

# 传感器网络中协作实时数据库事务的提交控制

胡 侃 刘云生

(华中科技大学计算机学院 武汉 430074)

**摘 要** 传统的事务模型由于其严格的 ACID 特性无法适应传感器网络中协作事务的实时性要求. 因此着重研究传感器网络中协作实时数据库事务的提交机制. 首先, 分析传感器网络中实时数据库应用的协作特性, 放松事务的严格 ACID 要求, 运用控制区域的概念提出一种基于事务的行为语义控制区域的事务模型. 然后, 给出该模型的提交、回滚、可见规则及能保证数据库一致性和协作事务实时性的三阶段提交协议, 并通过补偿事务保证外化信息准确性. 性能测试表明, 该模型及提交机制提高了采集数据的外化率和协作实时事务的成功率.

**关键词** 实时数据库事务; 事务模型; 协作事务提交; 流数据; 无线传感器网络

**中图法分类号** TP311

## A Submission Mechanism for Synergic Real-Time Database Transactions in Sensor Networks

HU Kan LIU Yun-Sheng

(Faculty of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** Providing efficient data service is one of the fundamental goals for sensor networks. The data service paradigm requires that coordinate concurrent transactions can report information to observers as accurately and quickly as possible. Traditional transaction models are not capable of guaranteeing real-time service for coordinate transactions due to strict ACID requirements on transaction. This paper focuses mainly on the submission control technique for synergic real-time database transactions in sensor networks. First the authors analyze the cooperative properties of real-time database transactions in sensor networks. By loosening strict ACID restrictions on transaction and establishing a sphere of control at a higher abstract layer for a set of synergic real-time transactions, the authors propose a three-layered transaction model based on the cooperative semantic meaning of synergic transactions in sensor networks. And the model is capable of providing efficient real-time service for a set of synergic transactions to process collected data while guaranteeing ACID features on database. Finally, the authors deduce the submission, back-rolling, visible regulations upon the model, and design a three-phrase submission protocol. The performance evaluations show that by applying the three-phrase submission protocol, the outer transformation ratio of collected data can be significantly enhanced and the amount of failed real-time transactions can be reduced correspondingly.

**Keywords** real-time database transaction; transaction model; synergic transaction submission; streaming data; wireless sensor network

收稿日期: 2006-05-15; 修改稿收到日期: 2007-01-03. 本课题得到国家自然科学基金(60073045)和博士点基金及国家预研基金(00J15.3.3.JW0529)资助. 胡侃, 男, 1962年生, 博士研究生, 主要研究方向为多元实时数据集成、移动数据管理及实时数据库. E-mail: hukan1227@163.com. 刘云生, 男, 1940年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为现代(实时、主动、内存、移动等非传统)数据库理论与技术及其集成实现、数据库与信息系统开发、实时数据工程、软件方法学与工程技术.

## 1 引言

传感器网络是信息感知和采集的一场革命. 它综合了传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术和通信技术, 能够协作地实时监测、感知和采集网络分布区域内的各种环境或监测对象的信息, 并对这些信息进行处理, 获得详尽而准确的信息, 并传送到需要这些信息的用户<sup>[1]</sup>. 因此, 这种网络系统可以被广泛地应用于环境监测、交通管理、医疗卫生等领域. 它作为一个全新的研究领域, 在基础理论和工程技术两个层面向科技工作者提出了大量的挑战性研究课题. 目前的研究还处于起步阶段, 主要集中在传感器网络技术和通信协议的研究, 也开展了一些感知数据查询处理技术的研究. 文献[2-3]提出了传感器网络中数据存储方法、变换初始感知为高级数据流的方法等; 文献[4]提出了几类新的通信协议; 文献[5-6]提出了传感器网络上可动态调整的感知数据连续查询方法、低能耗无线传感器网络中实现聚集函数的方法. 目前对实时数据库事务的研究都是在传统事务模型上考虑事务实时特性来展开的<sup>[7-9]</sup>, 这些事务模型要严格满足 ACID 的共同点因而不能适应传感器网络中传感器的协作性、移动性、断接性、能源有限等特点. 从应用层针对传感器网络开展的数据处理的数据库事务方面的研究尚少. 文献[10-11]考虑了事务的移动性、断接性, 但并未考虑传感器网络中最重要的协作特性. 此方面的研究者尚未发现. 本文试图以面向事务的思想, 结合传感器网络应用的协作性对传感器网络中实时数据库事务的执行行为进行分析并提出一种基于应用事务的行为语义的适于传感器网络应用的数据库事务模型, 并给出该模型的提交、回滚、可见规则及提交协议.

