

## 地理空间约束的业务流程建模方法\*

朱鑫伟<sup>1</sup>, 朱国宾<sup>1</sup>, Seppe VANDEN BROUCKE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(武汉大学 国际软件学院, 湖北 武汉 430079)

<sup>2</sup>(Research Center for Management Informatics, KU Leuven, Leuven 3000, Belgium)

通讯作者: 朱国宾, E-mail: gbzhu@whu.edu.cn

**摘要:** 明晰了受地理空间约束的业务流程的两个基本概念:地理位置与地理空间信息.首先,提出了地理空间约束思想,分析了地理空间约束的内涵,并在工作流元模型的知识基础上构建了地理空间约束的 UML 语义框架;其次,以形式化的方式提出了地理空间约束的业务流程建模方法(LAWF-net),并描述了 LAWF-net 模型转化为 CPN 可执行模型的规则,探讨了地理空间约束对流程建模的影响;最后,通过案例结合 GIS 系统来扩展 CPN Tools,不仅验证了 LAWF-net 建模方法的可行性,而且实现了地理空间约束的业务流程的可视化.

**关键词:** 地理空间信息;业务流程建模;地理空间约束;LAWF-net

中图法分类号: TP311

中文引用格式: 朱鑫伟,朱国宾,Vanden Broucke S.地理空间约束的业务流程建模方法.软件学报,2015,26(3):584-599.  
http://www.jos.org.cn/1000-9825/4772.htm

英文引用格式: Zhu XW, Zhu GB, Vanden Broucke S. Business process modeling with geospatial constraints. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015, 26(3): 584-599 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/4772.htm

## Business Process Modeling with Geospatial Constraints

ZHU Xin-Wei<sup>1</sup>, ZHU Guo-Bin<sup>1</sup>, Seppe VANDEN BROUCKE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(International School of Software, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

<sup>2</sup>(Research Center for Management Informatics, KU Leuven, Leuven 3000, Belgium)

**Abstract:** This paper introduces a methodology towards enabling business process modeling with geographic and geospatial information. First, a comprehensive framework of geospatial constraints, formulated as a UML-based semantic model, is proposed. Next, a business process modeling language (LAWF-net) is designed to combine traditional control-flow constructs with the aforementioned geospatial constraints. To enable the execution of such models, a mapping to Coloured Petri Nets (CPN) is formulated. The proposed approach is implemented in the form of a CPN tool extension, and a case study is presented to show that the new approach is feasible in practice and can be combined and integrated with existing GIS systems.

**Key words:** geospatial information; business process modeling; geospatial constraint; LAWF-net

业务流程管理以流程为核心、增值为目的,是一种对流程生命周期进行有效分析、持续改进、控制和管理  
的系统性结构化方法,受到了企业界、IT 界和学术界的广泛重视.如何将地理空间信息引入到业务流程管理中,  
是研究的重要课题之一.地理空间信息引入到业务流程管理中并发挥积极作用,这对辅助实现流程自动化、流  
程优化和创造价值的意义不可忽视.

一方面,传统业务流程管理侧重于最大范围内实现业务流程的自动化或者部分自动化,研究和实践的重心  
在于任务,而非资源或者数据方面.地理位置信息在传统的业务流程建模语言中只是任务的一个的静态属性,甚  
至可能被忽略考虑.

\* 基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAH01F02)

收稿时间: 2014-07-01; 修改时间: 2014-09-30; 定稿时间: 2014-11-21

比如在 BPMN 和 YAWL 中,地理位置信息以扩充属性的形式存在.而在 BPMN 中,地理位置信息还可以通过泳道、文本注释或者数据传递的方式在业务流程模型直观表达.在 ARIS 中,地理位置信息只是存在于 EPCs 的组织机构对象的属性中.不管哪种业务流程建模方法,地理位置属性都是以文本信息的静态状态来描述,并没有涉及位置信息的拓扑关系.

另一方面,传统业务流程侧重于管理结构化的流程,因此在银行、保险、税务等流程结构非常清晰的领域应用非常广泛.而如今,随着业务流程管理理念的不断深入、网络技术的普及、传感器技术的快速发展、位置服务的广泛应用,对业务流程的要求更加细化、灵活,尤其在物流、调度、应急管理中对位置敏感的领域.要实现流程柔性,要求地理位置信息在新的业务流程模型中发挥重要作用.

因此,在新的业务流程建模方法中,需要参照地理位置信息在地理信息系统的表达,重新定位地理位置信息的地位、表达方式和作用.本文提出了基于地理信息约束的扩充建模方法.这种方法:

- 1) 基于地理信息的流程建模更加逼近于现实的模型.传统的流程建模并没有否认位置的存在,但是它将地理信息约束对流程建模的影响忽略了,或者说,它假设地理变量是一个恒定的常量.位置信息的引入,使得建模更加精准,模型描述更加逼近现实;
- 2) 基于地理信息约束的建模使得参与者与模型之间互为反馈,参与者通过位置动态参与模型过程,而模型通过捕捉参与者的行为并根据其行为调整目标,使模型目标达到最优;
- 3) 流程的抽象粒度从宏观层面细化到微观,细化的程度取决于地理信息构筑的上下文语境以及地理信息所描述的空间影响范围.

目前,国内外关于地理位置、地理信息对业务流程建模影响方面的研究尚不多见,且大多数停留在理论探讨和个案分析中.De Leoni 等人<sup>[1]</sup>尝试了在流程感知的信息系统 YAWL 中实现流程执行过程中的任务和资源中的地图可视化,但论文没有对位置与建模的关系进行深入的探讨.Decker 等人<sup>[2,3]</sup>深入分析了位置约束对移动工作流的影响,提出了位置对流程行为约束的概念,并以 BNF-语法表示了位置约束规则.而张力等人<sup>[4]</sup>基于 Petri 网研究了位置敏感工作流建模的方法,并以形式化方式对建模正确性进行了验证.回顾前期的研究,文献[2,4]均是基于对地理位置的分析,没有将位置概念提升到地理信息层面,对于复杂业务流程模型显得支持力度不足.文献[4]所提出的 6 种位置关系原语仅从实用角度,若从地理信息的角度看是欠完备的.另外,他们所给出的位置约束条件也仅从精确约束条件出发,未考虑到地理语义场景下常见的模糊约束条件.

本文将地理位置和地理信息纳入到影响流程建模的上下文背景中<sup>[5]</sup>:在第 1 阶段研究中,分析了对地理位置与地理信息两者的内涵和表达,剖析了地理信息对流程建模的约束方式,提出了地理空间约束的 UML 扩展框架,这是一种地理空间约束对传统建模的扩充方法<sup>[6]</sup>;第 2 阶段的研究主要讨论如何进行地理空间约束的业务流程建模,以及怎样验证其正确性和可行性.

## 1 业务流程上下文

### 1.1 流程的上下文框架

自然、科技、经济等客观世界和人的认知是不断变化发展的,这要求组织机构能够根据业务的工作环境变化和需求变化对业务流程进行调整、控制,即具有流程柔性<sup>[7]</sup>.这种柔性需求归因于流程赖以生存的上下文变化,表现为内、外因素的变化.外部因素影响包括自然、科技、经济、法律等从宏观上对流程产生的影响以及流程外与组织机构相关联的其他机构的影响.而内部因素影响特指组织机构内部的变动以及流程本身需求的变化或者异常情况的发生.

上下文是环境本身以及环境各实体所明示或隐含的可用于描述状态(含历史状态)的任何信息,其中,实体既可以是人、地点、天气等物理实体,也可以是时间、网络状况等虚拟形态<sup>[8]</sup>.流程上下文指与流程运行相关的所有因素(即前面谈到的内外因素),比如国际包裹发送的过程中,双边国家海关政策、运输的天气状况、运输手段等均可认为是其上下文.

