

基于描述逻辑的上下文知识获取与推理方法

胡博 王智学 董庆超 牛彦杰

(解放军理工大学指挥信息系统学院 南京 210007)

摘要 针对上下文感知计算中缺乏清晰统一的模型与自动推理支持的问题,提出一种基于描述逻辑的上下文知识获取与推理方法。该方法首先提出了一种本体引导的上下文模型框架,根据抽象层次的不同将上下文模型分为元模型与领域特定模型两层结构;然后采用描述逻辑表示语言 SHOIN(D)形式化描述该上下文模型,设计上下文模型向描述逻辑知识库的转换算法。最后以一个实际案例说明该方法的可行性。

关键词 普适计算,描述逻辑,本体,上下文推理

中图分类号 TP391 文献标识码 A

Context-aware Knowledge Acquisition and Reasoning Based on Description Logic

HU Bo WANG Zhi-xue DONG Qing-chao NIU Yan-jie

(Academy of Command Information System, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract Aiming at the problem of uncertain model and lack of automatic reason reasoning support in context-aware technique, the paper proposed an approach to model and reason the context-aware knowledge based on description logic. It suggests a context model framework in the semantic restrictions of the ontology, which divides the context model into two-level structure as meta ontology and domain-specific ontology, according to the abstract hierarchy. The objectives of our model framework include modeling a set of high-level entities, and providing flexible extensibility to add specific concepts in different application domains. After that, the paper proposed an algorithm to convert the context model to the knowledge described in description logic using SHOIN(D). Finally, a case study was given to illustrate the practicality of the method.

Keywords Context model, Description logic, Ontology, Context reasoning

1 引言

随着通信与互联网技术的不断发展,同时具有计算和组网能力的设备(PDA、3G手机等)不断出现,传统以计算机为中心的计算机模式因无法适应动态变化的人-机交互环境而受到严重挑战。而以传感器、无线通信和计算技术为依托的普适计算模式越来越获得研究者的重视。这种模式强调计算设备与环境的融合,可以识别周围环境信息的变化,自动地做出反应,从而减少用户的人工参与。上下文感知(context-aware)技术^[1,2]作为普适计算的重要环节,通过感知环境信息(如用户位置、使命任务、可用的计算资源等),为普适计算的实现提供支持。随着普适计算研究的不断深入,上下文感知计算技术也已成为一个独立的研究热点。

上下文感知的智能性关键体现在如何获取上下文知识及其推理上。目前该领域主要的研究方法是通过上下文建模技术获取上下文知识,并在此基础上进行上下文知识的推理判断。国外已有许多相关方法提出,比较成熟且具有代表性的

有 Karen Henriksen 等^[3]通过将上下文分为感知、静态、用户配置和派生等类型,提出一种符合上下文特点的特定建模语言 CML,支持对上述几类上下文的建模。文献[4]提出了一种基于 UML 的面向上下文感知 Web 服务的建模语言 ContextUML,基于该语言完成了对上下文的建模。但是上述两种方法都是从特定领域出发设计上下文模型,没有提出一套通用的上下文建模方法,并且缺乏上下文自动推理技术的支持,有违于普适计算降低人机交互的基本出发点。文献[5]提出了使用 OWL 本体标记语言建模上下文,其可以支持语义表示的上下文推理,但文中也指出,受当时技术条件的限制,其同样缺乏自动推理工具的支持。国内的刘栋等人^[6]提出基于本体的上下文建模 CACO,并提出了一种基于规则的推理算法。该方法将上下文感知系统视为一种抉择信息系统,并与本体论相结合,具有本体技术在形式化方面的优势,但是文中对上下文本体的设计仅给出针对某场景的片段,缺乏对上下文本体不同层次的抽象,没有对本体中概念之间的继承、包容、等价关系的规范,不利于模型的复用;同时,其由于系统开

到稿日期:2012-11-19 返修日期:2013-02-03 本文受“十一五”国防重点预研基金(9140A06040108JB8101)资助。

胡博(1983-),男,博士生,主要研究方向为语义网、普适计算,E-mail:jsnjhb@126.com;王智学(1961-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为系统工程、软件工程;董庆超(1982-),男,博士生,主要研究方向为语义网、形式化方法;牛彦杰(1979-),女,博士生,主要研究方向为复杂系统建模。