## 2 传感器网络中的实时数据库事务

### 2.1 传感器网络的概念及传感器网络应用的特点

我们可以如下定义传感器网络: 传感器网络是由一组传感器以 Ad Hoc 方式构成的有线或无线网络, 其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖的地理区域中感知对象的信息, 并发布给观察者<sup>[1]</sup>.

从上述定义可以看到, 传感器、感知对象、观察者是传感器网络的三个基本要素; 采集、融合、发布感知信息是传感器网络的基本功能; 一组功能有限

的传感器协作地完成大的感知任务是其重要特点; 另外传感器网络还具有 Ad Hoc 网络的移动性、断接性、电源能力有限、实时性等特点.

传感器网络应用的上述特点给我们带来了新的挑战. 传感器网络数据库系统应维护一个面向事务的应用层面, 支持具有上述特点的应用. 传统的事务模型已无法描述这种复杂事务, 需要新的功能强大的事务模型, 以此指导研究新的并发、恢复机制及系统结构.

### 2.2 传感器网络中实时数据库事务

在传感器网络中, 实时数据库事务要对传感器采集的反映监测区域监测对象的实时数据进行分析处理, 处理结果应及时地外化给观察者. 分析处理过程中要使用系统数据库中的共享数据(SQL 数据). 传感器采集的实时数据通常经过采集、融合处理后存于实时数据库(RTDB)中. 如图 1 所示.

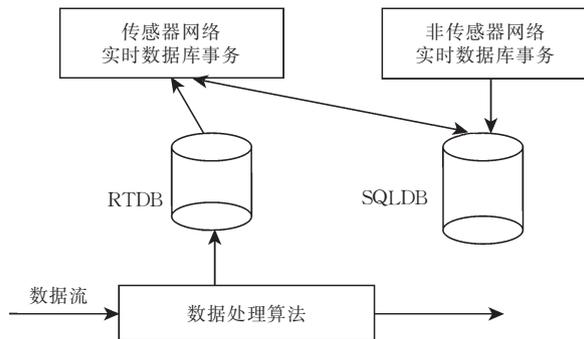


图 1 传感器网络中实时数据库事务

实时数据库中存放着由传感器采集的描述感知区域中感知对象的实时数据, 该数据带有时间标记, 其值和时标反映了感知对象在某时刻的状态信息. 这里的实时数据库泛指计算机内存放实时流数据的数据结构, 传统的数据模型采用实时数据库或数据仓库, 现在通常使用概要数据结构(synopsis data structure)<sup>[12]</sup>. 实际应用中, 实时事务通常读取实时数据库中的实时流数据进行分析处理, 实时数据一经处理, 除非特意保存, 否则不能被再次使用, 它们在实时数据库中的存放时间有个有效期, 超过有效期会有新的不受系统控制的实时数据到达. 非传感器网络实时事务仅使用 SQL 数据.

### 2.3 传感器网络中实时协作事务

传感器网络应用环境中, 协作性是它的一个重要特性. 一组功能有限、各自独立的传感器相互协作地完成一个大的感知任务, 因此实时传感器网络应用往往由多个独立的实时事务协作完成. 而协作性要求事务间的完全的可见性<sup>[13]</sup>. 图 2 表明了基本的

## 实时数据库事务间的合作.

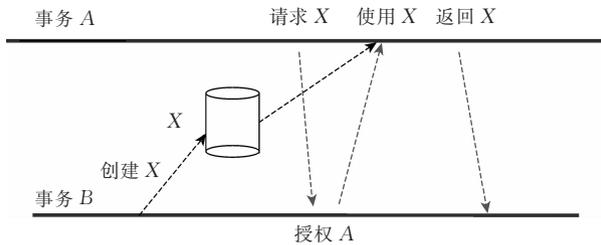


图 2 协作事务

A、B 是两个独立执行的实时数据库事务. 他们通常是由传感器采集数据独立驱动的, 对不同的协作完成感知任务的传感器采集的监测对象的不同信息进行处理, 最终外化给观察者有关监测对象的一个全局综合信息. 协作性使得 A、B 执行时相互间可同步地使用共享 SQL 数据 X, 但它们又应该可以相互独立的提交而不能因为相互提交依赖而影响实时性.