从工作流运行原理出发,仿照 Rosemann,Recker<sup>[5]</sup>上下文概念模型, Van Der Aalst 和 Dustdar<sup>[9]</sup>概括工作流数

据归为 4 层:实例上下文数据层、 workflow 上下文数据层、组织环境数据层和外部环境数据层(如图 1 所示).

- 1) 实例上下文数据层主要是单个 workflow 实例或者 workflow 案例涉及的 workflow 属性数据,比如物流的 workflow 实例中包含的属性有客户姓名、客户邮寄地址、货物名称、货物所在地等;
- 2) workflow 上下文数据层考虑运行中的所有 workflow 案例或者实例包含的所有统计数据信息,比如运行中的 workflow 案例数量、实例数量、资源负荷情况、区域分配比例等;
- 3) 组织环境数据层主要是组织内外相关的企业环境对 workflow 的运行产生影响的数据,比如新竞争者的规模、个人的工作效率等;
- 4) 外部环境数据层主要是参与者和组织机构以外的间接影响 workflow 的属性和数据,比如某地的天气数据、法律条款等.

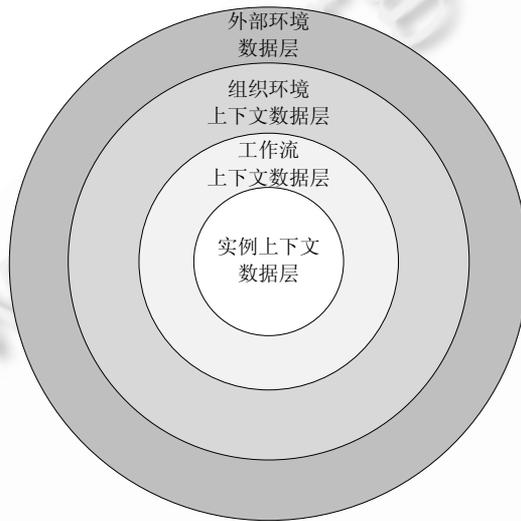


Fig.1 Geospatial information in the levels of context data

图 1 与地理空间信息相关的上下文数据概念图

本文认为:

- 实例上下文数据层和 workflow 数据层是流程上下文的模型中地核层的数据表达,即,地理空间信息静态信息活动的核心层.所谓地理位置静态信息指地理位置数据作为属性参数存在于 workflow 主要元素的属性集中,只是对执行者、任务等所在地的客观说明,不决定流程的走向,比如显示组织机构的地名、任务执行的地点等;
- 组织环境数据层与企业战略和市场情况联系紧密而与物理上的地理空间信息关系疏远;
- 外部环境数据层中的基于地理空间的自然环境数据等对 workflow 产生主动的影响,甚至要求 workflow 就此做出积极变更、调整以便适应新的 workflow 运行的上下文<sup>[10]</sup>.这类与地理空间信息密切相关的的数据称为动态信息,其特点是这些数据作为事件触发,没有具体的规则表明何时会发生;但是一旦发生,便会及时响应,而且改变原有的 workflow 运行规则,使其适应新的规则和上下文.

## 1.2 地理位置与地理空间信息

通常,地理位置刻画的是位于特定空间框架内的目标绝对坐标或相对关系,地理空间信息表达的是目标自身或其与其他目标之间相互作用而传达的语义信息.地理空间信息的基本组成要素是度量关系、顺序关系以及拓扑关系<sup>[11]</sup>.由此复合构成更为复杂的空间关系(如两点最短路径(线)、泰森多边形等).

对于单体空间目标而言,主要表征的是几何信息.具体讲:点的几何信息即为位置本身,线的几何信息为“长

度”,而面的几何信息则为“周长”、“面积”.在不同的粒度空间,点、线、面可以互为转换.比如:在大比例尺情况下(细粒度)的线,在小比例尺情况下(粗粒度)可以以点表达;而细粒度下的面,既可能抽象为粗粒度下的线,也可能抽象为点.

对于两个以上的空间目标,就可以刻画它们之间的空间拓扑关系,用以表述目标之间的不精确的相对关系,具体表现为描述基本的空间目标点、线、面之间的邻接、关联、包含等关系.例如,A位于B的左边、C位于D的内部等等.最常见的拓扑关系描述方法有四交叉模型、九交叉模型、基于Voronoi图的V9I模型、RCC模型、空间代数模型等<sup>[12-14]</sup>.

对于更为复杂的复合空间目标之间的关系,则需要借助于空间运算处理,才能发现其中隐含的地理信息.如两个点之间的最短路径,需要两点之间的联通性作为条件,通过计算两点之间的最小能量消耗(如时间最短、或长度最短等)实现.同样,粒度作为一种变量参数,也会影响到空间信息的输出.

由此推断,地理信息又可以分为静态信息和动态信息两种情形:

- 静态信息指的是地理信息不随时间、粒度的变化而恒定信息,如不变点(如某机场对外公布的经纬度)所传达的信息恒定为静态信息;
- 而动态信息则是随着时间、粒度的变化而变化的信息,比如:物流车在运输途中,可以根据路况(两点之间的通达性)随时产生新的路径信息;不同粒度空间下的拓扑信息会发生变化等.

### 1.3 业务流程建模中的基本地理空间关系

迄今为止,有两大主要国际标准组织致力于包含地理几何和地理图形关系等地理空间信息标准的制定:开放地理空间联盟(OGC)和国际标准化组织(ISO)技术委员会 211(TC211).OGC自1994年成立以来,成为拥有超过400家企业、政府部门、研究组织和大学参与的国际性联营企业,致力于提供地理信息行业软件和数据及服务的工作.不但包括ESRI,GOOGLE,Oracle等企业作为成员,而且与W3C,(ISO/TC211),IEEE等是合作伙伴关系,可见,其制定的标准具有权威性.

遵从OGC主题8和ISO19107中对地理空间关系的描述,总结出流程建模中受地理空间约束的普遍性的度量关系(见表1)和拓扑关系(见表2).并且,当表2中的拓扑关系不足以表达实际中的应用情况时,拓扑关系能够根据实际的需求进一步进行扩展.

**Table 1** Measurement relationships used in process modeling

表 1 流程建模中的度量关系

名字	描述	涉及的特征
getCoordination	返回一个点的坐标	点
getLength	返回一条线的长度	线
getArea	返回一个面区域的面积	面
getPerimeter	返回一个面的周长	面

**Table 2** Topological relationships used in process modeling

表 2 流程建模中的拓扑关系

名字	描述	涉及的特征
Within	如果两位置的关系是空间包含,返回真值	(点、面);(线、面);(点、线)
Equals	如果两位置特征空间关系是空间相同,返回真值	(点、点);(线、线);(面、面)
Disjoint	如果两位置特征空间关系是空间相离,返回真值	(点、点);(线、线);(面、面);(点、面);(线、面)
Intersects	如果两位置特征空间关系是空间相交,返回真值	(面、面)——重叠部分在内部
Touches	如果两位置特征空间关系是空间接触,返回真值	(线、面);(面、面)
Crosses	如果两位置特征空间关系是空间交叉,返回真值	(线、线);(线、面)
Overlaps	如果两位置特征空间关系是空间部分重叠,返回真值	(面、面)
Contains	如果特征 A 空间包含特征 B,返回真值	(面、面)——岛的情形

## 2 地理空间约束思想

### 2.1 地理空间约束

地理空间约束是一个声明,声明 workflows 场景或者执行的实例中的一个或者多个活动的地理信息.在某种程度上,地理空间约束是一种作用于活动的约束机制,通过利用活动的位置属性或者活动的位置与位置之间的关系约束活动的行为.

