

复杂事件处理技术及其在物流物联网中的应用

荆 心^{1,2*}, 张 璟¹, 李军怀¹

(1. 西安理工大学 计算机科学与工程学院, 西安 710048; 2. 西安工业大学 计算机科学与工程学院, 西安 710032)

(* 通信作者电子邮箱 heartj@tom.com)

摘 要:复杂事件处理(CEP)技术是目前对高速事件流中蕴含信息进行实时分析的最佳技术,重点应用于事件驱动架构系统中,能够帮助业务应用实现智能化处理。为报告其研究发展现状,在给出 CEP 基本含义及显著特征的基础上,首先提出了由 9 个模块组成的 CEP 系统通用结构模型;然后综述了模型中重要部分相关关键技术的分类与形式化基础;同时设计了 CEP 在物流物联网中综合应用的框架模型,由此得出了 CEP 技术的优点及作用;最后指出了目前存在的不足及未来的研究方向。从理论与实践两方面对 CEP 技术进行了系统、详细、深入的剖析,以期推动其继续发展。

关键词:复杂事件处理;事件驱动架构;物流物联网;事件流处理

中图分类号:TP315 **文献标志码:**A

Overview of complex event processing technology and its application in logistics Internet of Things

JING Xin^{1,2*}, ZHANG Jing¹, LI Junhuai¹

(1. School of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an Shaanxi 710032, China)

Abstract: Complex Event Processing (CEP) is currently an advanced analytical technology which deals with high velocity event streams in a real-time way and primarily gets applied in Event Driven Architecture (EDA) system domain. It is helpful to realize intelligent business in many applications. For the sake of reporting its research status, the paper introduced the basic meaning and salient feature of CEP, and proposed a system architecture model composed of nine parts. Afterwards, the main constituents of the model were reviewed in terms of key technology and its formalization. In order to illustrate how to use CEP in the logistic Internet of things, an application framework with CEP infiltrating in it was also proposed here. It can be concluded that CEP has many merits and can play an important role in application fields. Finally, the shortcomings of this research domain were pointed out and future works were discussed. The paper systematically analyzed the CEP technology in terms of theory and practice so as to further develop CEP technology.

Key words: Complex Event Processing (CEP); Event Driven Architecture (EDA); logistics Internet Of Things (IOT); event stream processing

0 引言

复杂事件处理(Complex Event Processing, CEP)是由主动数据库、数据流处理、订阅/发布系统等多个研究领域交叉而形成的一项新技术,由 Luckham^[1]明确提出。CEP 能够对蕴含在事件间的各种逻辑及语义关系进行模式匹配和语义推理,复合生成具有一定抽象层次,符合业务需求的高级事件,该技术能够帮助业务应用准确、实时地从无意义的事件流中获取感兴趣的预定信息。由此其目前被广泛地集成于事件驱动架构(Event Driven Architecture, EDA)系统之中^[2],已成为了物流、金融、制造业等众多应用领域中数据实时分析的关键工具。此外,由于 CEP 具有实时处理来自物联网底层的海量 RFID(Radio Frequency Identification)标识与 Sensor 感知原子事件,以及智能产生响应的能力,其还将成为物联网必备的关键技术^[3]。

CEP 之所以区别于数据挖掘、数据仓储等传统数据处理技术,是由于其具有以下显著特点:

1)事件处理能力。CEP 以事件流为查询对象,并能够有效应对数据流的持续海量、异构并发、数据不确定性、信息混合等问题,相对于数据挖掘的静态方法,其具有较强的动态性。

2)在线实时反应能力。CEP 将事件模式注册于处理引擎运行时中,在有限的时间窗口内对经过的事件流进行单遍扫描,快速发现预期结果,该处理方式效率优先,只要求近似结果,明显不同于传统的存储请求/响应查询模式。

3)语义抽象推理能力。CEP 不但能够判断事件顺序之间的各种逻辑关系,还能够结合非事件的领域知识进行语义推理,产生的结果可用于进一步抽象更高层次的复杂事件,或触发相应的业务行为,其明显具有较强的主动性与智能性。

CEP 技术的发展当前还处于初级阶段,众多的研究机构根据其学术背景、目标驱动,提出了大量的具有不同语言及特性的 CEP 系统,这些系统面向多个领域,具有各自的形式化基础与实现方法,因此实际差异较大。文献[4]对现存的三十余种 CEP 系统进行了对比分析,并明确指出当前还没有真

收稿日期:2013-01-28;修回日期:2013-03-04。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61172018,61172124)。

作者简介:荆心(1977-),男,陕西西安人,讲师,博士研究生,主要研究方向:物联网、数据库;张璟(1952-),男,陕西宝鸡人,教授,博士,主要研究方向:云计算、虚拟化;李军怀(1969-),男,陕西西安人,教授,博士,主要研究方向:物联网、分布式计算、射频技术。

正完善且通用的系统出现。因此,为报告现阶段研究成果,帮助相关人员了解该领域的研究进展与发展趋势,本文首先抽象出了 CEP 处理过程中涉及到的主要实体对象,并根据处理的一般规律,提出了能用于 CEP 系统分析的通用结构模型;然后综述了该模型中重要模块关键技术的研究现状(包括分类及形式化基础);同时为说明 CEP 应用的方式及作用,具体结合物流领域,给出了集成 CEP 功能的物联网应用框架模型;最后讨论了该领域目前存在的开放性问题。