发者在定义不同规则时具有随意性,缺乏明确的语义,不便于不同领域间上下文知识的共享。这些问题对于上下文感知系统的应用而言显然是需要改进的。

针对上述研究中在上下文知识获取和推理方面存在的问题,本文首先提出一种基于本体的上下文模型框架,将上下文模型按照抽象层次的不同分为元本体与领域特定本体两层,其中元本体层抽取了上下文信息中最基本的元素,用以规范和引导领域特定本体的建立。领域特定本体层是元模型的实例化,针对不同的领域场景建立领域本体,以提高上下文本体的复用性;然后在上下文模型框架的基础上,设计了上下文模型到描述逻辑的映射算法,最终借助描述逻辑的推理工具完成上下文知识的推理。本文第2节提出基于本体的上下文建模方法;第3节给出上下文本体模型到描述逻辑的映射方法,设计出基于描述逻辑的上下文推理方法并给出一个实际案例来说明本方法的现实可行性;最后总结全文工作。

2 基于本体的上下文知识模型与描述逻辑表示

上下文信息的多样性使得不同领域的表达方式各不相同,如何从这些复杂异构的信息中抽取共性,建立统一的抽象逻辑模型,从而使上下文信息的建模、推理和共享在一个框架下进行,是上下文感知中一个非常重要的问题。本体^[7]的目标是捕获相关领域的共有知识,提供对该领域知识的共同理解,确定该领域内共同认可的术语,并从不同层次的形式化模型上给出这些术语和术语间相互关系的明确定义,实现对上下文知识的推理。

2.1 上下文模型框架

上下文模型框架的主要作用是统一不同领域上下文模型的总体结构,使上下文模型的开发在统一的框架内进行,从而提高模型的复用性与共享程度。关于上下文的定义,本文采用目前普遍接受的定义:上下文是用于刻画空间中实体的信息,包括了人物、设备、地点、时间等物理要素。本文在深入理解上下文相关研究的基础上,结合需求工程的研究成果,认为除上述要素外,上下文还包括了用户的目标、计划、需求,相互之间关系等信息要素。上下文感知就是提取与用户相关的信息,对信息进行重构,最终为用户提供最合适的服务。

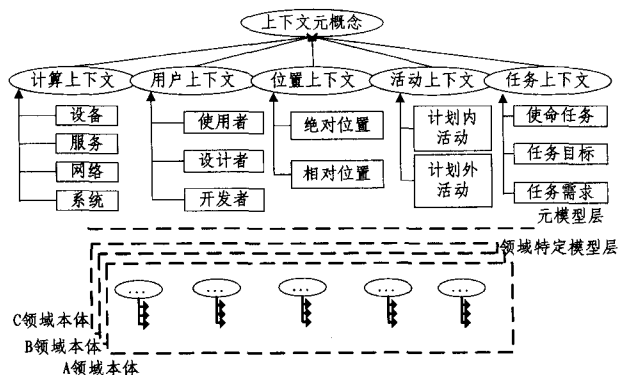


图1 上下文模型框架

根据对上下文定义的理解,想要将不同领域的上下文要素全部在一个模型中表示是非常困难的。在文献[8]的基础上,综合考虑本体和体系结构框架技术的优势,本文根据抽象

层次的不同提出一种上下文二层模型,如图1所示。抽取上下文计算中最为普遍和基本的概念及其关系构成顶层元概念,统一不同利益相关方对上下文基本概念的语义理解。第二层领域相关本体在继承元本体的基础上提供对特定领域的扩展,在实际的应用中,各类服务或者活动的细节都分布在某一特定的领域,例如通信领域、交通领域、农业领域等。

2.2 描述逻辑与上下文本体

描述逻辑(Description Logic, DL)是一种本体描述语言^[9],是一阶谓词逻辑的可判定子集,它以结构化和易理解的形式化来表示领域知识。由描述逻辑构建的本体具备严格的形式化语义,消除了语义二义性和不确定性等问题。根据知识表达能力的不同可以划分为不同的子系统,如ALC, SHIN, SHOIN(D)等。业界提出了描述逻辑本体的一致性推理算法(Tableau算法),并且开发了可以自动执行该算法的自动推理引擎。在自动推理引擎的支持下,目前已经可以实现基于描述逻辑上下文本体的自动推理,本部分内容首先解决上下文模型描述逻辑形式化表示问题。