存在两种对流程活动的约束——静态约束和动态约束<sup>[2]</sup>:

- 静态约束是在 workflow 设计阶段预先定义好的约束.这意味着:
  - 1) 这些约束是作用在单个活动上;
  - 2) 这些约束迫使所有的流程实例根据 workflow 的设计来执行.
- 动态约束是在流程的运行阶段产生,并仅对流程实例有效.如果动态约束具体是一种受到地理位置的约束,则意味着存在受到至少一个动态位置影响的.

受到静态约束或者动态约束的活动具备静态行为和动态行为的特征.就现场维修的流程为例,维修活动受到地理位置的静态约束,因为维修请求要求一旦确定,其维修的地理位置是固定不变;指派工程师活动受到地理位置的动态约束,因为工程师的位置是随时间而变动,且受到维修请求的位置与工程师位置的关系影响,所以指派谁维修或者谁被指派是不固定的.具体而言,动态约束又可划分为内部动态约束和外部动态约束两种:

- 内部动态约束是在 workflow 设计阶段的工作流模型中定义好的规则,workflow 实例执行过程中仅捕获 workflow 系统中定义好的活动的地理位置,按照规定好的规则,指导活动的执行;
- 外部动态约束是没有在 workflow 系统中定义的,而是由操作员或者管理员在流程运行阶段输入或者定义的地理位置或者规则.

### 2.2 地理空间约束的行为

地理空间约束的行为定义了地理空间约束作用于一个活动或者多个活动的规则.在 workflow 元模型中,在流程的一个实例被触发前,不仅活动的固有属性是定义好的,而且活动与活动的关系也是设置好的.然而在流程的运行阶段,活动之间的关系会动态发生变化.这种改变如果与地理空间因素无关,通常在工作流元模型的设计范畴,是可以处理的.但是假如没有考虑地理空间信息对流程的影响,则活动的执行规则将超出 workflow 的设计范畴,活动的行为也与业务流程模型设定的情景存在差异性.因此,讨论地理空间约束如何控制活动的行为是必要的.

地理空间约束聚焦于活动的地理空间属性.地理空间约束对活动的影响范围包括一个活动或者几个活动之间.对于一个活动的情景,活动限定在初始化的地理位置执行.对于多个活动的情景,地理空间约束行为限制活动与活动的发生或流转的地理位置关系.

### 2.3 地理空间约束的 UML 语义框架

由于 UML 吸取了面向对象技术领域其他方法的长处,提供了标准的面向对象的模型元素和表示,并具备以下优点:

- 1) 统一的标准.UML 是 OMG 和 ISO 认可的工业标准,获得了 IBM, SUN 等众多软件巨头的支持;
- 2) 专注于建模.UML 并不指定适用于任何特定的应用领域、具体平台、实现语言或者实现方法,只专注于建立模型;
- 3) 只是一种图形表示法.本身不包含任何方法论的部分;
- 4) 良好的扩展性.在 UML 框架的基础上,允许用户定义自己的 UML Profile,确定一个区域、一个行业的特定标准.

因此,可以通过对地理位置、地理空间信息和地理空间关系的剖析、地理空间约束概念的理解和地理空间约束行为的研究,应用 UML 的扩展机制对业务流程模型元模型的地理空间约束进行扩展<sup>[6]</sup>(如图 2 所示).

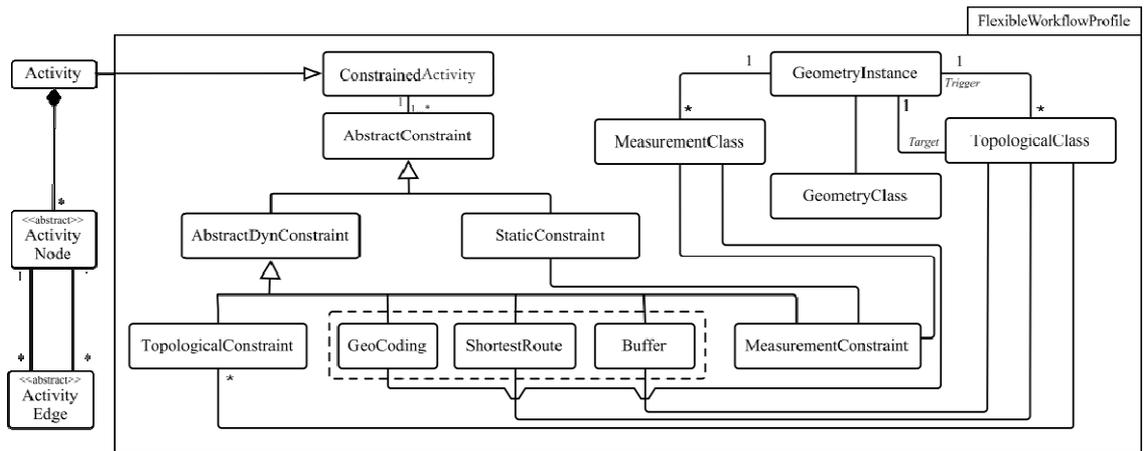


Fig.2 Extended geospatial-constraint meta-model of UML activity diagrams<sup>[6]</sup>

图 2 地理空间约束的 UML 扩展框架<sup>[6]</sup>

### 3 地理空间约束的业务流程建模方法(LAWF-net)

Petri 网是建模和分析流程的工具:一方面,Petri 网作为设计语言描述复杂的工作流;另一方面,Petri 网理论为验证工作流的正确性提供了强大的分析技术支持.因此,地理空间约束的业务流程建模方法是基于 Petri 网的基础上开展的.

虽然传统的业务流程管理不否认地理位置因素的存在,但认为地理位置信息是恒定的信息,对于流程管理不产生重要影响,不能辅助实现流程自动化、流程优化、创造价值.地理位置信息在传统的业务流程建模语言中只是任务的一个的静态属性,甚至可能被忽略考虑,因此在新的业务流程建模方法中,本节参照地理位置信息在地理信息系统的表达,提出了基于地理信息约束的扩充建模方法——LAWF-net,并进行了形式化表达.

#### 3.1 LAWF-net模型的定义

地理空间信息作为地理空间信息感知流程的基本因子,以不同的角色贯穿于业务流程的上下文框架的每一层,发挥着不可替代的作用.地理空间信息在其框架中的基本表现形式概括为地理特征,地理特征主要包括自然地理特征和人文地理特征:自然地理特征主要有位置、地形特征、气候特征、水文特征、土壤和生物;人文地理特征主要有农业、工业、人口、交通、经济、周边城市发展情况和国家政策等.

