

文章编号:1001-9081(2015)02-0326-06

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2015.02.0326

基于事件共享机制的物联网复杂事件处理方法

许冬冬, 袁凌云^{*}

(云南师范大学 信息学院, 昆明 650500)

(*通信作者电子邮箱 blues520@sina.com)

摘要:针对物联网(IOT)复杂事件查询处理过程中的重复查询、存储和处理的问题,提出了事件共享机制(ESM)。首先,为了实现复杂事件的查询与检测,给出了物联网语义事件定义及事件操作符的语义描述;其次,从公共子查询的定义、公共内部查询结构的设计以及事件资源的共享三个角度对物联网事件共享机制展开研究,通过查询表达式的重写、有向无环图(DAG)的构建,以及在结点上使用改进的Continuous参数上下文对事件流进行处理,实现公共子事件查询、存储和处理的共享;最后,构建了基于事件共享机制的语义形式化查询计划处理模型(SFQPM),该模型可自动对查询表达式和查询谓词进行处理,实现复杂事件检测和处理的自动化。仿真结果表明,与基于二叉树(BTree)的处理方法进行对比,所提出的SFQPM具有较高的处理效率和可靠性,实现了复杂事件检测与中间结果共享机制的有机统一,提高了系统的处理效率。最后通过案例研究验证了所提出算法的有效性和可行性。

关键词:物联网; 复杂事件处理; 查询计划; 有向无环图; 参数上下文

中图分类号: TN919.2 **文献标志码:**A

Method of IOT complex event processing based on event sharing mechanism

XU Dongdong, YUAN Lingyun^{*}

(School of Information Science and Technology, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: Concerning the problems including repetitive query, storage and processing in the process of complex event query processing in Internet of Things (IOT), an Event Sharing Mechanism (ESM) was proposed. Firstly, in order to realize the query and detection of complex events, a semantic event definition about IOT and semantic descriptions of event operators were presented. Secondly, research on the IOT ESM was done from the following three aspects: the definition of public subqueries, the design of public internal query structure and the sharing of event resources. Through rewriting the query expression, building the Directed Acyclic Graph (DAG) related to the query expression and using the improved Continuous, one of the parameter contexts, on each node to handle event streams, the sharing of public events' query, storage and processing was implemented. Finally, a Semantics Formal Query-plan Processing Model (SFQPM) based on ESM was also designed, which could process query expressions and predicates automatically, and fulfill the automation of complex event detection and processing. The simulation results show that, compared with the method based on BTree (Binary Tree), the proposed SFQPM has high efficiency and reliability in processing, and can process massive and real-time IOT event streams timely and efficiently. In addition, a case study was given to verify the effectiveness and feasibility of the proposed SFQPM.

Key words: Internet of Things (IOT); complex event processing; query plan; Directed Acyclic Graph (DAG); parameter context

0 引言

物联网(Internet of Things, IOT)作为新一代网络技术,被广泛应用于医疗健康、智能交通、物流运输等领域^[1-2]。复杂事件处理(Complex Event Processing, CEP)技术的出现为大规模物联网数据处理带来了极大的便利,它作为物联网的关键技术之一,已经被广泛应用于各种领域,国内外的研究者也已经在该领域取得了一些有价值的成果。

在物联网数据处理过程中,由于目前普通的数据库系统在处理海量数据流方面存在一定的缺陷,且很多公共子事件

的存在使得数据查询、检测和处理过程中需要重复存储、计算和处理很多数据,降低了处理的效率。

比较典型的有加州大学提出的SASE检测技术^[3-4],该技术可以根据查询计划的建模特点,共享事件操作符;但这种共享只能满足时序操作和时序限制完全相同的事件共享,不能用于其他操作符及通常意义上的各类子事件的共享。

为了实现复合事件的查询及对查询的处理,文献[5]基于Petri网进行了扩展,但仅针对单个复合事件的查询处理及优化技术进行了研究,未涉及多复合事件查询的处理以及优化技术。

收稿日期:2014-09-11;修回日期:2014-11-14。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61262071);教育部人文社会科学研究青年基金资助项目(13YJCZH233);云南省教育厅面上项目(2012Y286);云南省应用基础研究计划面上项目(2013);云南师范大学研究生科研创新基金项目。

作者简介:许冬冬(1989-),男,江苏南通人,硕士研究生,主要研究方向:语义物联网、复杂事件处理;袁凌云(1980-),女,云南昭通人,副教授,博士,CCF会员,主要研究方向:无线传感器网络、物联网。