1 CEP 系统通用结构模型

目前学术界对于 CEP 系统功能的认识较为一致,即核心为复杂事件检测,另外兼具数据过滤与响应通知的能力,但至今还没有具体的工作来描述要实现这些功能至少应具备何种系统结构,这是造成部分 CEP 系统不够完善的一个重要原因。文献[4]讨论了与信息流处理系统相关的 7 个方面,并以此比较了多种 CEP 系统的差异。文献[5]给出了包含 7 个模型的事件通知服务系统分析框架,并描述了模型间的关系。可以看出上述系统结构均非针对 CEP 系统建立,不能完全表现 CEP 系统的典型特征,因此当将其用于分析 CEP 处理时将存在明显缺陷。

由此,本文提出了如图 1 所示的完全符合 CEP 特点的系统通用结构模型,其中事件表示模型是 CEP 运行的基础,描述了事件的特性、表示方式、语义信息等内容;事件流模型定义了原子事件及多个事件流融合后的组成方式;时间模型定义了事件的时间表示方式,是序列逻辑检测的必要要素;约束模型规定了处理的时空、语义、负载限制;语言模型向外界提供有效的工具,帮助用户向系统订阅感兴趣的复杂事件;规则模型的对象为事件模式,是复杂事件表达的关键部件,负责语言向具体匹配机制的转换;检测模型包含具体的匹配实现机制与特殊的数据结构,是 CEP 运行的核心;优化模型专门用于调整事件流的处理方式,配合检测模型提高事件匹配效率,减少资源利用率;通知模型用于定义 CEP 与外部的交互方式,包括检出事件的表示方式、通知方式等。

该模型揭示了 CEP 处理过程的一般规律,显示了 CEP 系统基础的组成结构,描述了模块间的层次与关联关系,其中时间模型是事件表示模型的重要特性,检测模型负责对输入事件流进行计算处理,约束模型、规则模型、优化模型规定了检测的内容与方式,语言模型和通知模型与高层交互,接收用户声明并发布处理结果。通过与该模型的比较,能够清晰地分析出现存 CEP 系统的完备性与优劣性。

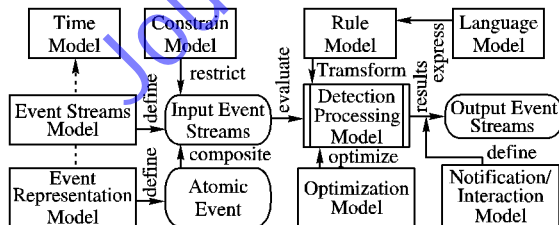


图1 CEP系统通用结构模型

2 CEP 技术

上述结构模型囊括了 CEP 处理的各个方面,包括数据的表示与组织、问题的定义与声明、检测算法的设计与实现、处理效率的约束与优化等,对其各模块所涉及到的关键技术及其形式化基础的综述,能够起到总结 CEP 技术发展现状的作用,因此下面将以此结构模型为依据,对其重要内容进行详细

分析。

2.1 事件表示模型

CEP 系统中的事件是用于记录事物在某个时间段内某些状态信息的原子对象,是其可处理的最小单元,按照知识表示方式的不同,可将目前各 CEP 系统所采用的事件表示模型形式划分为两类。

1) 事件对象表示模型: $e = \{(\text{attribute}_n, \text{value}_n)\}, n \geq 1$ 。其中事件状态属性以面向对象方式表示,一个事件实例由包含了 N 个属性的键值对组成,最常见的示例为 RFID 事件^[6]。

2) 事件语义表示模型: $e = \{(\text{subject}, \text{predicate}_n, \text{object}_n)\}, n \geq 1$ 。其中事件状态属性以语义网方式表示,事件实例由涉及一个主语的 N 条陈述构成,文献[7]给出了以此模型进行表示的股票事件示例。

在 CEP 处理过程中与事件表示密切相关的两个重要方面是序列化与事件属性。序列化方式是事件表示模型具体实现与执行的保障机制,事件在存储、传输过程中通常以 XML (Extensible Markup Language) 半结构化方式或 RDF (Resource Description Framework) 模型进行序列化,而在 CEP 系统内部处理时,则以 POJO (Plain Old Java Objects) 的形式存在。事件属性是事件表示模型的组成单元。由上述模型可以看出,发生时间是其必要属性,而时间的具体表示则由时间模型确定,这可包括点时间与间隔时间两种^[8]: 即若以 $t_{\text{end}} - t_{\text{begin}}$ 表示事件发生的结束时间戳与开始时间戳的差,则当 $t_{\text{begin}} < t_{\text{end}}$ 时,表示该时间段为间隔时间;而当 $t_{\text{begin}} = t_{\text{end}}$ 时即表示该事件的发生为一个离散的时间点,其时间戳可由 t_{begin} 代表。