定义 1(特征  $F_L$ ,特征类型  $FT_L$ ).  $F_L$  是关于地理空间信息特征的有穷集合, $FT_L$  是关于地理空间信息特征类型的有穷集合:

$$F_L = \{f_1, f_2, \dots, f_{|F_L|}\} \tag{1}$$

$$FT_L = \{ft_1, ft_2, \dots, ft_{|FT_L|}\} \tag{2}$$

定义 2.  $Type_L$  是地理空间信息类型函数:

$$Type_L: F_L \rightarrow FT_L \tag{3}$$

且满足:

$$\forall f \in F_L: [Type_L(f) \in FT_L] \tag{4}$$

定义 3(地理空间约束  $C_L$ ).  $C_L$  是地理空间约束的集合,是关于地理空间变迁  $T_L$  的函数返回值的集合.该函数是每一个变迁  $t \in T_L$  映射到一个布尔表达式  $CExpr$ ,这个表达式计算的结果返回值为布尔值,记作  $Cexpr^*$ .该值决定了变迁是否能触发:

$$C_L: T_L \rightarrow \{CExpr\} \tag{5}$$

且满足:

$$\forall c \in C_L: [\exists!(x,y) \in CF_L: [x=c \wedge y \in T]] \tag{6}$$

该表达式表明,每一个地理空间约束仅有一个连接从地理空间约束  $c$  到变迁  $t$  的连接弧。

定义 4.  $C'_L$  是变迁  $t$  上的所有的地理空间约束的集合:

$$C'_L = \{c \mid c \in C_L \wedge (c,t) \in CF_L\} \tag{7}$$

满足约束到输出变迁的弧  $(c,t)$  位于地理空间约束弧集中  $(c,t) \in CF$ , 且其约束属于地理空间约束集  $\in C_L$ . 其中, 符合条件的所有约束都终止于变迁  $t$ . 这意味着: 如果有  $T = \{t_1, t_2\}$ , 则存在可能分别构建两个基于变迁  $t_1, t_2$  的地理空间约束集合  $C'_L, C''_L$ .

定义 5(地理空间约束的业务流程模型 LAWF-net). 地理空间信息感知的工作流是 6 元组  $(WF-net, F_L, T_L, FT_L, C_L, CF_L)$ , 其中:

- $WF-net=(P,T,F)$  是工作流中库所、变迁和弧的定义;
- $F_L$  是地理特征的集合;
- $FT_L$  是地理特征类型的集合;
- $T_L$  是地理空间依赖的变迁的集合, 且满足  $T_L \in T$ ;
- $C_L$  是地理空间约束的集合, 通常是一组地理空间约束表达式的集合;
- $CF_L$  是一组地理空间约束弧, 是连接地理空间依赖的变迁到地理空间约束或者连接地理空间约束到变迁的有穷弧的集合, 且满足:  $CF_L \subseteq (T_L \times C_L) \cup (C_L \times T)$ .

采用基于 LAWF-net 模型进行建模, 其基本形式如图 3 所示. 其中, 库所和变迁与 Petri 网建模方法相同, 对于地理依赖型变迁, 在变迁方形的左上角添加  标志以示区别, 并将该变迁依赖的主要地理特征类型与变迁名称一起标注在方形中. 地理空间约束用灰色的长方体表示, 地理空间约束弧以虚线及其带箭头的虚线表示. 从图中可以看出: 地理空间约束不仅发生的地理依赖型变迁之间, 同时, 地理空间约束对一般变迁也发挥作用. 地理空间约束在方形中的描述, 在基于流程元模型的地理空间约束的 UML 语义框架指导下, 遵照表 1 和表 2 的规则进行.

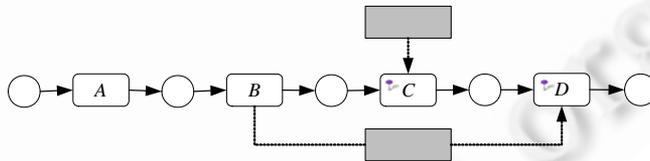


Fig.3 An example of a LAWF-net model

图 3 LAWF-net 模型的图形化示例

### 3.2 LAWF-net模型的执行语义

定义 6(地理标识 LM). LM 是位置标识函数, 返回地理空间依赖的变迁所附着的地理特征:

$$LM: T_L \rightarrow F_L \tag{8}$$

且满足:

$$\forall T \in T_L: [Type_L(LM(t)) = Type_L(t) \vee LM(t) = \emptyset] \tag{9}$$

地理空间标识状态与其变迁本身默认的特征类型是同一种类型, 并且允许地理空间依赖的变迁中地理特征为空.

初始状态下, 每一个地理空间依赖的变迁并不附着任何地理特征, 记作:  $\forall T \in T_L: [LM(t) = \emptyset]$ . 大多数地理空间约束能够直接用地理空间位置关系的方式(返回布尔值)进行表达. 一般情况下, 对地理空间约束  $c \in C_L$  没有严格的定义. 由于之前给每一个地理空间依赖的变迁定义了一种特征类型, 以此对附着在变迁上的地理特征进行分类划分. 记做:  $Type_L(LM(t)) = Type_L(t)$ . 例如: 比如活动  $Task\_B$  关联的地理特征是所有的  $Locations$ , 而地理特征类型是点类型(point). 具体为: 如果  $t = \{Task\_B\}$ ,  $Type_L(Task\_B) = \{Point\}$ ,  $LM(B) = \{Location\_1\}$ , 则:

$$Type_L(Location\_1)=Type_L(Task\_B).$$

$Location\_1$  的类型应当是点类型(point).其涵义之一是:即便地理空间依赖的变迁没有约束限制,其特征类型也存在;另一层涵义是:地理空间依赖的变迁中,关于地理特征的选择应当与其变迁本身许可的特征类型保持一致.

**定义 7(LAWF-net 的执行语义).** LAWF-net 中变迁的触发要满足使能规则和点火规则.

### 1. 使能规则

LAWF-net 中一个使能的变迁  $t$  在标识  $(M, LM)$  下是使能的(可以触发),当且仅当:

- 1) 它的输入库所  $p \in P$  中的每个都至少包含一个 token;
- 2) 与变迁关联的所有约束都得到满足:

$$\forall p \in \bullet t: [M(p) > 0] \quad (10)$$

$$\forall t \in T \setminus T_L \rightarrow \forall c \in C_L: [c^* = \text{true}] \quad (11)$$

$$\forall t \in T_L \rightarrow \exists f \in F_L: [\forall c \in C_L: [c^* = \text{true}]] \quad (12)$$

这些约束根据变迁的类型不同,评判的准则也存在一定差异.具体而言:

- 1) 对于一般变迁,又称为非地理空间依赖的变迁  $t \in T \setminus T_L$ , 满足地理空间约束条件即可;
- 2) 对于地理空间依赖的变迁  $\forall t \in T_L$ , 满足地理空间依赖的变迁至少有一个地理特征与变迁本身要求的特征类型一致,且地理空间约束条件为真值.

值得一提的是,一个变迁的使能必然要求变迁的约束条件为真.其基本要求是,地理标识  $LM$  能够反馈当前与地理空间依赖变迁所依赖的地理特征.然后,变迁的地理标识  $LM$  通常反映的是前一次活动执行时关联的地理特征;如果流程没有执行,其地理标识为空,或者处于没有预置的情境下.

为了解决这个问题,采取的策略是对使能的候选地理特征  $F_i^{possible}$  进行地理空间约束的条件判断,并将结果作为候选的地理标识  $LM^{can}$  保存下来.即:

$$F_i^{possible} = \{f \in F_L : [Type(f) = Type(t) \wedge \forall c \in C_L : [c^* = \text{true}]]\} \quad (13)$$

$$\forall t' \in T_L \rightarrow \left[ LM^{can}(t') = \begin{cases} f, & \text{if } t' = t \\ LM(t'), & \text{otherwise} \end{cases} \right] \quad (14)$$

### 2. 点火规则

LAWF-net 中,一个使能的变迁  $t$  在标识  $(M, LM)$  下可以点火,一方面需要满足输入库所令牌的要求,另一方面要满足地理空间约束的条件.如果变迁  $t$  点火,那么:

- 1)  $t$  从它的输入库所  $p$  中消耗一个令牌,并为  $t$  的每个输出库所  $p$  产生一个令牌.这意味着当点火  $t$  时,  $M$  标识从一种状态改变到另一种状态:  $M_1 \xrightarrow{t} M_2$ :

$$\forall p \in P: \left[ \begin{cases} M_2(p) = M_1(p), & \text{if } p \notin \bullet t \cup t \bullet \\ M_2(p) = M_1(p) - 1, & \text{if } p \in \bullet t \\ M_2(p) = M_1(p) + 1, & \text{if } p \in t \bullet \end{cases} \right] \quad (15)$$

- 2) 一个位置依赖的变迁使得  $LM$  地理空间标识从一种状态改变到另一种状态:  $LM_1 \xrightarrow{t} LM_2$ .