文献[6]提出了一种扩展意义的子查询共享方法,通过分析查询的丰富语义,实现了RFID多复合事件的查询共享;但该方法仅适用于复杂事件数量较少的情况,当复杂事件数量增加时,可能会超出系统所具有的内存空间。

文献[7]提出了将表达式转换成基于树的内部结构的检测方法,该方法通过建立原始事件分类表、复合事件分类表和中间结果共享池来提高检测的效率;但该方法并未将事件检测和中间结果共享机制统一起来,每一个事件实例的出现都要去查询共享池和事件分类表,一定程度上增加了系统开销。

针对以上问题,本文给出了事件操作符的语义描述,结合物联网复杂事件的特点及有向无环图(Directed Acyclic Graph, DAG)的层次结构在模拟复杂事件表达式上的优势,提出了事件共享机制(Event Sharing Mechanism, ESM),同时构建了基于ESM的语义形式化查询计划处理模型,实现了多个复杂事件在查询、检测、处理及中间结果等方面的共享,重点解决了海量事件处理对内存空间的极大占用问题。通过仿真实验,将该模型与基于二叉树(Binary Tree, BTee)的处理方法进行对比,研究了基本事件总数对算法处理过程中内存的占用量、算法的执行时间等性能的影响。最后以环境监测应用场景为例,说明如何利用ESM检测和处理物联网复杂事件,结果验证了所提出算法模型的有效性和可行性。

1 语义事件模型

1.1 物联网语义事件定义

定义1 基本事件。基本事件表示具有一定语义的目标对象或它们之间某种具有时空关联行为的发生^[8]。通常,基本事件具有应用相关性,不同应用中,事件的语义也不尽相同。

定义2 复杂事件。复杂事件是由基本事件或复杂事件与一个或多个事件操作符复合形成事件,用于表达上层应用的语义对象之间某关系的发生,其数据形式可定义为 $CE(Attr_1, Attr_2, \dots, Attr_n, Rule, ts)$ 。其中: $Attr_i$ 为复杂事件的属性或构成元素; $Rule$ 为构成规则,主要由事件操作符组成; ts 为复杂事件发生的时间。

定义3 子事件。把在一个复杂事件中定义的、被用来参与复合的事件称为复杂事件的子事件^[9]。

1.2 基本操作符语义

本节定义了四类常用的操作符以及它们形式化的语义,其中:事件 E_1 和 E_2 为基本事件或复杂事件, $E.start_ts$ 和 $E.end_ts$ 分别为事件 E 的启动时间和结束时间。

1) SEQ(:):事件 E_1 和 E_2 的顺序发生可以表示成 $E_1;E_2$,该表达式的语义为当事件 E_2 在事件 E_1 已经发生前提下发生时,表达式 $(E_1;E_2)(t)$ 为真,即事件 $E_1;E_2$ 发生。即:

$$(E_1;E_2)(t) = (E_1(t_1) \wedge E_2(t_2)) = \\ \begin{cases} 1, & (E_1(t_1))^{\circ} = (E_2(t_2))^{\circ} = 1, \\ & \text{且 } t_1 < t_2 = t \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

则该操作符的规范形式定义如下:

$$(E_1;E_2)(t) = \exists t_1 < t_2 = t E_1(t_1) \wedge E_2(t_2)$$

2) NEG(\neg):表示没有检测到事件 E 的出现,该操作符通常和其他操作符一起使用。该操作符的规范形式定义如下:

$$\neg E(t) = \begin{cases} 0, & \text{event } E \text{ occurs at time } t \\ 1, & \text{其他} \end{cases}$$

3) AND(Δ):事件 E_1 和 E_2 的合取形式可以表示成 $E_1 \Delta E_2$,该表达式的语义可描述为当事件 E_1 和 E_2 都发生时,表达式 $E_1 \Delta E_2$ 为真,即事件 $E_1 \Delta E_2$ 发生。不考虑事件出现的顺序。该操作符的规范定义如下:

$$(E_1 \Delta E_2)(t) = \exists t_1 \leq t_2 = t (E_1(t_1) \wedge E_2(t_2)) \vee (E_2(t_1) \wedge E_1(t_2))$$