2.2.1 顶层上下文元本体

上下文顶层元本体的作用是为了明确定义上下文元概念及其关联,形成一个明确形式化的知识网络,使得基于上下文开发的需求获取更具针对性和准确性。元本体中的概念跨越多个领域,领域层本体建立都受到元本体的约束,因此元本体由最抽象的基本要素构成。本文使用描述逻辑SHOIN(D)形式化描述各本体。由于OWL DL实际上等价于SHOIN(D),因此在具体应用中也可以采用OWL DL语言表示本体。

定义1(上下文元本体) 元本体定义为一个四元组(MetaConcepts, MetaRelations, MetaAttributes, MetaRules)。

MetaConcepts是上下文元概念的有限集合,来源于上下文模型框架中的全部元概念;MetaRelations是上下文元概念间关联的有限集合,来源于上下文模型框架中元概念间的关联关系;MetaAttributes代表所有元概念和关联的基本属性集合,例如概念与关联的标识等,这些属性的类型包括常见的整型、字符串等;MetaRules表示元本体概念之间满足的基本规则集合。上下文元本体示意图如图2所示。

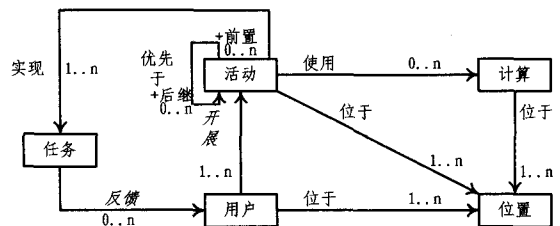


图2 上下文元本体

本文使用的SHOIN(D)编码表示上下文元本体,具体本体与描述逻辑的转换方法见第3节,这里给出了部分示例,包括概念与概念的关联、概念与属性的包含、概念与子概念的继承关系(具体转换方法下节详述),例如:

概念“用户”与“活动”之间存在关联“开展”的描述逻辑表示为:

$\text{Person} \sqsubseteq \text{Executing_Activity}$

概念“用户”有属性“用户名”(该属性为字符串类型)的描

述逻辑表示为:

Person \sqsubseteq username, String

子概念“设备”继承概念“计算”的描述逻辑表示为:

Device \sqsubseteq Computing

2.2.2 领域上下文本体

领域上下文本体描述的是特定领域中的概念及概念之间的关联,其中概念是顶层元本体概念类的实例,同时提供对领域特定知识的扩展接口,是描述领域特定概念及其属性与关系的一组本体集合。比如,“通信信道”、“可用带宽”是元本体“计算上下文”的实例;“路由切换”、“服务调度”是元本体“活动”的实例。图3所示为一个通信领域上下文本体的示意图。

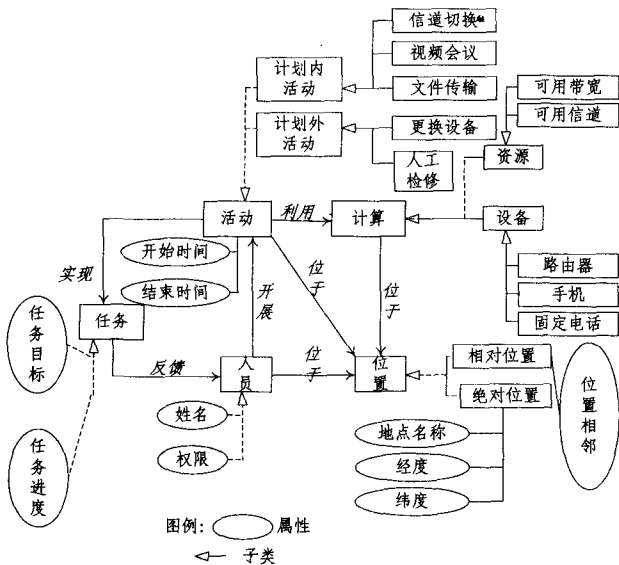


图3 通信领域上下文本体

领域上下文本体是可重用的领域概念结构。为了方便本体的映射,必须使得所有领域上下文本体的结构定义一致,因此将该本体定义如下。

定义2 领域特定上下文本体是一个四元组 $\langle \text{DomConcepts}, \text{DomRelations}, \text{DomAttributes}, \text{DomRules} \rangle$