因此:

$$\forall t' \in T_L \rightarrow \left[ LM_2(t') = \begin{cases} f^{selected}, & \text{if } t' = t \\ LM_1(t'), & \text{otherwise} \end{cases} \right] \quad (16)$$

其中,  $f^{selected} \in F_i^{possible}$ . 点火后,从候选的地理标识  $F_i^{possible}$  中选择的地理特征  $f^{selected}$  成为当前的地理标识.

### 3.3 LAWF-net到CPN的转换

为了验证和仿真文中提出的 LAWF-net 建模方法,本节将 LAWF-net 建模方法映射 Coloured Petri net(CPN)建模方法:一方面,这是因为之前提出的地理空间感知的工作流的执行语义简单易懂,便于基于地理空间约束建

模,但是却无法进行仿真验证;另一方面,LAWF-net 和 CPN 都是基于 Petri 网,遵循严格的形式化定义,具有互通性;而且,转换为 CPN 建模具有诸多的优势.

LAWF-net 到 CPN 的映射遵循以下规则:

1. LAWF-net 的地理特征的集合对应于 CPN 中新增的颜色集,且是地理特征的最高抽象颜色集:

$$\Sigma = \{U, F^L\} \quad (17)$$

其中,  $U = \{Unit\}$  是 CPN 定义的颜色集集合,  $F^L$  作为地理特征的集合而认为是地理特征的最高抽象颜色集.

2. LAWF-net 中的每一个变迁  $t \in T^L$  和库所  $p \in P^L$  对应于 CPN 中的变迁  $t \in T$  和库所  $p \in P$ , 其中,

$$\forall p \in P^L: [p \in P] \quad (18)$$

$$C(p) = U, I(p) = \begin{cases} \{unit\}, & \text{if } \bullet p = \emptyset \\ \emptyset, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

$$\forall t \in T^L: [t \in T] \quad (20)$$

3. 对于 LAWF-net 中每一个地理空间依赖变迁  $t \in T_L$ , 在 CPN 模型中增加一个地理空间信息输出库所:

$$C(p_L^f) = F^L \quad (21)$$

$$I(p_L^f) = \{f \in F^L \mid Type(f) = ft\} \quad (22)$$

对于 LAWF-net 中每一个特征类型, 在 CPN 模型中增加一个地理空间信息输入库所  $p_L^t$ :

$$\forall t \in T_L: [p_L^t \in P] \quad (23)$$

$$C(p_L^t) = F^L \quad (24)$$

$$I(p_L^t) = \emptyset \quad (25)$$

4. 对于 LAWF-net 控制流中的弧映射为 CPN 模型中的弧:

$$\forall (x, y) \in F^L: [a_{(x, y)} \in A] \quad (26)$$

$$N(a_{(x, y)}) = (x, y) \quad (27)$$

$$E(a_{(x, y)}) = unit \quad (28)$$

5. 在 CPN 中添加约束变量和重写变量来绑定地理空间信息与地理空间依赖变迁, 并分别重写之前绑定的变迁:  $v_L \in V$ , 其中,  $C(v_L) = F^L$ ;  $v_o \in V$ , 其中,  $C(v_o) = F^L$ .

6. 对于每一个地理空间依赖变迁  $t \in T_L$ , 在 CPN 中添加 4 条弧, 命名为入弧  $a_t^{input}$ 、返回弧  $a_t^{return}$ 、出弧  $a_t^{output}$  和  $a_t^{override}$  弧: 入弧  $a_t^{input}$  连接地理空间信息输入库所与变迁  $t$ , 传递地理特征; 返回弧  $a_t^{return}$  连接变迁与地理空间信息输入库所, 传递地理特征; 出弧  $a_t^{output}$  连接变迁与地理空间信息输出库所;  $a_t^{override}$  弧连接地理空间信息输出库所与变迁:

$$\forall t \in T^L: [a_t^{input}, a_t^{return}, a_t^{output}, a_t^{override}],$$

其中,

$$N(a_t^{input}) = (p_L^t, t), N(a_t^{return}) = (t, p_L^t), N(a_t^{output}) = (t, p_L^f), N(a_t^{override}) = (p_L^f, t) \quad (29)$$

$$E(a_t^{input}) = E(a_t^{return}) = E(a_t^{output}) = v_L \quad (30)$$

$$E(a_t^{override}) = \begin{cases} \emptyset, & \text{if } M(p_L^t) = \emptyset \\ M(p_L^t), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (31)$$

7. 对于每一个地理空间依赖变迁  $t \in T_L$ , 将位于其上的所有地理空间约束在 CPN 中用警卫函数来表达:

$$\forall t \in T^L: G(t) = \bigwedge_{c \in C_L^t} (c) \quad (32)$$

8. 对于 LAWF-net 中的地理空间约束、在 CPN 中涉及的输入变迁, 通过定义一个变量并赋予相关联的两条弧上, 将传递地理特征从地理空间信息输出库所到受约束的输出变迁, 点火后, 将地理特征返回地理空间信息输出库所:

$$\forall t \in T^L: [c \in C_L^t: [\forall (x, y) \in \{(x, y) \in CF_L \mid x \in T_L \wedge y = c\}: [v_L^{(x, y)} \in V, a_i^{(x, y)}, a_o^{(x, y)} \in A]]].$$

其中,

$$C(v_L^{(x,y)}) = F^L \tag{33}$$

$$N(a_i^{(x,y)}) = (p_L^x, t) \tag{34}$$

$$N(a_o^{(x,y)}) = (t, p_L^x) \tag{35}$$

根据 LAWf-net 到 CPN 的映射规则,图 3 所示的 LAWf-net 模型转化为 CPN 模型的一种示例(如图 4 所示).其中:填充为灰色的地理空间信息输入库所或者地理空间信息输出库所, $v_1$  为入弧、返回弧、出弧的变量; $v_0$  为重写弧的变量;与入弧和返回弧相连的是地理空间信息输入库所;与出弧和重写弧相连的是地理空间信息输出库所; $G(B),G(C),G(D)$ 是变迁的警卫函数.值得一提的是:图 3 所示的 LAWf-net 模型的具体含义不同,转化为的 CPN 模型也不同,图 4 所示的模型是其中的一种情况.

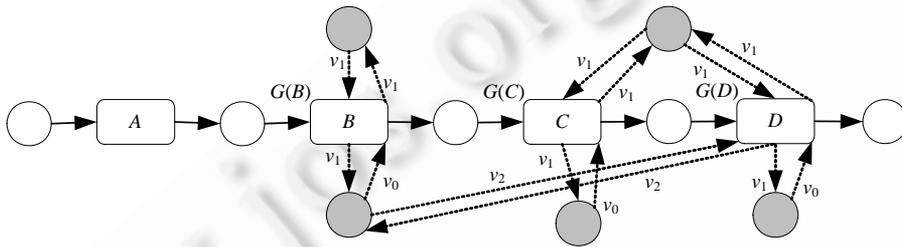


Fig.4. LAWf-Net of Fig.3 converted to a CPN model

图 4 图 3 中 LAWf-net 模型转化为 CPN 模型

### 4 LAWf-net 的实现与系统集成

本文通过扩展 CPN Tools,以维修流程为案例实现了 LAWf-net 建模方法.并且通过集成 GIS 系统和 CPN Tools,完成了地理空间约束的业务流程的正确性验证,开拓性地实现了地理空间约束的业务流程的可视化.