4) OR(∇):事件 E_1 和 E_2 的析取形式可以表示成 $E_1 \nabla E_2$,该表达式的语义可描述为当事件 E_1 和 E_2 中任一个事件发生时,表达式 $E_1 \nabla E_2$ 为真,即事件 $E_1 \nabla E_2$ 发生。该操作符的规范形式定义如下:

$$(E_1 \nabla E_2)(t) = E_1(t) \vee E_2(t)$$

1.3 事件语言

本文采用文献[3]中提出的事件语言SASE,具体内容可参考文献[3],这里仅给出一个查询实例。

Query 1: 给定了一个具体的查询,其中 E_1, E_2, E_3, E_4 为四种不同类型的事件,WHERE子句中包含了3个通过AND连接的谓词,最后一个大小为500 s的时间窗,对满足谓词约束的事件序列进行筛选。由于版面有限,Query 1部分内容如下:

```
Query 1: Composite Query Pattern
PATTERN (( (E1 \Delta E2) ; (E2 \Delta E3) ) \Delta (E3 \Delta E4)) \Delta (E3 \Delta E4)
WHERE E1.name = E3.name
AND E2.name = 'Google'
AND E3.price < (1 + 20%) * E4.price
WITHIN 500 s
```

2 事件共享机制

为了解决以上问题,本文提出物联网事件共享机制。物联网事件共享就是物联网事件查询与处理过程中,将可以共用的部分进行重组、合并、共用以及重用的过程,实现查询、存储和处理的共享。本文通过公共子查询的定义、公共结点的构造以及使用策略的设计,对物联网事件共享机制展开研究,实现用户级查询共享、事件存储和处理的共享以及资源的使用共享。

2.1 查询重写

与传统的关系数据库不同,当前对CEP系统的研究很少关注语言级的查询优化,未充分利用操作符之间的语义等价关系将查询进行改写,影响了系统的执行效率^[7];同时,复杂事件表达式很少能实现子查询的共享,增加了计算的复杂度和计算的重复率。为了解决以上问题,从有利于实现共享的角度出发,对每一个收到的查询进行重写,等价变换为仅含“ Δ ”、“;”及“ \neg ”的小事件^[9]合取范式。改写规则和步骤如下:

设 E_1, E_2 和 E_3 是事件空间中的任意事件,则对于事件操作符具有如下改写规则:

规则1 基于操作符定义的改写规则。根据1.2节中各事件操作符的定义进行改写。

规则2 基于操作符性质的改写规则。包括自反律、交换律、结合律、分配律和狄摩根定律等。由于版面有限,不在此处展开讨论,感兴趣的读者可自行推导。

规则 3 两个事件的或操作语义等价于两个非事件的与操作的非, 即 $(E_1 \nabla E_2)(t) = \exists t \in (\neg E_1(t) \wedge \neg E_2(t))$ 。

对于任何一个复杂事件查询, 都可以通过以下步骤改写成合取范式:

- 1) 利用规则 1 将复杂事件查询中的其他操作等价转换为“ Δ ”、“;”及“ \neg ”操作;
- 2) 利用狄摩根定律将否定符号“ \neg ”移至各基本事件之前;
- 3) 利用规则 2 将复杂事件查询中的其他操作等价变换为“ Δ ”、“;”及“ \neg ”操作。

如上所示的改写步骤不仅提高了复杂事件的表现能力, 实现了子查询的共享, 同时在一定程度上减少了事件的重复计算, 也为有向无环图中公共结点的共享作好准备。

2.2 基于有向无环图的复杂事件处理共享层次模型

为了对查询进行处理, 首先从语法上对查询表达式进行分析, 将其转换成多个内部操作符树(operator tree)表示。每个操作符树对应一个复杂事件, 操作符树的每个非叶结点对应一个操作符, 如图 1 所示。这些树合并形成一个事件二叉树, 查询 1 对应的事件树如图 2 所示。仔细观察该表达式, 可以发现有一些相同的子表达式, 它们在二叉树中也重复出现。若将这些重复事件进行共用, 则可形成一个事件图, 即有向无环图^[10], 如图 3 所示。