DomConcepts 为给定领域中的概念集合; DomRelations 为领域概念集合中概念之间所有关联组成的集合,包括概念的层次关系; DomAttributes 表示所有概念和关联的属性集合; DomRules 是领域规则集合。

领域上下文本体中的概念是 MetaConcepts 在领域内实例化的子概念。在 OWL DL 中使用 Individual($o, \text{type}(C)$) 表示个体 o 是概念 C 的实例。描述逻辑 SHOIN(D) 中用 $o : C$ 表示。因此我们定义 DomConcepts 为 MetaConcepts 在领域层实例化后的实例组成的集合。

DomConcepts $\equiv \{o | o : \text{MetaConcepts}\}$

DomRelations 与 DomAttributes 亦有相同的表示方式。

这样就可以针对具体领域建立上下文知识的本体表示片段,例如考虑如下模型,用户 LiMing 在会议室(MeetingRoom)里,会议室里有一台固定电话(Telephone),该电话的通信信道(Channel)正忙。该模型对应的描述逻辑表示如下:

$\langle \text{LiMing} \rangle : \text{Person}$

Device \sqsubseteq Computing

$\langle \text{Telephone} \rangle : \text{Device}$

$\langle \text{MeetingRoom} \rangle : \text{Location}$

Person $\sqsubseteq \forall \text{LocatedIn. Location}$

Computing $\sqsubseteq \forall \text{LocatedIn. Location}$

$\langle \text{LiMing}, \text{MeetingRoom} \rangle : \text{LocatedIn}(\text{Person}, \text{Location})$

$\langle \text{Telephone}, \text{MeetingRoom} \rangle : \text{LocatedIn}(\text{Computing}, \text{Location})$

Device \sqsubseteq ChannelStatus, String

$\langle \text{Telephone} \rangle. \text{ChannelStatus} = \text{busy}$

2.2.3 定义规则

基于规则的推理技术在人工智能、专家系统等领域中得到了广泛的应用。最近的研究工作将这种技术引入了上下文感知计算领域。文献[10]利用 Jess 规则引擎实现了一个上下文感知系统,该系统能够对用户的位置、活动、使用的设备以及 Web 服务的执行环境、通信协议等各种上下文进行推理。然而,由于开发者定义规则时使用的词汇没有统一的规范,缺乏通用的语义信息,使得该技术具有一定的局限性。

SWRL(Semantic Web Rule Language)^[11] 是 W3C 提出的一种语义 Web 规则标记语言,其起点是 DAML 语言系列中 DAML-Rule 或 DAML-L 规则语言的一些初步设想。SWRL 结合了 OWL DL 和 RuleML 的子语言 Datalog,是将描述逻辑和 Horn 子句相结合的 Web 规则标记语言,可以使用它来对规则进行描述,既实现了对规则知识的表示,又可以保持 DL 语言的高效推理。规则知识来源于用户或领域专家的指定,加入规则知识的推理后使本文设计的推理算法同时也兼有基于规则方法的优点。

本文的规则集合是上下文本体的一部分,包括两个部分,即元本体的规则 MetaRules 和领域特定本体的规则 DomRules。规则表示对概念间关联以及概念属性的约束,也就是一组“如果...那么”形式的语句。本文将本体中的规则使用 SWRL 语言表示(下文详述),例如 MetaRules 规定概念“用户”与概念“活动”之间的关联“开展”必须具有一个以上的“用户”参与,为便于理解,这里首先采用一阶谓词逻辑描述本体中的规则:

$\forall x. \text{Activity}(x) \rightarrow (\# \{y | \text{Person}(y) \wedge \text{Execute}(x, y)\} \geq 1)$

MetaRules 是上下文本体中最基本的规则,更具有应用意义的领域特定规则 DomRules 主要针对不同领域建立一组符合领域场景语义的自定义规则。例如,如果满足条件 1) 用户在会议室里并且该用户具有一台任务“ConnectingSomebody”, 2) 会议室里有一台设备固定电话, 3) 同时该电话的信道正忙,那么得出结论:该用户现在的活动(概念 Activity)为正在使用该电话通话。该规则使用一阶谓词逻辑表示为:

$\forall x, y, z \{ \text{Person}(x) \wedge \text{MeetingRoom}(y) \wedge \text{Telephone}(z) \wedge \text{LocatedIn}(x, y) \wedge \text{LocatedIn}(z, y) \wedge \text{ChannelStatus}(z, \text{"BUSY"}) \wedge \text{HasMission}(x, \text{ConnectingSomebody}) \} \rightarrow \exists a \{ \text{Activity}(a) \wedge \text{Execute}(x, a) \}$

为了进行基于描述逻辑的上下文推理,下文将讨论如何将规则描述转换为 SWRL 表示。

3 基于描述逻辑的上下文推理方法

在上下文感知计算中,可以通过传感器、RFID 获取直观、

明显的信息,例如“电话正忙”、“房间里有人”、“带宽上限 10M/s”等,这些上下文信息在语义上处于较低的层次。而通常来说,高层的上下文信息对我们更加有意义,比如“会议正在进行”、“通信信道切换”等可以直接为上层应用提供支持。上下文推理通过对低层上下文信息之间关系的分析与推理,重新组合或生成新的高级上下文,使上下文感知系统具备一定程度的自适应性,降低人工干预的程度。

针对前文对现有上下文推理技术的总结,本文提出一种基于描述逻辑的上下文推理方法。对比以往的研究,该方法具备描述逻辑推理的高效性与可判定性,同时具有上下文本体的分层语义结构,当领域发生变化时,只需要更换领域上下文本体即可进行新的领域上下文信息的推理,提高了方法的复用性。此外,该方法还支持人工定义规则的补充,在必要的时候,可以添加新的推理规则。

本方法在使用描述逻辑 SHOIN(D)子系统描述上下文模型的基础上,将上下文领域本体的概念和关系转换为描述逻辑的实例集合(Abox);而在公理集合 Tbox 中存放上下文本体的概念和关联关系,这部分主要包含两个部分:上下文本体的概念与关联;领域本体对元本体的继承与扩展关系。在此基础上采用规则标记语言 SWRL 表示上下文本体中的规则集合,最终借助 Pellet 自动推理引擎推理得到隐含的上下文知识。

本文提出的基于描述逻辑的上下文推理算法主要从以下几个方面进行推理:

1. 概念(类)-实例的关系推理:判断一个实例 a 是否是给定概念 A 的实例;判断某概念 A 是否具有实例 b ;根据概念之间的关系,判断实例之间的关系。
2. 概念(类)之间的关系推理:给定概念 A 和 B ,判断它们之间的关系(子类、关联、约束)。
3. 概念(类)的一致性推理:给定概念 A ,判断在上下文本体库中该概念是否与其它概念一致。
4. 概念(类)、实例之间基于规则的推理:根据规则的定义,判断概念、实例间满足的隐含的关系。

3.1 算法描述

根据前文所述,本方法的主要流程如图 4 所示。

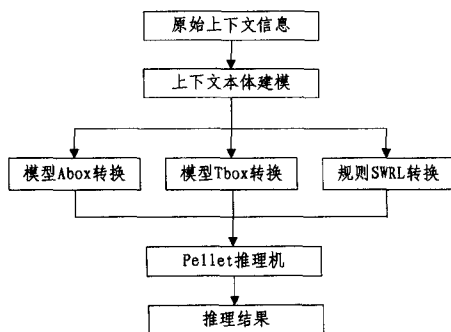


图 4 算法流程示意

上下文本体的描述逻辑转换算法设计如下。

输入:上下文本体、领域特定上下文本体。

输出:经推理产生的新的上下文本体。

Step1 生成 Tbox 公理集:

- Step1.1 对于元本体模型中出现的各种元概念,在 Tbox 中创建相应的概念。
- Step1.2 对于上下文元本体中概念 A 与概念 B 之间出现的关联关系 R ,首先在 Tbox 中创建 R 关系,然后添加公理 $A \subseteq R.B$ 。
- Step1.3 对于上下元本体中父概念 A 与子概念 B 之间存在的继承关系,在 Tbox 中应添加公理 $B \subseteq A$ 。
- Step1.4 对于概念 A 具有的属性 X (其数据类型为 T),在 TBox 中添加公理 $A \subseteq X.T$ 。

Step2 生成 Abox 实例集:

- Step2.1 对于上下文领域本体中出现的各种领域概念,在 Abox 中创建相应的实例。
- Step2.2 对于上下文领域本体中出现的各种领域关系,将其映射为 Tbox 中已存在的关系,并在 Abox 中相应实例之间加入该关系。