2.2 事件流模型

事件流是 CEP 系统工作的对象,由原子事件组成,并具有无界的特点,以原子事件到达 CEP 系统的时间,或其自带时间戳的排序来进行组织。由此 CEP 系统可处理的事件流模型可表示为:

$$S = \{e_1(t_1, \text{semantics}), e_2(t_2, \text{semantics}), e_3(t_3, \text{semantics}), \dots; t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n \dots\}$$

其中:原子事件以单调递增时序关系排列, t_n 代表原子事件发生的时间, semantics 代表该事件包含的属性语义。当 CEP 系统以多个事件流为处理对象时,事件流则需根据要求以 $|A| + |B|, A \cup B = \{x | x \in A \vee x \in B\}, A \cap B = \{x | x \in A \wedge x \in B\}, (A \cup B) \cap T = \{x | x \in A \vee x \in B \wedge t \in \text{type}(a, b, c, \dots)\}$ 等多种方式进行合并(其中 A, B 表示事件流,以上 4 种形式分别表示数据流:合并、合并去重、共有和类型过滤),另需指出事件流的融合必须以一致的事件表示模型为基础。

2.3 约束模型

CEP 处理面对输入为无穷的事件流,同时要求实时地给出查询结果,这就使得其必须采用单遍扫描算法,仅在内存中维护一段可快速进行处理的有限数据,由于约束模型能够对预处理事件流的边界进行控制,因此其显然是 CEP 系统中特有且不可或缺的一个重要部件。

在时空约束方面(其中“时”指时间,“空”指内存空间),已有的工作均采用滑动窗口技术来进行事件流的流量控制,因此约束模型可形式化为: $\{e_{\max(0, n-W+1)}, \dots, e_n\}$, 其中: W 是滑动窗口的大小, n 表示当前时间戳,该模型的含义为在时间点 $\max(0, n-W+1)$ 之前的事件全部忽略不计,当新的事件到达时,旧事件根据事件消耗策略被处理掉,滑动窗口自动向后移动。为满足特殊需求,部分研究对滑动窗口进行了改进,这其中包括多时间槽窗口^[9]、界值窗口、滚动窗口、动态窗口以及综合类型窗口^[10]等,这些改进都能在利用更少的资源检

测出更多的复杂事件方面,发挥较好的作用。此外,部分 CEP 系统在开始匹配检测之前,还会对事件流进行一些属性值、事件类型限制^[11]以及负载均衡的预处理工作,这些功能也都应归属于约束模型的范畴。

2.4 检测模型

检测模型关注复杂事件检测的形式化基础及具体实现。根据检测对象及匹配方法的不同,检测模型大致可分为三类:

1) 代数操作符检测模型。

此模型将事件视为基本操作数,将事件检测看作是在事件集合上的运算,其以文献[12]所给出的事件代数 $A = (E, \alpha)$ 为基础,其中: $E = \{e_0, e_1, \dots, e_n\}$ 表示原子事件的集合, $\alpha = \{\wedge, \vee, \neg, ;, \dots\}$ 表示在事件上运算的集合。目前以该模型为基础实现的 CEP 原型系统包括: Snoop、PB-CED^[13]、SASE +^[11]、Rapide、Padres^[14]、SASE^[15]、Cayuga^[16]、NextCEP^[17]等。可用于实现该模型的具体检测方法包括:非确定有穷自动机、Petri 网^[18]、有向无环图、Rete 树^[14]等,文献[5]对上述4种检测机制的基本思想及检测过程进行了总结。

操作符集合 α 是该类模型运行的核心,其必须是完备的,因为只用完备的 α 才能构造出所需的事件模式。按照与时间的相关性,操作符可分为时序操作符与逻辑操作符,例如: $(;)$ 顺序操作符 $(E_1; E_2 = \{(\{e_1, e_2\}; \text{start}, \text{end}) \mid e_1.\text{end} < e_2.\text{end} \wedge e_1 \in E_1 \wedge e_2 \in E_2\})$ 是最常用的时序操作符;按照参与检测的操作数数量,操作符可分为一元与多元操作符,例如: (\neg) 非操作符 $(\neg E)$ 即为典型的一元操作符, (\vee) 或操作符 $(E_1 \vee E_2 = \{(\{e\}; \text{start}, \text{end}) \mid e \in E_1 \vee e \in E_2\})$ 为典型的二元操作符;按照操作对象的不同,操作符还可分为时间窗口操作符、参数操作符等类型。总之,此类检测模型所提供的操作符集合是否全面,直接决定了 CEP 系统事件复合的能力大小。

代数操作符检测模型虽然具有实现简单、能够清晰、准确地表达复合事件模式,方便非事件定义、用户易于理解等优点,但其同时具有天生的缺陷:① 通常操作符集合固定于 CEP 系统内部且数量有限,因此其可扩展性、灵活性差,一旦需要加入新的操作符,需要重新编程实现;② 缺乏对事件发生状态、环境以及领域背景知识的感知能力;③ 对数据流时序关系检测支持较好,但对事件本身所包含属性信息的利用支持较弱。