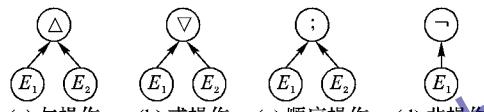


图 1 操作符树的结构

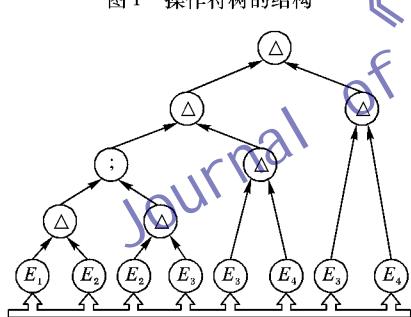


图 2 事件二叉树结构

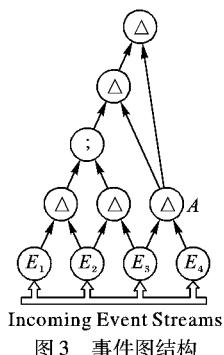


图 3 事件图结构

图 3 所示的有向无环图由叶顶点、非叶顶点和弧组成, 每个叶顶点表示一个基本事件, 有一条入边, 可能有多条出边; 每个非叶顶点对应一个事件操作符, 最多有两条入边, 可能有多条出边。每个叶顶点都带有一个缓存区^[11], 用于存储新到达的事件; 每个非叶顶点都有左、右两个缓存区, 分别用于存

储从左、右弧传递来的中间结果。事件流中的事件连续不断地流入叶顶点的缓存区, 经顶点处理后按先后顺序自底向上进行传输。

有向无环图可以共享子事件的检测, 提高检测的效率, 但也可能导致检测过程中产生资源冲突^[12]。冲突在有向无环图数据共享过程中是不可避免的, 体现了处理过程中不同对象对共享资源的竞争, 如应该如何从多个满足事件语义的多个子事件中进行选择, 顶点的左右缓存区中存储的子事件会因为没有确定的删除规则而引起资源冲突, 参与复杂事件的公共子事件(如图 3 中的公共子事件 A)可能会因为资源的分配不当而引起冲突等。

针对这些问题, 本文使用参数上下文^[13-14]中的 Continuous 上下文, 结合上述共享层次模型对事件流进行共享处理。Continuous 上下文具有以下规则:1)每一个新到来的起始事件都会启动一个新一轮的复杂事件的监测, 它可以和已存在的其他所有满足事件语义的子事件复合;2)所有满足事件语义的子事件都有可能一次或多次参与同一个复杂事件的监测;3)一旦复杂事件被触发, 所有参与复合的初始事件被删除, 但终止事件仍可以参与其他事件的复合。

针对一个顶点有多条出边, 现根据实际需要作如下补充:
1)从左到右依次激活各条出边相连的顶点;2)将左右缓存区中的子事件与顶点表示的操作符复合后依次复制到这些顶点;3)激活每个顶点所用的时间相同。

改进的 Continuous 参数上下文可以更好地在有向无环图上处理, 充分利用事件的可重用性, 实现事件的使用共享。

下面通过具体实例来说明。如图 3 所示为 Query 1 的事件图结构, 其中: 叶顶点 E_1, E_2, E_3, E_4 为基本事件, 非叶顶点均为复杂事件。图 4 描述了使用改进的 Continuous 参数上下文对 Query 1 中的复杂事件进行事件检测的部分过程。

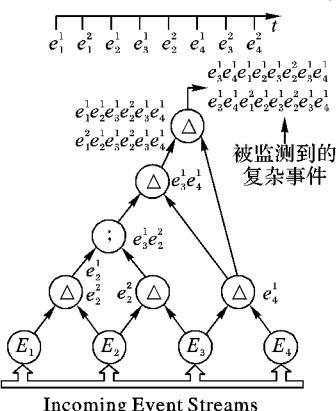


图 4 Query1 中复杂事件的检测过程

3 语义形式化查询计划处理模型

前文对物联网复杂事件查询处理过程中的事件共享机制进行了深入而细致的研究, 本章在其基础上提出基于事件共享机制的语义形式化查询计划处理模型。该模型可以将查询表达式自动转换成有向无环图结构, 并对查询谓词进行处理, 实现对复杂事件的自动化检测。下面结合图 5 阐述根据 Query 1 构建基于图的查询计划的过程。

步骤 1 查询重写。主要针对查询的 PATTERN 子句部分, 将查询表达式的所有谓词等价变换为仅含“ Δ ”、“;”及“ \neg ”操作符的合取范式。

步骤2 结构转换。从词法和语法上分析查询表达式的结构,并将其转换成有向无环图。

步骤3 谓词解析。主要针对查询的 WHERE 子句部分包含的两类谓词:简单谓词和参数化谓词^[3-4]。将这两类谓词分别安置到有向无环图相应的顶点上,过滤事件序列。

把简单谓词安置在叶缓存区,可以及时而有效地阻止不相关的事件进入叶缓存区;参数化谓词被安排到尽可能低的非叶结点,以便不相关的事件可以尽早地被过滤掉。此外,当操作符为 SEQ(图 1(c))时,需要增加哨函数 $E_1.timestamp < E_2.timestamp$,及时丢弃不满足约束的事件序列,减少中间结果的产生。