规则的 SWRL 转换算法设计如下。

输入:本体中的规则集合,包括元本体的 MetaRules、领域特定的 DomRules。

输出:基于 SWRL 的规则。

Step1 将规则中的前提条件转换为 SWRL 规则的前件(antecedent)。

- Step1.1 对于前提条件中概念 X 与概念 Y 之间的关联 R ,将其转换为 SWRL 规则中前件的子句;关系 R 转换为子集中的谓词 $R(x,y)$, x,y 可以是变量或常量,为概念 X,Y 的实例。
- Step1.2 前件中如果包含多个子句,则在子句间加入关系。
- Step1.3 针对某概念 X 的属性 A 的前提条件,以该属性为谓词,概念 X 的实例 x 和属性值 a 为变量和常量,添加谓词形如 $A(x,a)$ 。

Step2 将规则中的结果转换为 SWRL 规则的后件(consequent)。

3.2 案例分析

这里以第 2 节中用户通电话的模型为例,来说明如何从传感器得到的低级上下文信息推理获得高级上下文知识“某人正在打电话”,它对应一条上下文领域本体中的关联,即“用户”执行“活动”(“打电话”是“活动”的实例)。

根据前文“正在通话”规则的 OWL 描述,可以在已知上下文(人、计算、位置、任务的实例等)的基础上推理得知某个确定的人正在执行打电话这一活动。对应的 SWRL 规则为:

```

LocatedIn(Person P, Location MeetingRoom) ∧ Located-In(Device Telephone, Location MeetingRoom) ∧ ChannelStatus(Device Telephone, "BUSY") ∧ HasMission(Person P, Mission ConnectingSomebody) → Executing(Person P, Activity Call)
  
```

其中涉及的概念与实例来源于领域本体; P 是概念 Person 的实例,Telephone 是概念 Device 的实例(Device 又继承自元本体概念 Computing),MeetingRoom 是概念 Location 的实例,Call 是概念 Activity 的实例,ConnectingSomebody 是概念 Mission 的实例。

二元谓词 LocatedIn、Executing 是两个概念间的关联,其

中(1)LocatedIn 是 Person、Computing 与 Location 之间的关联;(2)Executing 是 Person 与 Activity 之间的关联。将该领域特定规则转换为 SWRL 后,结合本文对于描述逻辑 Abox、Tbox 的转换算法,就可以在 Pellet 中表示该模型。

这样,就可以在已知有多人在会议室的场景中时使用 Pellet 自动推理得到是哪一个人正在执行打电话的活动。

应用本文所提出的上下文本体的描述逻辑转换算法,转换之后 Tbox 与 Abox 的部分重要公理和断言如下(为便于理解,括号内为对应的自然语言解释):

<p>Tbox:</p> <p>Device \sqsubseteq Computing (Device 是 Computing 的子概念)</p> <p>Person $\sqsubseteq \forall$ LocatedIn, Location (Person 与 Location 之间存在 LocatedIn 关联)</p> <p>Computing $\sqsubseteq \forall$ LocatedIn, Location (Computing 与 Location 之间存在 LocatedIn 关联)</p> <p>Person $\sqsubseteq \forall$ HasMission, Mission (Person 与 Mission 之间存在 HasMission 关联)</p> <p>Device \sqsubseteq ChannelStatus, string (Device 具有 string 类型属性 ChannelStatus)</p> <p>Person $\sqsubseteq \forall$ Executing, Activity (Person 与 Activity 之间存在 Executing 关联)</p>
<p>Abox:</p> <p>(LiMing); Person (存在一个 Person 的实例 LiMing)</p> <p>(WuGang); Person (存在一个 Person 的实例 WuGang)</p> <p>(Telephone); Device (存在一个 Device 的实例 telephone)</p> <p>(Call); Activity (存在一个 Activity 的实例 call)</p> <p>(MeetingRoom); Location (存在一个 Location 的实例 MeetingRoom)</p> <p>(ConnectingSomebody); Mission (存在一个 Mission 的实例 ConnectingSomebody)</p> <p>(LiMing, MeetingRoom); LocatedIn (LiMing 位于 MeetingRoom)</p> <p>(WuGang, MeetingRoom); LocatedIn (WuGang 位于 MeetingRoom)</p> <p>(Telephone, MeetingRoom); LocatedIn (Telephone 位于 MeetingRoom)</p> <p>(Telephone, Busy); ChannelStatus (Telephone 的 ChannelStatus 为 Busy)</p> <p>(LiMing, ConnectingSomebody); HasMission (LiMing 具有任务 ConnectingSomebody)</p>