2) 推理规则检测模型。

此模型基本思想为以一阶谓词逻辑、产生式规则、语义网等形式表示复杂事件模式,然后利用相应的推理机检测复合事件的产生,相对而言该模型属基于逻辑的检测方法。该模型中事件模式具有 $P(t_1, \dots, t_n) \leftarrow Q$ 的形式,其中: Q 表示事件模式, P 是表示事件关系的谓词, t_n 代表事件项,事件模式间可通过逻辑操作符联合而生成复合模式。文献[19]提出的原型系统 Etalis,是该类实现的典型代表,其以 Prolog 语言编写的规则表示事件模式,利用递归循环接受事件并进行实时处理。由于与规则及推理相关的技术早已存在,因此直接利用成熟的推理引擎(或业务规则引擎)实现该模型,显然是最为快捷的方法,例如: Etalis 可直接运行于 SWI、XSB、YAP 等多种推理引擎之上;文献[20-21]利用了 Drools;文献[22]利用了 NxBRE 作为中间件,对 RFID 事件流进行 CEP 检测。

此外,因语义 Web 技术具有规则表示及推理的能力,其近期正被应用于 CEP 处理之中,此类检测方法亦应属于推理规则模型的范围,其以本体表示领域知识,以实例代表事件,使用 pellet、HermiT、Fact++ 等推理机推理事件间隐含关系,

利用 SWRL (Semantic Web Rule Language) 规则声明事件模式,并通过扩展的 SPARQL (Simple Protocol and RDF Query Language) 语言查询复杂事件的发生。Teymourian 等^[23]与 Sasa 等^[7]在该研究方向上做出了较多的贡献, Teymourian 分析了该研究方向所面临的主要问题,提出了语义复杂事件处理系统的基础架构,以及被后期研究广泛引用的本体模块化模型^[23],此外还给出了以 Prova 为规则处理引擎的股市 CEP 系统。Sasa 则给出了复杂事件处理服务的框架^[7],同时展示了如何利用领域本体,并根据天气预报预测用电复杂事件。

总体而言,此类检测模型具有天然的演绎推理能力,能够容易地利用领域知识、环境信息、事件属性进行推理。但由于其开始并非专门为处理事件流而设计的,所以此类模型存在以下弱点:① 规则不具有组织性,难于进行知识管理;② 实时性差,难于在结束事件到达时立即触发复杂事件;③ 难于表达非确定性知识,不支持对模糊概念的推理;④ 由于推理机不支持事件消耗策略,当事件流大量流入,无限的增量会迅速导致内存溢出或资源耗尽。

3) 数据关系检测模型。

此类检测模型基于对 SQL (Structured Query Language) 的扩展,加入了对数据流处理的支持,基本思想为对数据流按时间、数量等条件分段,并转换为关系数据表,最后利用 SQL 的查询计划执行用户定义的事件模式。与传统关系数据库有所不同的是,此处的关系具有时间概念,即为瞬时关系 $R(\tau)$,其中 $\{(s, \tau') \in S: \tau' \leq \tau\}$ 。其检测基本过程为:在某时刻 τ 将已经收到的数据流 $S_1, \dots, S_n (n \geq 0)$ 转换成相应关系 $R_1, \dots, R_m (m \geq 0)$,并用 SQL 对其中的关系进行查询 $R(\tau) = Q(R_1(\tau), \dots, R_m(\tau))$,然后将结果 $R(\tau)$ 转换回数据流输出。以该模型思想实现的 CEP 原型系统包括: TelegraphCQ^[24]、NiagaraCQ、CQL (Continuous Query Language)^[10]、Aurora^[25]、Gigascop^[26]、Stream Mill^[27]等,其中斯坦福大学提出的 CQL 最为成熟,CQL 提供了三种操作符:数据流-关系、关系-关系、关系-数据流操作符,并以此完成转换和查询的全部过程。

此类模型的优点在于具有关系代数形式化基础的支持以及 SQL 语言直观的表达能力。其明显的缺点是:即便要进行一个简单的过滤处理,也必须经历由数据流到关系,再由关系到数据流的复杂转换过程;同时虽然该方法能够充分检测事件携带的数据信息,而对于事件间时序关系检测的支持却很少;另外由于其定义域为离散时间点,因此其还无法处理以时间间隔模型表示的事件。

2.5 语言模型

语言模型是 CEP 系统与外部沟通的接口,它允许用户从高层面声明预定义的事件模式。目前几乎每个 CEP 系统都给出了具有自身特点的语言模型,这些语言根据表达方式的不同,可以被分为两种类型。

1) 声明式语言。侧重于描述做什么及需要什么结果。该类语言以类 SQL 语言为基础,经过了与 CEP 处理相关的扩展而形成,其子句将被编译成为可执行的数据结构,而后由相应的检测机制具体执行,子句的声明可以是隐式或显式的(即是否明确列出),例如: CQL^[10] 采用隐式方式定义事件模式,而 SASE^[15] 则采用显式方式。该类语言具有简单易读、直观理解、操作透明的优点。

2) 命令式语言。侧重于描述怎样做,管理员需要通过可视化工具具体说明事件复合的执行过程。Aurora^[25] 即为极少数采用该方式的系统,其以有向无环图表示事件模式,复合事件查询被表示为联系的操作符方块,事件流有向的按照箭头