这样一个协作事务把未提交的对象暂时放出去, 随后又把他们再请回来的方法是一种基本的协作方式. 这意味着协作事务间在一些同步点上应可获得对方持有的锁, 从 ACID 的角度来看, 这导致了协作事务的相互提交依赖而不能各自独立提交, 最终影响了事务的实时提交, 使得他们因超截止期而失败.

对这种实时协作行为, 现有的事务模型无法支持. 下面给出一种基于事务间应用语义依赖的事务语义行为控制区域模型.

## 3 基于实时数据库事务语义行为控制区域的事务模型

### 3.1 传感器网络实时应用中的事务执行模型分析

通常的实时应用环境中, 实时任务的执行模型往往是事件触发独立运行的. 这些独立运行的任务又相互合作完成实时应用. 它们分别对传感器采集的描述监测区域中监测对象的流数据 (streaming data) 进行分析处理, 给系统观察者提供关于感知对象的信息以便他们决策. 与这种执行方式相适应, 我们将一个传感器网络实时数据库事务 (SNRTT) 看作由多个相互协作的描述复杂实时任务处理过程的复合实时数据库事务 (CRTT) 组成. 每个复合实时数据库事务是一个功能独立的事件 (如传感器采集数据) 触发的各自独立的执行单位, 对传感器采集的描述外界感知对象的实时流数据进行分析处理 (使用 SQL 数据库), 处理结果外化给系统观察者. 为保证系统数据库状态转换的正确性, SNRTT 的执行

行为应满足 ACID. 为了描述复杂的实时分析处理过程, 一个 CRTT 的逻辑结构可看作是事件驱动的用数据流程图模型<sup>[14]</sup> 描述的独立执行的事务 workflow<sup>[15]</sup>. 每个节点是一个数据驱动的对系统 SQL 数据库原子的、隔离的 (满足 ACID 中的 A、I 特性) 的扁平结构的实时数据库事务 (ARTT). 它对描述监测对象的实时采集流数据进行分析处理 (使用 SQL 数据库), 产生中间导出的实时数据通过边流向其它节点. 这种以基本扁平事务为粒子, 对实时流数据分析处理的同步数据流合作逻辑可以描述一个复杂的传感器网络实时任务. 每个事务流描述的 CRTT 又相互协作地 (如图 2) 完成一个复杂的传感器网络应用 (SNRTT). 协作性要求 CRTT 之间对数据库对象的可见性. 为此, 一个 CRTT 一次执行过程中, 每个 ARTT 提交的 SQL 对象对其它的与它具有应用语义上协作关系的 CRTT 一次协作执行是可见的, 而不必等到该事务流提交, 即 CRTT 的一次动态执行行为对相互协作的其它 CRTT 的执行过程仅满足 A 特性. 按照这样的分析, 系统事务对象由三层结构组成. 如图 3 所示.

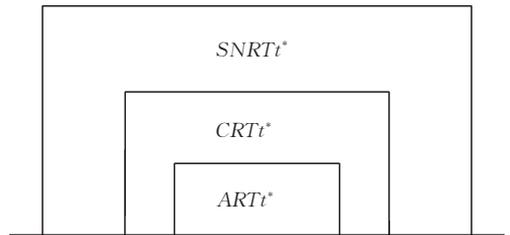


图 3 传感器网络实时数据库管理系统中的事务对象

为描述统一起见, 我们将事务静态定义为类型, 分别记做 SNRTT、CRTT、ARTT. 它们的一次执行过程称为实例, 同一对象类型的两次执行是两个不同的实例, 记  $SNRTt^*$ ,  $CRTt^*$ ,  $ARTt^*$  分别代表所有传感器网络实时数据库事务实例集合、复合实时数据库事务实例集合、扁平实时数据库事务实例集合.