步骤4 时间相关约束。针对查询的 WITHIN 子句部分,将该时间约束加载到有向无环图的终点(End Point)处,判断序列的尾事件和首事件的时间差与时间窗 T 的大小关系,从而决定是否输出该序列。

步骤5 事件读取。当输入事件流中的一个事件到达处理结点,系统读取该事件,并送往处理器处理。

步骤6 乱序修正。处理器对读取的事件进行一系列的内部排序处理,处理后的结果为一个全序的事件序列,可供后续使用。

步骤7 事件共享机制。利用本文提出的复杂事件处理共享层次模型进行处理。

步骤8 序列转换。对终点处满足约束的序列的所有属性进行关联,并将该事件序列转换成一个复杂事件输出。

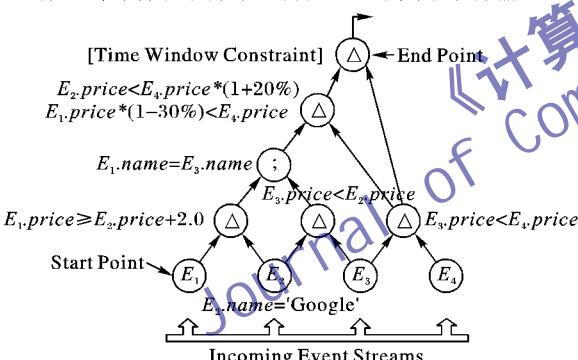


图 5 Query 1 基于图的查询计划层次结构模型

4 仿真实验及分析

4.1 实验设置

本实验采用 C 语言实现了算法模型,对其事件处理的性能进行了测试,并对结果进行了分析。使用到的软硬件环境为 Intel Core 双核 3.10 GHz CPU,内存 2 GB,Windows 7 操作系统,Visual C++ 6.0 编程环境。

由于目前国内外尚没有通用的物联网相关的数据集,且获取海量的物联网应用数据比较困难,因此,本文实现了一个可用于不同系统下仿真的事件序列产生器。根据第 3 章提出的处理模型对 Query 1 进行处理,其中基本事件数量分别为 $1 \times 10^4, 2 \times 10^4, \dots, 6 \times 10^4$,通过对图 2 和图 3 所示两种结构的处理性能进行对比和分析,来测试本文提出的 SFQPM 的处理效率。

4.2 共享机制对内存占用量的影响

图 6 为有向无环图(DAG)结构和二叉树(BTree)结构的内存占用量随基本事件数量变化的对比。可以看出,随着基

本事件数量的增加,两种结构的内存占用量均呈现出增长的趋势,且基于二叉树结构的算法的增长速度更快。这是因为二叉树结构中存在相同的子事件结点,且每个结点对满足要求的子事件都必须存储一次。针对这些重复存储,有向无环图结构通过事件共享机制对二叉树结构中的相同结点及相同子事件进行了共享,从而节省了内存空间。因此,当查询表达式中的公共子查询越多、基本事件数量越多时,SFQPM 的内存占用量相对二叉树结构就越少,效果就越明显。

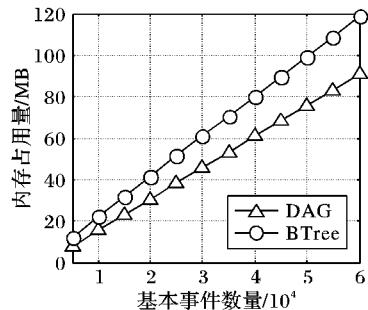


图 6 内存占用量随基本事件数量变化对比

4.3 共享机制对处理时间的影响

图 7 为有向无环图结构和二叉树结构的执行时间随基本事件数量变化对比。

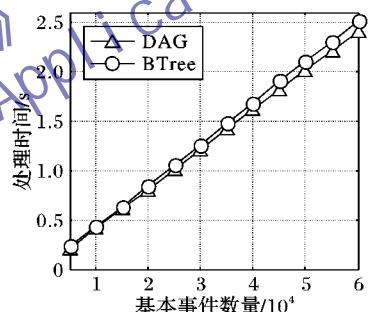


图 7 处理时间随基本事件数量变化对比

从图 7 可以看出,随着基本事件数量的增加,两种处理结构的处理时间相差不大,但当基本事件数量相同时,本文提出的有向无环图结构的处理时间始终低于二叉树结构。因为二叉树结构中重复的子事件结点在对事件进行重复存储的同时,还需要对这些事件进行重复的处理,共享机制的使用,可以减少中间结果的重复检测,从而减少复杂事件的处理时间。在实际应用中,需要处理的事件是海量的,当基本事件数量越多时,SFQPM 的优越性就越明显。