方向路由经过相应的操作符,从而到达复合节点。该类语言虽然定义过程复杂,但很容易进行操作符方块的合并,能够有效优化执行过程。

语言表达的丰富性决定了 CEP 系统检测能力的大小,因此部分系统另外采用了多种方法以增强其表达能力。例如:Oracle CEP^[28]采用了混合的语言模式,其不但使用声明式语言,同时提供图形化工具,允许用户以命令方式创建事件模式,该模式显然有效提高了语言使用的灵活性和可扩展能力。Cayuga^[16]允许在其 From 子句中嵌套使用子查询,该功能使得复杂事件的表示更加准确、方便。

2.6 优化模型

CEP 系统中的优化方法主要用于解决巨大滑动窗口和大量中间结果与内存受限之间的冲突问题,目前的研究大致包括以下几类:

1) 主动共享机制。用于避免重复计算,即将多个查询中的共有算子合并,或将处理的中间结果放入共享池,以供其他查询共同使用。此方法认为不论两个不同的查询经过怎样的路径,只要能够达到同一状态,即认为它们是等价的,可以进行合并。文献[29]研究了在非确定性自动机匹配过程中查询合并的算法,并通过与基本算法和回溯算法比较,证明了合并后的事件查询具有较高效率。

2) 索引技术。是实现快速查找的通用方法。在 CEP 处理过程中,处理引擎会在每个算子的堆栈中存储大量实例以保存当前状态,附加索引可有效提高实例的检索效率,此方面常用的有 Hash、B+ 树及其变形等索引方法。此外,文献[16]还指出索引的建立具有作用域,面向静态谓词匹配时需要建立全局索引,而动态谓词匹配则应建立节点内局部索引。

3 CEP 在物流物联网中的应用

研究 CEP 技术实践部署的方案及其在应用中发挥的作用,是了解其发展现状的另一个重要方面,鉴于相关研究所提出的 CEP 应用模型具有面向特定领域、且仅具备有限功能的特点,目前还没有能够全面呈现 CEP 技术功能的应用框架提出,由此,下面将以通用的物流物联网领域为研究对象,对 CEP 在大型系统中的综合应用部署进行设计,并对其所起到的关键作用进行总结。

3.1 应用框架模型

目前物流物联网应用面临的最主要问题是,如何高速处理在物理世界与数字世界之间流动的事件流,CEP 技术能够从多个层面综合地解决该问题,据此本文提出如图 2 所示的基于 SOA(Service Oriented Architecture)的应用框架模型以满足要求。该框架采用分层模块化思想设计,将事件流处理问题分解到不同作用的层次上,并利用细化的功能模块逐一解决,各模块以服务组件的形式进行封装。该框架具体结构如下,

1) 事件源层。该层包括大量异构的 RFID 读写设备以及传感器网络,并将持续地产生包含海量原子事件的事件流,这些原子事件具有冗余及不确定性。

2) 事件处理代理层。EPA(Event Processing Agent)是带有简单 CEP 处理功能的边缘接入节点(通常为直接与 RFID 读写器连接的 PC 工作站),由于上述原始事件的特点,EPA 中的 CEP 功能模块专门用于进行过滤噪声、无效、重复数据,修补错误数据等数据清洗及正确性判断的初步处理工作。

3) 服务组件层。本层实际可视为一个独立集中式的 CEP 服务,该服务接收来自 EPCIS(Economic Products Code

Information Service)或上层服务的订阅消息,处理来自 EPA 的事件流,向外实时发布业务复杂事件,其需要业务知识库、规则库的支持,具体决策中枢的作用。

4) 服务管理层。由于在 CEP 服务与其他高层应用服务间相互通信协作时同样会产生大量的事件流,因此为解耦耦合服务间的依赖关系,同时为更好地管理订阅/发布事件流以及实现智能的服务选择与聚集,本框架专门设计了带有 CEP 功能的 ESB(Enterprise Service Bus),并将其列为一层。

5) 业务逻辑层。该层向终端用户提供通用服务,这些服务间所产生的通信事件以及其向 CEP 服务提交的订阅事件将全部发往 ESB,并由其中的 CEP 智能部件处理。物流核心业务在该层以服务组件的形式被封装,由此可保证上层分布式应用的功能复用,并可灵活地应对未来频繁的业务变化。

6) 应用可视化层。本层综合利用下层各种业务应用服务,负责向用户提供良好的人机交互可视化图表界面,在为用户提供决策支持信息的同时,该层还应能够接受来自用户的配置、操作命令,向下层 CEP 组件发送订阅的复杂事件声明。