#### 4.1 场景描述

维修公司客户中心接到客户的故障报修请求(RCC),并开始着手处理故障报修请求(ACC),通常是负责相应维修区域的客服中心接听电话.如果通过客服中心与客户的电话交流中,能确诊问题并解(RAS),待一段时间,客服中心进行服务回访(FUA),整个流程结束.如果电话内不能解决,则将故障请求级别标示为现场检查,执行分派现场检查(DIS)任务,并安排缓冲区 50 公里内的组员达到 2 人以上的检查组前往开展现场检查(OSI).如果现场检查没有问题,则等待客服中心进行服务回访(FUA),整个流程结束.如果现场修理工作的执行需要调动维修工程队前往作业,则安排维修队(CRT),且对维修队的要求是客服中心 50 公里以内且空闲的维修队.空闲的维修队前往进行现场修理(OSW),如果维修完成(RRT),则等待客服中心进行服务回访(FUA),整个流程结束;如果现场修理过程中发现需要零件返厂维修(SFR),则寻找最近的维修点将零件送往维修,再前往进行现场修理(OSW),一直到维修完成(RRT),等待客服中心进行服务回访(FUA),整个流程结束.对于所有的服务回访(FUA),要求不同于流程开始时的客户中心进行回访.

分析得知,整个流程中的地理位置关系包括 6 个,即:客户归属地的客服中心处理故障请求、缓冲区 50km 内的检查组进行现场检查、客服中心 50KM 内的空闲的维修队进行现场修理、零件返厂维修是最近的维修点、不同的维修队进行维修完成后的检查、不同的客服中心进行回访.

图 5 是用 workflow 模型对整个流程进行了描述,但并不包含任何地理空间信息,看不到地理空间信息对该维修流程的影响.图 6 是维修流程的 LAWf-net 模型,具体描述了以上提到的活动与活动之间受到的 6 种地理空间约束.图 7 将维修流程的 LAWf-net 模型转换为可执行的 CPN 模型.