采用 Pellet 1.5.0 自动推理引擎检验该上下文本体模型,使用本体查询语言 SPARQL 定义查询条件。加载该本体后,用户向引擎发送规则查询条件,查询是否有实例之间满足 Executing 关系,对应的 SPARQL 查询语句为 SELECT ?a ?b WHERE { ?a xmlns:Executing ?b. }, 在 Pellet 控制台输入查询命令,引擎自动执行 Tableau 算法并返回本体推理结果。结果显示实例“LiMing”与“Call”之间存在 Executing 关系,如图 5 所示,说明本文提出的基于描述逻辑的上下文推理方法具有现实可行性。

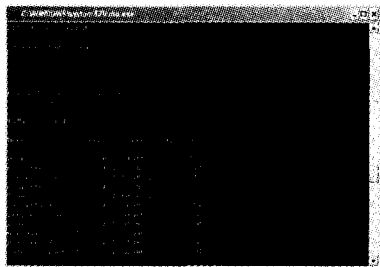


图 5 使用 Pellet 的上下文推理结果

Pellet 推理引擎同时支持概念与实例之间的一致性检验。用以发现上下文本体中可能出现的语义不一致问题,使用 Pellet 中自带的“consistency”命令即可完成对本体中概念与实例

的一致性检验。由于篇幅所限,本文在此不做详细论述。

结束语 上下文建模与推理是上下文感知计算领域的重要内容,目前的研究重点集中在如何提高模型的复用程度与推理的自动化方面。与以往的研究工作相比,本文提出基于描述逻辑的上下文知识获取与推理方法具有以下特点:(1)有清晰的模型和理论机制,具有很强的语义表达能力;(2)通过抽象层次的分离,适合于通过概念分类学在元模型层的基础上扩展不同的领域特定概念;(3)提供了可判定的推理服务,能保证推理算法总能停止,并返回正确的结果。

通过本文设计的模型转化算法,对领上下文概念、关联、规则等要素做出了精确的分类和定义,借助成熟的描述逻辑推理工具,提出了上下文信息推理方法。这种采用形式化的推理技术自动化程度较高、结果可靠,可以为上下文感知的实现提供便利。

参 考 文 献

- [1] Gui N, et al. Toward architecture-based context-aware deployment and adaptation[J]. Journal of Systems and Software, 2011, 84(2): 185-197
- [2] Kwon O. The potential roles of context-aware computing technology in optimization-based intelligent decision-making[J]. Expert Systems with Applications, 2006(31): 629-642
- [3] Henriksen K, Indulska J. Modelling and using imperfect context information[C] // Proceedings of the 2nd IEEE Annual Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops, March 2004: 33-37
- [4] Sheng Q Z, Benatallah B. Contextuml: A uml-based modeling language for model driven development of context-aware web services[C] // Proceedings of the International Conf. on Mobile Business, 2005: 206-212
- [5] Gu Tao, Pung H K, Zhang Da-qing. A middleware for building context-aware mobile services[C] // Proceedings of IEEE 59th Vehicular Technology Conference, 2004. volume 5, May 2004: 2656-2660
- [6] 刘栋,孟祥武,陈俊亮,等. 上下文感知系统中的规则生成与匹配算法[J]. 软件学报, 2009, 20(10): 2655-2666
- [7] 陆建江,等. 语义网原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- [8] 郑笛. 基于上下文感知服务的构件化中间件关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008
- [9] Horrocks I, Sattler U. A tableau decision procedure for SHOIQ [J]. Journal of Automated Reasoning, 2007, 39(3): 249-276
- [10] Yang S J H, Zhang J, Chen I Y L. A JESS-enabled context elicitation system for providing context-aware Web services[J]. Expert Systems whith Applications, 2008, 34(4): 2254-2266
- [11] Parsia B, et al. Cautiously Approaching SWRL [EB/OL]. <http://www.mindswap.org/papers/CautiousSWRL.pdf>, 2005-04-19