综合上述各层功能可以看出,该框架具有面向服务、支持分布式业务应用、异构数据源兼容、支持业务复杂事件处理以及服务管理智能化等优点。

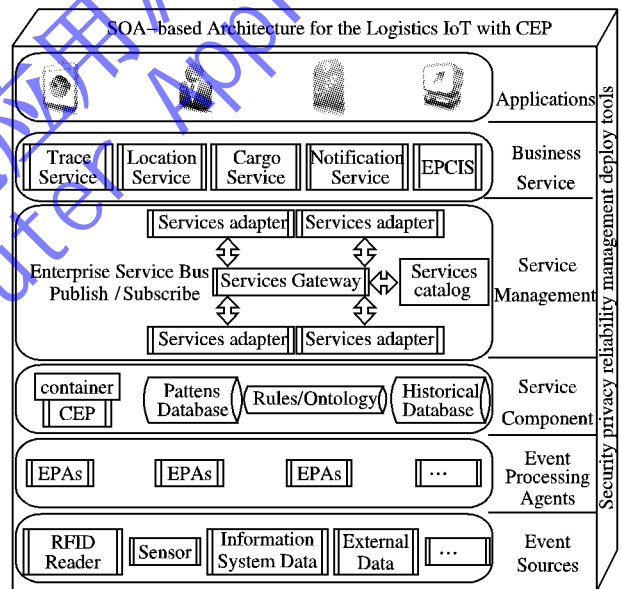


图2 基于SOA的物流物联网应用框架模型

3.2 CEP 在实践应用中的作用

从上述应用框架模型中可以看出,CEP 技术可渗透于整个系统之中。如果说物联网像是“神经系统”,能够将位于神经末梢的感知信息,传递给好比大脑的高层应用,那么 CEP 就是“中枢神经”,过滤上下流动的数据流,并整合加工成大脑能够理解的复杂信息。

在实际应用中 CEP 可以分布式、集中式、集群式等多种方式进行部署,并在系统中起到以下重要的作用:

1) 减轻网络负载。在底层对海量的物流事件进行即时处理,清洗过滤掉无关事件,仅传输业务相关事件。

2) 提高自动化。在中间层根据事件模式匹配时序、因果关系,产生业务应用需要的高级复杂事件。

3) 智能化服务。智能处理服务组件间通信事件,判断并触发相应业务行为。综上所述,CEP 技术能够大幅降低人工劳动量、降低网络通信量、提高业务处理效率、实时地为应用服务提供必要决策支持,其将在提高信息处理的智能化、自动化、高效化方面发挥重大作用。

4 目前存在的不足与未来的研究方向

当前, CEP 各方面关键技术的相关研究还不够完善, 其在物联网等领域中的应用也有待于自身的发展, 目前主要存在的问题和未来的研究方向如下。

1) 处理方式。随着事件流数据量的迅速增长, 集中式的 CEP 系统必将达到处理性能上的瓶颈, 单一处理引擎的工作方式必然向级联方式发展。阻碍 CEP 技术向分布式发展的关键因素为: ①外部因素。即底层(硬件、软件)的多样性以及 CEP 系统自身的异构性; ②内部因素。存在在分布式情况下规则库、知识库的查找、共享、部署与更新等技术难题。可以看出分布式处理的核心工作为任务的负载均衡, 根据 CEP 系统部署方式的不同(服务器集群方式、网络分布节点方式), 负载的分配可以选择中央服务器负载分配、层级式处理^[30]等方式。与网格、P2P(Peer to Peer)等网络技术的结合是该方向上的研究重点。

2) 处理能力。在检测类型方面, 对于有序事件流中的时序逻辑检测研究较为充分, 但对于从事件云中抽取相关信息, 并利用领域知识、环境信息, 进行检测的研究较少, 以自动机等模型为检测机制的时序检测具有较高的处理效率, 而以推理机为检测机制的语义检测能够推理出更多的复杂事件, 目前两者兼备的 CEP 系统还未出现; 在检测对象方面, 对于动态事件流处理研究较多, 而对于利用静态历史事件的研究较少; 在事件模式方面, CEP 系统仅能够执行固定事件模式匹配, 还不具备执行动态事件模式(即根据检测过程环境的变换, 响应调整后续的事件模式)以及自动发现新模式或存在问题模式的人工智能功能。显然这些表明 CEP 系统的检测及应用范围还相当有限, 因此, 分步的检测机制融合方法以及结合历史事件的检测方法等创新型工作亟待研究。

3) 安全机制。CEP 处理所涉及到的输入、输出事件中均包含大量信息, 这些信息将参与复杂事件的检测或业务流程工作, 同时这些事件需要在网络中路由转发, 因此, CEP 急需相应的安全及权限机制, 避免事件内容被篡改, 避免违规的订阅, 避免将有效信息暴露给非法用户, 而目前的 CEP 系统还基本不具备任何的安全机制^[3]。

限于篇幅, 以上仅给出了 CEP 目前所面临的重点问题, 此外, 离群事件检测、不确定性数据的处理能力^[31]、传感器数据的兼容能力、通用的优化模型、系统的可靠性等都是 CEP 能够得到广泛应用所要面临的挑战。