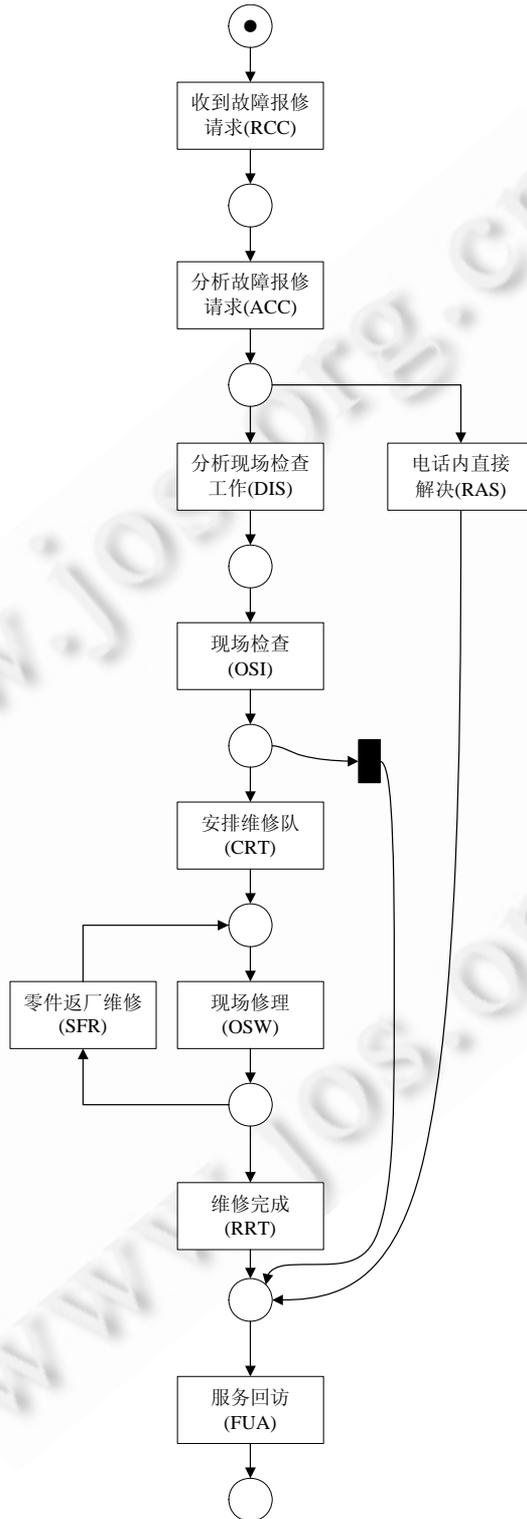


Fig.5 WF-Net model of repair process

图 5 维修流程的工作流模型

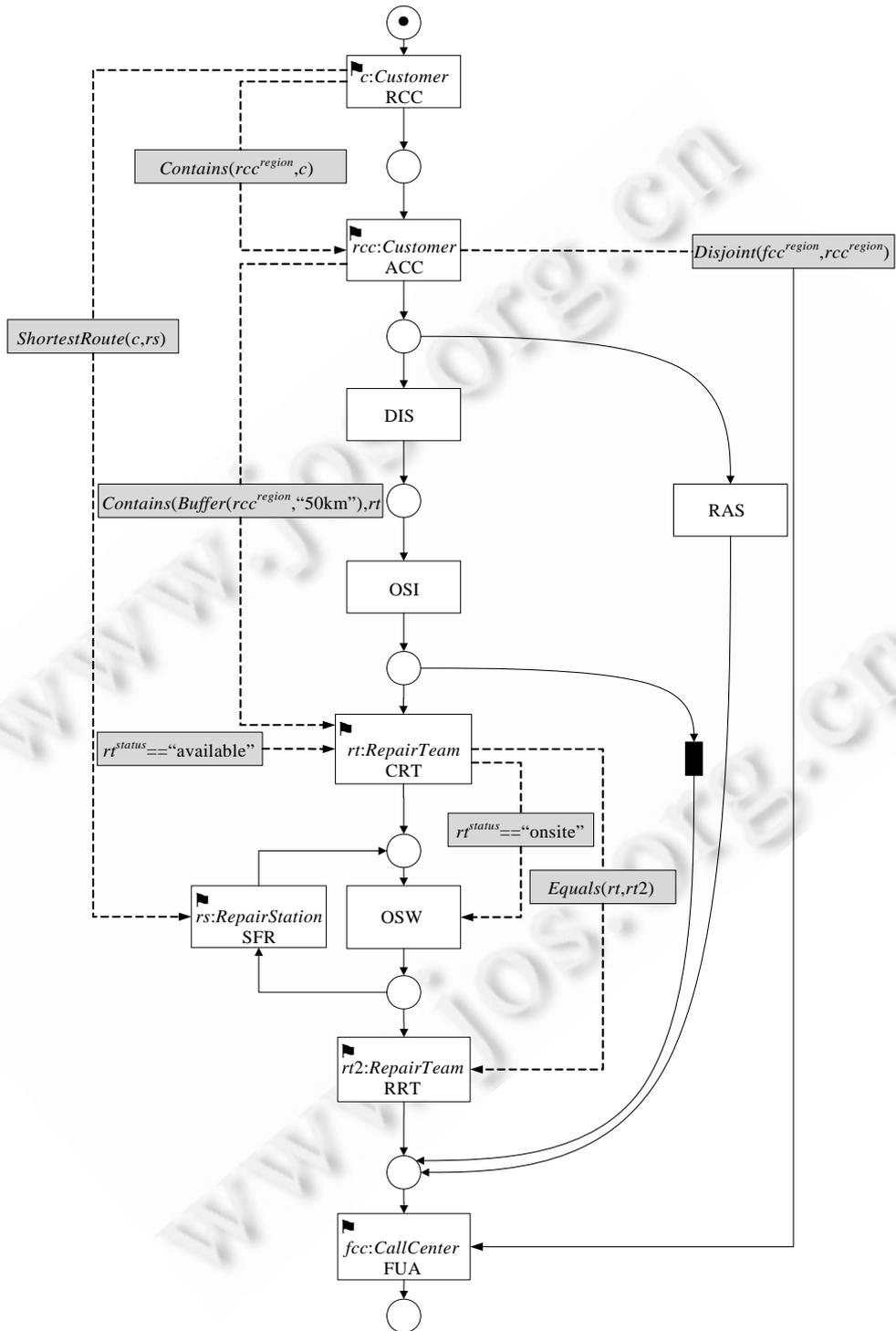


Fig.6 LAWF-Net model of repair process

图 6 维修流程的 LAWF-net 模型

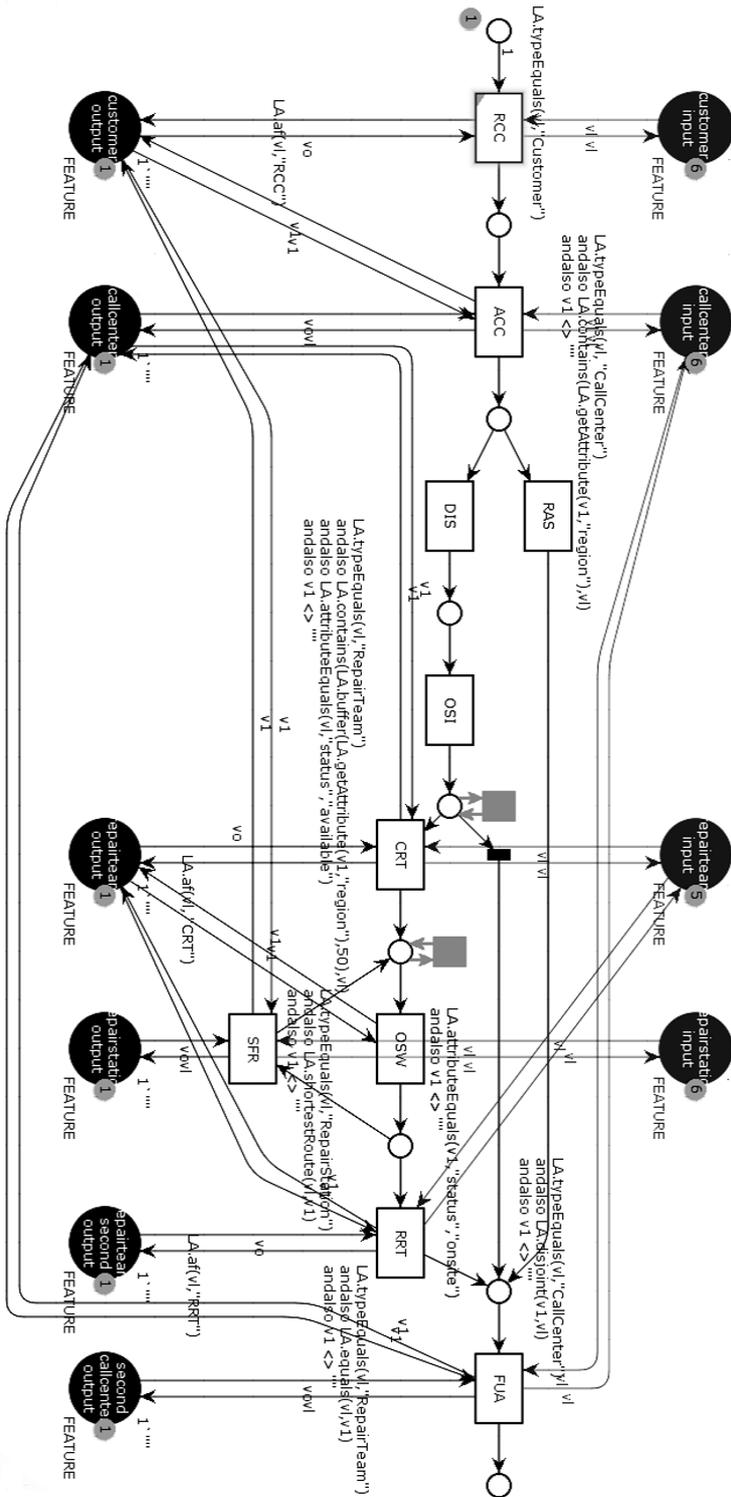


Fig.7 LAWF-Net model of Fig.6 converted to a CPN model

图 7 维修流程的 LAWF-net 模型转化为 CPN 模型

### 4.2 遇到的问题及其解决方案

如何在 CPN Tools 中实现本文提出的地理空间约束思想,是实现 LAWF-net 建模方法的关键.但是,应用 CPN Tools 提供的工具和方法实现地理空间约束思想存在一定的问题,因为 CPN Tools 有其自身的局限性:

- 1) CPN Tools 中,函数描述方法有限,其定义的函数变量仅接受 Boolean,Integer 和 String 类型,不能满足地理空间约束思想关于地理空间信息表达的复杂性和多样性的需求,比如关于地理坐标的表达等;
- 2) CPN Tools 支持的语法有限,利用其提供的标准 ML 语言表达地理空间关系,不仅花费过多的时间和精力,而且构建的模型可能及其庞大.

针对以上的问题,本文利用 CPN Tools 提供的 RPC(远程过程调用)功能对 CPN Tools 进行扩展.选择这个方法而不采用标准 ML 语言的原因在于:

- 1) 采用 java 作为扩展的语言,与标准 ML 语言相比更易于理解和扩展;
- 2) 在一定程度上能够克服模型过于庞大和复杂的弊端;
- 3) 有利于集成现有的 GIS 系统与 CPN Tools 来验证 LAWF-net 建模方法,实现地理空间约束思想对流程的约束和驱动效应,呈现地理空间约束对流程的感知;并且反馈到地图上,通过 GIS 系统调用地图并反馈活动在流程执行过程中的即时运行状态.

因此,为了在 CPN Tools 中实现地理空间约束思想,实验中结合应用 GeoTools Java 包进行了原型设计. GeoTools 是一款基于 Java 的开源 GIS 工具集,允许用户对地理数据进行基本操作,提供地理空间信息的函数与方法.因此,GeoTools 工具包支持图 2 中涉及的绝大多数地理空间关系的表达,并且遵从 OGC 对地理空间信息标准的制定.

图 8 是维修流程的在 CPN Tools 中运行的过程截图.其具体的操作过程包括 3 个部分:

- 1) 在 ArcGIS 中绘制维修流程的地图,并以 Shapefile 文件输出点文件、线文件和面文件.这是实现 CPN Tools 中流程执行的地图可视化的基础;
- 2) 通过 Eclipse 定义和构建具体的约束函数,包括创建包 simulator.extensions.location,创建 3 个扩展类:LocationAwareExtention.java,LocationConstraint.java 和 LogWindow.java.最后,从 Eclipse 中导出到 CPN 的扩展文件夹中;
- 3) 在 CPN Tools 构建基于地理空间约束思想的维修流程,并实现可视化.