扁平实时数据库事务实例在底层, 是系统的基本粒子, 它的执行是数据驱动的且执行行为对 SQL 数据库应满足 A、I 特性; 中间层是复合实时数据库事务实例, 它由具有数据流程图合作逻辑关系的下层元素复合组成, 它的执行是由独立的事件驱动的且执行行为对 SQL 数据库满足 A 特性; 最上层是传感器网络协作实时数据库事务实例, 它由具有应用语义协作关系的异步执行的中间层元素组成, 其执行行为对 SQL 数据库应满足 ACID 特性, 它是系统随着时间的进展、系统内事务对象状态的变化自

动生成的一个 ACID 控制单元。

**定理 1.** 上述三层事务模型中,若任意一个下一层的元素有且只有一个上一层的父元素,则系统只要保证最上层元素的 ACID 即保证了系统数据库的一致性。

证明. 因为系统数据库的状态转换是由系统中数据库事务完成的,若一个数据库事务具有 ACID 特性,则该事务的任意一次执行必将数据库从一个正确状态转换为另一个正确状态,在状态转换过程中数据库状态可以有暂时的不一致. 在上述三层事务模型中,系统中所有数据库事务的执行分为三种类型,按照已知条件, $CRTt^*$ , $ARTt^*$  中的事务实质是  $SNRTt^*$  中事务的子孙事务,因此,从最高的抽象层来看,系统数据库是由  $SNRTt^*$  中事务进行状态转换的,其它两种事务可看作是  $SNRTt^*$  事务的内部操作,它们可以使数据库状态出现暂时的不一致,只要所有  $SNRTt^*$  中事务是满足 ACID 特性,则可保证数据库的一致性. 证毕.

### 3.2 基于事务行为语义依赖的数据库事务模型

基于上述三层事务模型,我们给出传感器网络中实时数据库事务的定义如下。

**定义 1.** 任意两个不同事务类型  $CRTT_i$ 、 $CRTT_j$ ,记它们的一次执行(事务实例)分别为  $CRTt_i$ 、 $CRTt_j$ ,若  $CRTt_i$ 、 $CRTt_j$  分别是对一组协作完成一个感知任务的不同传感器采集的数据进行分析处理的执行过程且这些采集数据的时标相同(或非常接近),则称  $CRTt_i$ 、 $CRTt_j$  之间存在应用语义依赖关系。

**定义 2.** 若一个事务实例集合  $CRTt^+ \subseteq CRTt^*$ ,其中任意两个不同元素之间存在应用语义依赖关系,则它是一个应用语义依赖集。

**定义 3.** 一个传感器网络数据库事务是一个三元组  $SNRTt = (CRTt^+, R, C)$ ,其中  $CRTt^+$  是一个事务实例有限集合, $CRTt^+ = \{CRTt_i | i = 1, \dots, n\}$ .  $\forall CRTt_i \in CRTt^+$  是一个实时的事务工作流, $CRTt_i = \{ARTt_j | j = 1, \dots, m\}$  是由一组原子事务组成的集合.  $\forall ARTt_j \in CRTt_i$  是一个扁平结构的数据库事务.  $R$  是  $CRTt^+$  上的应用语义依赖约束,限制  $CRTt^+$  是一个应用语义依赖集.  $C$  是  $SNRTt$  的行为特征约束,限制  $SNRTt$  应满足对数据库对象的 ACID 特性,同一个  $SNRTt$  的儿子  $CRTt_i$  之间应满足 A 特性,同一个  $SNRTt$  的所有子孙  $ARTt_j$  之间应满足 A、I 特性。

