A geo-ontology design pattern for semantic trajectories. Spatial Information Theory. UK: Springer International Publishing, 2013, 438–456.
- [15] McCarthy J. Situations, actions, and causal laws. Stanford Artificial Intelligence Project, Memoz, Stanford University Department of Computer Science, 1963.
- [16] Shanahan M. The event calculus explained. Artificial intelligence today. Springer Berlin Heidelberg, 1999, 409–430.
- [17] Kaneiwa K. Order-sorted logic programming with predicate hierarchy. Artificial Intelligence, 2004, 158(2): 155–188.
- [18] Kaneiwa K, Iwazume M, Fukuda K. An upper ontology for event classifications and relations. AI 2007: Advances in Artificial Intelligence. Springer Berlin Heidelberg, 2007, 394–403.
- [19] Scherp A, Franz T, Saathoff C, *et al.* F—a model of events based on the foundational ontology dolce+DnS ultralight. In: Proceedings of the 5th International Conference on Knowledge Capture. New York, USA: ACM, 2009: 137–144.
- [20] Liu W, Xu W, Fu J, *et al.* An extended description logic for event ontology. Advances in Grid and Pervasive Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2010, 471–481.
- [21] 刘 炜, 徐文杰, 唐英英等. 基于扩展描述逻辑和逻辑程序的事件动作形式化表示与推理. 计算机科学, 2014, 41(1): 116–125.
- [22] 石 慧, 魏 玲. 面向对象(属性)概念格的布尔表达. 南京大学学报(自然科学), 2015, 51(2): 415–420.