4.4 共享机制对复杂事件检测数量的影响

图 8 为本文提出的基于事件共享机制的语义形式化查询计划处理模型与一般二叉树结构检测到的复杂事件数量随基本事件数量变化的对比。

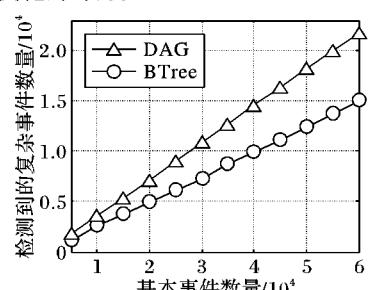


图 8 检测到的复杂事件数量随基本事件数量变化对比

从图 8 可以看出,随着基本事件数量的增加,检测到的复杂事件数量大幅度增长;且在基本事件数量相同时,基于 SFQPM 检测到的复杂事件数量远大于一般二叉树结构。这是由于 SFQPM 中的事件共享机制使得保存在结点缓存区中的事件可以一次或多次参与复杂事件的复合,从而增加了复杂事件的检测数量,提高了检测效率。

5 实例研究

本文以环境监测应用场景为例,说明如何基于物联网数据流,利用本文提出的事件共享机制对基本事件或复杂事件进行处理。

假设在某一生态环境监测应用场景,需要对其中的某一小片区域进行火灾监测,并在该区域内部署了光传感器、温度传感器和烟雾传感器各一个。这三个传感器分别根据其内部设置,相互协作进行工作。

5.1 环境监测中事件定义及描述

通常,环境监测应用场景中的基本事件主要包含光传感器、温度传感器和烟雾传感器三者对特定对象及属性的感知,现根据需要,定义以下三类基本事件:光传感器对光信号变化情况的感知(简称 P 事件)、温度传感器对感知对象温度情况的感知(T 事件)以及烟雾传感器对感知范围内烟雾浓度变化情况的感知(S 事件)。这些基本事件都有一个共同的属性,即事件发生时间 ts 。若某环境监测单位工作人员需要对环境情况进行查询,具体查询如 Query 2 所示。

```
Query 2: Environmental Monitoring Query
PATTERN  $\neg(\neg P \nabla \neg S); (P \Delta T)$ 
WHERE  $P.ts < S.ts$ 
AND  $P.ts < T.ts$ 
AND  $S.ts < T.ts$ 
WITHIN 10 s
```

5.2 事件共享处理

对于上述场景中的查询表达式 $\neg(\neg P \nabla \neg S); (P \Delta T)$,需要根据规则 2 和规则 3 对其进行重写,重写后的表达式为 $P \Delta (S; T)$ 。

根据查询表达式转换成有向无环图的转换方法,将重写后的表达式转换成有向无环图结构,转换后的有向无环图如图 9 所示。

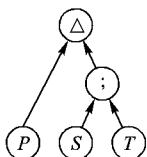


图 9 查询表达式转换后的有向无环图结构

在上文处理的基础上,利用基于有向无环图的复杂事件处理共享层次模型对事件流进行处理,假设在查询指定的时段内所产生的事件如表 1 所示,则经过上文提出的事件共享机制对事件流处理的过程如下:

- 1) 当事件 p 被叶顶点 P 检测到后,传递至上层“ Δ ”顶点的左缓存区;同样,事件 s 被传递至上层“;”顶点的左缓存区。
- 2) 当事件 t 被传递至上层“;”顶点的右缓存区时,根据本文改进的 Continuous 参数上下文,其与左缓存区中的事件 s 复合形成复杂事件 $s; t$,并被传递至上层“ Δ ”顶点的右缓存区,此时,“;”顶点的左缓存区中的初始事件 s 应被删除,而右缓存区

中的终止事件 t 被保留,以便继续参与后续复杂事件的复合,但因为该顶点的事件操作符为“;”,所以右缓存区中的事件也被删除;同样,“ Δ ”顶点右缓存区中的事件 $s; t$ 与左缓存区中的事件复合形成 pst 输出,右缓存区中的事件被保留。