5 结语

CEP 是目前能够实现对 EDA 系统中事件流进行高速处理的先进技术, 对其现阶段的研究成果进行总结具有重要价值。本文给出了其区别于传统数据处理技术的显著特征, 并在分析以往研究工作的基础之上, 提出了一个包含事件表示、事件流表示、时间模型、约束模型、检测模型、规则模型、语言模型、优化模型、通知模型等 9 个组成模块的 CEP 系统通用结构模型, 该模型展现了 CEP 处理的一般过程, 通过与之比较能够全面分析现存 CEP 系统的完整性。随后本文对该模型重要组成部分所涉及到的关键技术及其形式化基础进行了综述, 重点总结了代数操作符、推理规则、数据关系等 3 种检测模型的核心思想、相关工作以及主要优缺点。同时为研究 CEP 技术的应用集成问题, 本文有针对性地提出了基于 SOA 的物流物联网应用框架模型, 详细描述了其在多个层次中的功能, 指出了其在减少人工、降低网络通信、提高软件智能、快速

服务响应等方面所起到的重要作用。最后还讨论了 CEP 当前研究的难题集中于处理方式、处理能力及安全机制等几个方面。CEP 因其重要性及复杂性, 现已成为了数据处理领域中一个独立的研究方向, 并必将在今后发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] LUCKHAM D. The power of events: an introduction to complex event processing in distributed enterprise systems [M]. Boston: Addison-Wesley, 2008: 3-4.
- [2] LEAVITT N. Complex-event processing poised for growth [J]. Computer, 2009, 42(4): 17-20.
- [3] BUCHMANN A, KOLDEHOFE B. Complex event processing [J]. IT-Information Technology, 2009, 51(5): 241-242.
- [4] MARGARA A. Combining expressiveness and efficiency in a complex event processing middleware [EB/OL]. [2012-12-20]. https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/56684/1/2012_02_PhD_Margara.pdf.
- [5] 张菊芳, 魏峻. 复合事件检测技术的综述与评价[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(10): 1-4.
- [6] LI M B, CHEN C. RFID complex event processing mechanism for logistics tracking and tracing [C]// IFCSTA'09: Proceedings of the 2009 International Forum on Computer Science-Technology and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2009: 44-48.
- [7] SASA A, VASILECAS O. Ontology-based support for complex events [J]. Electronics and Electrical Engineering, 2011, 113(7): 83-88.
- [8] 刘家红, 吴泉源, 甘亮, 等. InforSIB 中的复合事件时间模型[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(3): 390-397.
- [9] CHEN Q, LI Z, LIU H. Optimizing complex event processing over RFID data streams [C]// ICDE 2008: IEEE 24th International Conference on Data Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1442-1444.
- [10] ARASU A, BABU S, WIDOM J. The CQL continuous query language: semantic foundations and query execution [J]. The VLDB Journal, 2006, 15(2): 121-142.
- [11] DIAO Y, IMMERMANN N, GYLLSTROM D. SASE+: an agile language for Kleene closure over event streams [EB/OL]. [2012-12-23]. http://archive.systems.ethz.ch/www.dbis.ethz.ch/education/ws0708/adv_top_infsyst/papers/sase_tr07.pdf.
- [12] 何新贵. 事件代数与主动知识库系统[J]. 软件学报, 1994, 5(9): 23-29.
- [13] AKDERE M, CETINTEMEL U, TATBUL N. Plan-based complex event detection across distributed sources [J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2008, 1(1): 66-77.
- [14] LI G, JACOBSEN H. A. Composite subscriptions in content-based publish/subscribe systems [C]// Proceedings of the ACM/IFIP/USENIX 2005 International Conference on Middleware. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 249-269.
- [15] GYLLSTROM D, WU E, CHAE H J, et al. SASE: complex event processing over streams [C]// Proceedings of the 3rd Biennial Conference on Innovative Data Systems Research. New York: ACM Press, 2007: 1-5.
- [16] DEMERS A, GEHRKE J, PANDA B, et al. Cayuga: a general purpose event monitoring system [C]// Proceedings of the 3rd Biennial Conference on Innovation Data Systems Research. New York: ACM Press, 2007: 412-422.
- [17] SCHULTZ-MOLLER N P, MIGLIAVACCA M, PIETZUCH P. Distributed complex event processing with query rewriting [C]// Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems. New York: ACM Press, 2009: 4.

(下转第 2036 页)

通过实验数据可以看出,分块式存储模式的专用缓冲机制要远远优于 Linux 操作系统的文件缓冲。虽然分块式存储模式的磁盘空间占用率要比 ASPSeek 存储模式高出 25% 左右,相应的索引建立速度也要慢一些,但是其检索效率远远优于 ASPSeek 存储模式,该模式以空间换取了时间。

5 结语

本文对两种倒排索引存储模式的检索效率进行了对比,得出分块式存储模式的专用缓冲机制要远远好于 Linux 操作系统的文件缓冲。为了减少操作系统对搜索引擎的制约,可考虑绕过文件系统直接使用裸设备,避免磁盘碎片引起的额外寻道时间以及冗余的内存拷贝时间,完全自主地操作磁盘从而达到最优的性能。实验数据显示磁盘 I/O 是倒排索引检索性能的主要瓶颈,通过磁盘异步 I/O,将多次磁盘 I/O 合并以提高 I/O 速度,并将磁盘等待时间和 CPU 计算时间有效地重叠起来以提高系统整体的运行性能。

参考文献:

- [1] 袁津生,李群.搜索引擎基础教程[M].北京:清华大学出版社,2010.
- [2] 李晓明,闰宏飞,王继民.搜索引擎—原理、技术和系统[M].北京:科学出版社,2006.
- [3] MANNING C D, RAGHAVAN P, SCHUTZE H. An introduction to information retrieval [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [4] MARGARITIS G, ANASTASIADIS S V. Low-cost management of inverted files for online full-text search [C]// Proceedings of the 18th Association for Computing Machinery Conference on Information and Knowledge Management. New York: ACM Press, 2009: 2-6.
- [5] JARUSKULCHAI C, KRUENGKRAI C. Building inverted files through efficient dynamic hashing [EB/OL]. [2012-12-20]. <http://canasai.tellab.org/pubs/ncsec02-hashing.pdf>.
- [6] ZOBEL J, MOFFAT A. Inverted files for text search engines [J]. Association for Computing Machinery Computing Surveys, 2006, 38(2): 6.
- [7] 彭波,李晓明.搜索引擎倒排文件的一种分块组织技术[J].电子学报,2005,33(2):1-10.
- [8] 刘小珠,彭智勇,陈旭.高效的随机访问分块倒排文件自索引技术[J].计算机学报,2010,33(6):977-987.
- [9] 邓攀,刘功申.一种高效的倒排索引存储结构[J].计算机工程与应用,2008,44(31):149-152.
- [10] WITTEN I H, MOFFAT A, BELL T C. Managing gigabytes: compressing and indexing documents and images [M]. 2nd ed. Waltham, MA: Morgan Kaufmann, 1999.
- [11] ANH V N, MOFFAT A. Inverted index compression using word-aligned binary codes [J]. Information Retrieval, 2005, 8(1): 151-166.
- [12] SHIEH W-Y, SHANN J J, CHUNG C-P. An inverted file cache for fast information retrieval [J]. Journal of Information Science and Engineering, 2003, 19(4): 681-695.
- [13] 杨晓波.倒排文件索引缓存机制的优化[J].计算机系统应用,2012,21(5):96-99.
- [14] 吴文娟,车明.搜索引擎倒排索引技术的改进[J].微处理机,2006,27(6):83-85.
- [15] MARKATOS E P. On caching search engine query results [J]. Computer Communications, 2001, 24(2): 137-143.
- [16] SARAIVA P C, de MOURA E S, ZIVIANI N, et al. Rank-preserving two-level caching for scalable search engines [C]// Proceedings of the 24th Annual International Association for Computing Machinery Special Interest Group on Information Retrieval Conference on Research and Development in Information Retrieval. New York: ACM Press, 2001: 51-58.
- [17] model and architecture for data stream management [J]. The VLDB Journal, 2003, 12(2): 120-139.
- [18] 减传真,范玉顺.基于智能物件的实时企业复杂事件处理机制[J].机械工程学报,2007,43(2):22-32.
- [19] ANICIC D, FODOR P, RUDOLPH S, et al. A rule-based language for complex event processing and reasoning [C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Web Reasoning and Rule Systems. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 42-57.
- [20] AMARAL L A, HESSEL F P, CORREA J. Cooperative CEP-based RFID framework: a notification approach for sharing complex business events among organizations [C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on RFID. Piscataway: IEEE Press, 2011: 215-222.
- [21] YAO W, CHU C H, LI Z. Leveraging complex event processing for smart hospitals using RFID [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011, 34(3): 799-810.
- [22] LI M B, LI H. Research on RFID integration middleware for enterprise information system [J]. Journal of Software, 2011, 6(2): 167-174.
- [23] TEYMOURIAN K, PASCHKE A. Enabling knowledge-based complex event processing [C]// Proceedings of the 2010 EDBT/ICDT Workshops. New York: ACM Press, 2010: 37.
- [24] CHANDRASEKARAN S, COOPER O, DESHPANDE A, et al. TelegraphCQ: continuous dataflow processing [C]// Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. New York: ACM Press, 2003: 668-668.
- [25] ABADI D J, CARNEY D, CETINTEMELE U, et al. Aurora: a new
- [26] CRANOR C, JOHNSON T, SPATASCHEK O, et al. Gigascope: a stream database for network applications [C]// Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. New York: ACM Press, 2003: 647-651.
- [27] BAI Y, THAKKAR H, WANG H, et al. A data stream language and system designed for power and extensibility [C]// Proceedings of the 15th ACM International Conference on Information and Knowledge Management. New York: ACM Press, 2006: 337-346.
- [28] Oracle. Overview of Oracle CEP [EB/OL]. [2012-12-20]. http://docs.oracle.com/cd/E23943_01/doc1111/e14476/overview.htm.
- [29] AGRAWAL J, DIAO Y, GYLSTROM D, et al. Efficient pattern matching over event streams [C]// Proceedings of the 2008 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. New York: ACM Press, 2008: 147-160.
- [30] 王永恒,杨圣洪.RFID数据流分布式层次复杂事件处理[J].计算机工程与应用,2010,46(32):123-125.
- [31] KAWASHIMA H, KITAGAWA H, LI X. Complex event processing over uncertain data streams [C]// Proceedings of the 2010 International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing. Piscataway: IEEE Press, 2010: 521-526.

(上接第2030页)