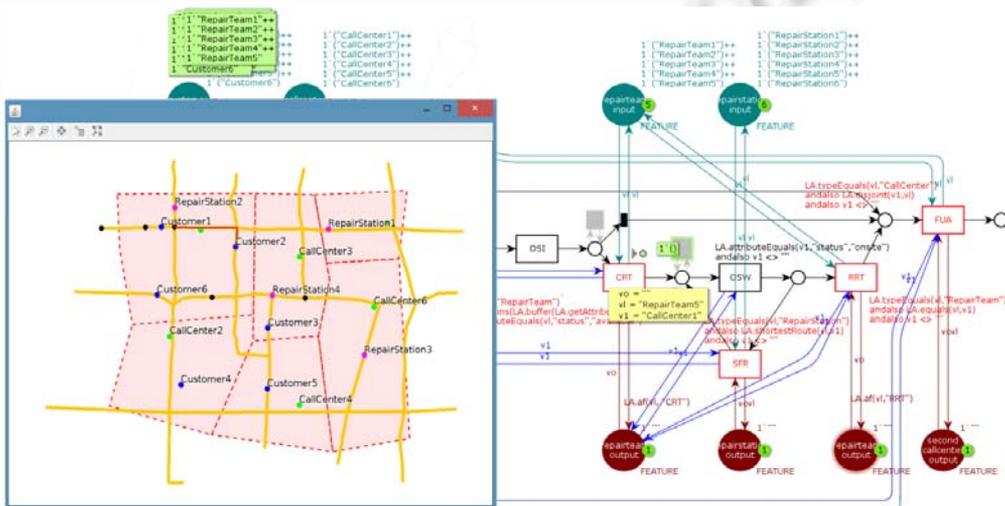


Fig.8 Screen capture showing the CPN model running in tandem with a GIS system

图 8 维修流程的运行过程截图

实验结果表明:运行无死锁,具备安全性和活性.在维修流程的运行过程中,地图上能够容易地分辨维修队

的地理位置、所在的维修区域与顾客维修点的地理位置等等,便于直观了解维修队地理位置与顾客维修点地理位置的地理空间关系.值得一提的是,黑点代表的维修队的地理位置是不固定的,随着时间而不同、随着任务的分配而不同.

## 5 结束语

传统的流程建模中没有考虑地理位置以及相应的地理空间信息的影响.本文研究了地理空间约束对传统流程建模的扩充,使得业务流程模型更加逼近现实的模型,并增强了参与者与模型之间的互动反馈.更为重要的是,使得流程的抽象粒度更为细化,因此,对于提升流程模型的可靠性、增强流程模型的柔性具有重要的意义.

本文在分析传统建模内容的基础上,讨论了作为上下文信息的地理信息在建模中的应用.为了更好地把握地理空间信息在流程建模中的作用,本文阐述了地理位置与地理信息的表达方式、区别与联系;指出地理位置是地理信息获取的先决条件,地理空间信息则是基于地理位置的度量关系、顺序关系、拓扑关系的复杂信息表达;总结了流程建模中的度量关系和拓扑关系;提出了地理空间约束的 UML 语义框架,用于指导地理空间约束的业务流程建模.论文重点探讨了地理信息约束对业务流程元模型扩充的影响,以形式化的方式提出了 LAW-net 建模方法;将 LAW-net 模型映射到 CPN 模型进行验证.最后,通过案例结合 GIS 系统来扩展 CPN Tools,不仅验证了 LAW-net 建模方法的可行性,而且实现了地理空间约束的业务流程的可视化.

本文的部分工作仍需进一步完善:由于篇幅的原因,本文没有探讨地理空间约束对工作流模式的影响,但本文所提出的地理空间信息对传统流程建模的扩充思路具有重要的意义.本文的后续工作还包括:

- 1) 从面向过程的角度进一步完善地理空间信息对业务流程运行的影响和机制;
- 2) 完成基于地理信息扩充的业务流程模型的一致性验证、死锁与异常分析,性能检验等;

## References:

- [1] De Leoni M, Adams M, Van Der Aalst WMP, Ter Hofstede AHM. Visual support for work assignment in process-aware information systems: Framework formalisation and implementation. *Decision Support Systems*, 2012,54(1):341–361. [doi: 10.1016/j.dss.2012.05.042]
- [2] Decker M. Modelling location-aware access control constraints for mobile workflows with UML activity diagrams. In: *Proc. of the Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies*. Sliema: IEEE, 2009. 263–268. [doi: 10.1109/UBICOMM.2009.30]
- [3] Decker M, Stürzel P, Klink S, Oberweis A. Location constraints for mobile workflows. In: *Proc. of the Techniques and Applications for Mobile Commerce*. Amsterdam: IOS Press, 2009. 93–103.
- [4] Zhang L, Zhao J, Jia WH, Liu YB. Location-Aware workflow modeling and soundness verification method based on Petri net. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012,18(8):1747–1756 (in Chinese with English abstract).
- [5] Rosemann M, Recker J, Flender C. Contextualization of business processes. *Int'l Journal of Business Process Integration and Management*, 2008,3(1):47–60.
- [6] Zhu GB, Zhu XW. A study on geospatial constrained process modeling using UML activity diagrams. In: *Proc. of the Asia-Pacific Business Process Management Conf*. Brisbane: Springer-Verlag, 2014. [doi: 10.1007/978-3-319-08222-6\_5]
- [7] Zhu XW, Recker J, Zhu GB. Exploring location-dependencies in process modeling. *Business Process Management Journal*, 2014, 20(6):794–815. [doi: 10.1108/BPMJ-06-2013-0066]
- [8] Wan N. Research on some key techniques of context-aware computing [Ph.D. Thesis]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunication, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [9] Van Der Aalst WM, Dustdar S. Process mining put into context. *Internet Computing, IEEE*, 2012,16(1):82–86. [doi: 10.1109/MIC.2012.12]
- [10] Zhu XW, Zhu GB, Guan P. Exploring location-aware process management. In: *Proc. of the Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem*. Springer-Verlag, 2013. [doi: 10.1007/978-3-642-41908-9\_25]

- [11] Theobald DM. Topology revisited: Representing spatial relations. *Int'l Journal of Geographical Information Science*, 2001,15(8): 689-705. [doi: 10.1080/13658810110074519]
- [12] Wu CB, Lü GN. Spatial topological relationships: An overview and analysis. *Journal of GeoInformation Science*, 2010,12(4): 524-531 (in Chinese with English abstract).
- [13] Egenhofer MJ, Herring J. A mathematical framework for the definition of topological relationships. In: *Proc. of the 4th Int'l Symp. on Spatial Data Handling*. Zurich, 1990. 803-813.
- [14] Randell DA, Cui Z, Cohn AG. A spatial logic based on regions and connection. In: *Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Knowledge Representation and Reasoning*. Morgan Kaufmann Publishers, 1992.

#### 附中文参考文献:

- [4] 张力,赵炯,贾伟昊,刘英博.基于 Petri 网的位置敏感工作流建模与正确性验证方法. *计算机集成制造系统*,2012,18(8):1747-1756.
- [8] 万能.上下文感知计算若干关键技术研究[博士学位论文].北京:北京邮电大学,2010.
- [12] 吴长彬,闫国年.空间拓扑关系若干问题研究现状的评析. *地球信息科学学报*,2010,12(4):524-531.



朱鑫伟(1983—),女,湖南湘潭人,博士,主要研究领域为业务流程管理,业务流程建模,工作流技术.



Seppe VANDEN BROUCKE(1986—),男,博士,主要研究领域为流程挖掘,流程分析,流程优化.



朱国宾(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为地理信息系统,Web 地理服务,企业流程管理.