3) 剩余的事件 $p_1, s_1, t_1, p_2, s_2, t_2$ 依次被检测到,并根据 2) 中的方法进行处理,依次形成复杂事件 $stp_1, p_1s_1t_1, s_1t_1p_2, p_2s_2t_2$ 输出,最终在“ Δ ”顶点的右缓存区中保留着前一过程的终止事件 s_2t_2 ,处理的结果如图 10 所示。

表 1 环境监测应用场景中基本事件实例

P 事件	S 事件	T 事件
$p (ts = 9:00)$	$s (ts = 9:02)$	$t (ts = 9:5)$
$p_1 (ts = 9:10)$	$s_1 (ts = 9:12)$	$t_1 (ts = 9:25)$
$p_2 (ts = 9:20)$	$s_2 (ts = 9:22)$	$t_2 (ts = 9:25)$

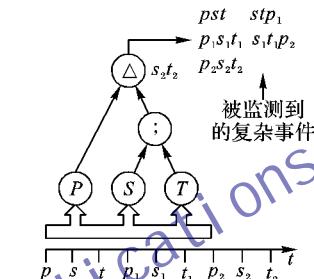


图 10 基于事件共享机制的复杂事件处理结果

5.3 事件处理结果分析

上述环境监测应用场景中,在感知设备的各种性能得到保证的情况下,使用本文提出的基于事件共享机制的复杂事件处理方法对事件流 $p, s, t, p_1, s_1, t_1, p_2, s_2, t_2$ 进行处理,可以检测出 5 个复杂事件 $pst, stp_1, p_1s_1t_1, s_1t_1p_2, p_2s_2t_2$ 。然而,在没有使用事件共享机制的情况下,仅有复杂事件 $pst, p_1s_1t_1, p_2s_2t_2$ 被检测出来。也就是说,如果不使用本文提出的事件共享机制对事件流进行处理,一些满足条件的复杂事件很可能被忽略;相反,事件共享机制的使用,使得一个终止事件对应多个初始事件,增加了火灾监测和判断的成功率,即增大了检测到火灾发生的概率,尤其是在感知设备的性能得不到保证的情况下。

这意味着本文提出的基于事件共享机制的 SFQMP 模型较原有的方法可以提高事件成功检测的概率和正确率,保证检测的准确性。当参与检测的事件规模逐渐增大时,使用 SFQPM 对海量的物联网事件进行检测和处理,仍可以保证复杂事件检测的成功匹配率及复杂事件处理的正确率,且不会对准确性产生较大的影响。同样,对于环境监测应用场景中的其他数据以及其他领域的相关数据,也可以利用本文提出的语义事件定义方法对其进行事件化,并利用基于事件共享的复杂事件处理方法对事件流进行共享处理。

6 结语

随着物联网技术的应用和发展,作为关键技术之一的复杂事件处理技术已经被广泛应用于各种领域。基于物联网复杂事件查询处理过程中存在的重复存储和处理的问题,本文给出了物联网语义事件定义及事件操作符的语义描述,提出了事件共享机制和基于事件共享机制的语义形式化查询计划处理模型。仿真结果表明,SFQPM 较基于二叉树的处理方法

具有更高的处理效率,可以减少内存占用量和算法执行时间,提高事件处理效率,实现了复杂事件检测与中间结果共享机制的有机统一,尤其适用于具有大量重复子事件及大规模的数据流处理的环境。此外,本文还以环境监测应用场景为例,展示了物联网语义事件定义以及基于事件共享机制的复杂事件处理方法的完整过程,该过程验证了本文提出的SFQPM的准确性与可行性。未来的研究工作中,将进一步完善并设计相关的代价评估模型及优化方法。

参考文献:

- [1] YUAN L, WANG X, GAN J. A semantic-based spatio-temporal data model for Internet of Things [J]. *Journal of Convergence Information Technology*, 2013, 8(6): 1159–1168.
- [2] YUAN L, WANG X. Study on IOT spatio-temporal data description model based on semantics [C]// ICCEIT '13: Proceedings of the 2013 International Conference on Control Engineering and Information Technology. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2013: 759–764.
- [3] WU E, DIAO Y, RIZYI S. High-performance complex event processing over streams [C]// SIGMOD '06: Proceedings of the 2006 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. New York: ACM, 2006: 407–418.
- [4] YIN X, JU S, WANG Y. RFID data stream processing technology based on CEP [J]. *Journal of Computer Applications*, 2009, 29(10): 2786–2790. (阴晓加, 鞠时光, 王英杰. 基于复杂事件处理机制的RFID数据流处理方法[J]. 计算机应用, 2009, 29(10): 2786–2790.)
- [5] WANG F, LIU S, LIU P. Complex RFID event processing [J]. *The International Journal on Very Large Data Bases*, 2009, 18(4): 913–931.
- [6] SONG B, LOU H, TANG M, et al. An extended sub-query sharing approach over RFID event streams [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2012, 33(9): 1898–1902. (宋宝燕, 娄慧贞, 唐敏, 等. RFID事件流上一种扩展意义的子查询共享方法[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(9): 1898–1902.)
- [7] ZANG C, FAN Y, LIU R. Architecture, implementation and application of complex event processing in enterprise information systems based on RFID [J]. *Information Systems Frontiers*, 2008, 10(5): 543–553.
- [8] WANG Z. Real-time query processing and optimising strategy for RFID complex events [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (王中强. RFID复杂事件实时查询处理及其优化策略[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.)
- [9] YE W, HUANG Y, ZHAO W, et al. Research on composite event detection in RFID middleware based on colored Petri net [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(B12): 1–8. (叶蔚, 黄雨, 赵文, 等. 基于Petri网的RFID中间件中复合事件检测研究[J]. 电子学报, 2008, 36(B12): 1–8.)
- [10] YAN W, WU W. Data structure [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 156–192. (严蔚敏, 吴伟民. 数据结构 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 156–192.)
- [11] MEI Y, MADDEN S. ZStream: a cost-based query processor for adaptively detecting composite events [C]// SIGMOD '09: Proceedings of the 2009 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. New York: ACM, 2009: 193–206.
- [12] WANG Z, MA Z. Research and analysis of RFID complex event detection model based on CPN [J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(4): 1425–1428. (王钊, 马志峰. 基于有色网的RFID复杂事件检测模型的研究与分析[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(4): 1425–1428.)
- [13] CHAKRAVARTHY S, KRISHNAPRASAD V, ANWAR E, et al. Composite events for active databases: semantics, contexts and detection [C]// VLDB '94: Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1994: 606–617.
- [14] PEI R. Event decentring active database and application [D]. Shanghai: Donghua University, 2006. (裴仁林. 主动数据库中的事件探测及应用[D]. 上海: 东华大学, 2006.)

(上接第325页)

- [7] BAKSHY E, ROSENN I, MARLOW C, et al. The role of social networks in information diffusion [C]// WWW 2012: Proceedings of the 21st International Conference on World Wide Web. New York: ACM, 2012: 519–528.
- [8] MENG Z, FU X. Dynamic information spreading model based on online social network [J]. *Journal of Computer Applications*, 2014, 34(7): 1960–1963. (蒙在桥, 傅秀芬. 基于在线社交网络的动态消息传播模型[J]. 计算机应用, 2014, 34(7): 1960–1963.)
- [9] LI D, XU Z, LI S, et al. A survey on information diffusion in online social networks [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2014, 37(1): 189–206. (李栋, 徐志明, 李生, 等. 在线社会网络中信息扩散[J]. 计算机学报, 2014, 37(1): 189–206.)
- [10] YANG Z, GUO J, CAI K, et al. Understanding retweeting behaviors in social networks [C]// CIKM 2010: Proceedings of the 19th ACM International Conference on Information and Knowledge Management. New York: ACM, 2010: 1633–1636.
- [11] TANG S, YUAN J, MAO X, et al. Relationship classification in large scale online social networks and its impact on information propagation [C]// INFOCOM 2011: Proceedings of the 30th IEEE

- International Conference on Computer Communications. New York: IEEE Communications Society, 2011: 2291–2299.
- [12] WANG X, LI X, CHEN G. The introduction of network science [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 306. (汪小帆, 李翔, 陈关荣. 网络科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 306.)
- [13] KARRER B, NEWMAN M E J. Message passing approach for general epidemic models [J]. *Physical Review E*, 2010, 82(1): 016101.
- [14] LOKHOV A Y, MÉZARD M, OHTA H, et al. Inferring the origin of an epidemic with dynamic message-passing algorithm [J]. *Physical Review E*, 2013, 90(1): 012801.
- [15] WANG X, LI X, CHEN G. The theory and application of complex networks [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 56. (汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 56.)
- [16] YANG X. The research for unexpected network rumors' generation and response mechanism [J]. *Southeast Communication*, 2014(1): 101–103. (杨小林. 突发事件网络谣言的产生机理与应对机制研究[J]. 东南传播, 2014(1): 101–103.)