该事务模型的基本思想是放宽系统中事务对象

的严格 ACID 特性,允许独立执行的数据库事务的执行行为不必满足 ACID 而提交,但系统会根据事务的应用语义自动建立一个更高层次的相互协作事务间行为语义的动态控制区域,该区域是系统控制实时数据库协作事务将数据库状态正确转换的一个 ACID 控制单位,它被作为一个顶层事务在系统中存在. 上述事务对象的层次模型中,下面层的事务对象只需满足松弛原子性. 异步独立执行的只具有 A 特性的兄弟中间层事务,因不隔离而可以满足传感器网络应用中协作事务的可见性,松弛的 A 特性保证了协作事务对实时采集数据处理结果外化给观察者的实时提交,不会因为严格 ACID 特性而推迟其提交,影响系统对采集实时流数据的分析处理结果外化的实时性. 底层具有 A、I 特性的简单扁平结构的事务作为组成上层元素的基本粒子,保证了异步执行的中间层相互协作事务之间在关键点上对数据库对象可见的同步合作关系. 顶层事务是系统根据应用语义自动建立的一个动态控制区域. 系统只需保证最上层元素(异步协作事务流实例组)执行行为的 ACID,从而隐含保证了低层次上的扁平事务、事务流的执行自动满足 ACID,实现了数据库状态转换的完整性、一致性. 我们这里的层次模型既不同于层次事务模型也不同于嵌套事务模型. 传统的层次事务模型是将数据库对象进行分层,例如将上层两个元组对象  $s, t$  与一个下层页面对象对应,一个页面对象中的两个元组实质是物理上隔离的. 系统通过这种结构逐渐复杂的对象层次影射对应关系,保证事务对最上层数据库元素的 ACID 从而达到保证对下层所有对象行为影响的 ACID. 这种模型主要用于数据库的实现,不适于描述传感器网络中应用. 嵌套事务模型中子事务的执行是受父事务控制的,因此无法描述异步独立执行的事务之间的同步合作问题,它只是对复杂长事务的精细回滚控制提供了一个有力的方法. 我们的模型中子  $CRTt$  的执行是事件驱动的独立行为,不受父  $SNRTt$  的直接控制. 系统根据应用语义自动形成  $SNRTt$ ,它实质上是系统根据协作事务间的应用语义关系自动生成的一个保证数据库状态正确转换的 ACID 控制区域。

基于此模型,系统主要需解决以下几个问题:  
(1) 协作语义的一致性. 一个 CRTT 会多次执行(多实例问题),其执行时间是无法确定的. 系统如何区别出一组协作 CRTT(SNRTT)中的一个 CRTT 的哪一个实例( $CRTt$ )与另一个 CRTT 的哪一个实例是应用语义上的一组合作实例(即同一个  $SNRTt$

中的元素). (2) 时间一致性, 一个控制区域  $SNRT_t$  中的每个独立  $CRT_t$  所处理的采集流数据应是监测区域中监测对象同一时刻的信息. (3) 系统如何保证  $ART_t$  的 A、I 特性,  $CRT_t$  的 A 特性及  $SNRT_t$  的 ACID 特性.

对于这几个关键技术问题, 限于篇幅我们已另文提出一种基于时间依赖关系的事务模型, 它能够有效地解决上述问题. 本文仅针对该模型给出传感器网络事务的提交、回滚、可见规则及相应的三阶段提交协议 (Three-Phrase committing protocol).

## 4 语义依赖事务模型的行为规则及提交、回滚协议

### 4.1 事务的行为规则

基于上述应用语义依赖的事务模型, 传感器网络中实时数据库事务的行为可以归结为如下三点.

**提交规则.** 一个原子实时事务  $ART_t$  的提交仅仅是一个  $CRT_t$  的一个子事务的结束. 它通常不外化处理结果, 它使用的 SQL 对象提交后对其祖先事务的所有子孙可见. 它对数据库对象的持久性影响由  $SNRT_t$  控制, 要等到  $SNRT_t$  提交时决定. 一个  $CRT_t$  的所有子事务都提交则它正常提交. 它是独立执行的, 其开始不受其它事务的显式控制, 它的提交也是独立的, 不受同层兄弟及父事务的提交依赖影响, 提交时可以外化它对实时采集数据的分析处理结果.  $SNRT_t$  的每个子  $CRT_t$  都提交且是正常提交, 则  $SNRT_t$  提交. 此时, 它所有子孙事务使用的 SQL 对象对数据库产生持久性的影响, 外界可见. 若  $SNRT_t$  的每个子  $CRT_t$  都提交且至少有一个子  $CRT_t$  是非正常提交 (见下文), 则  $SNRT_t$  回滚. 系统自动使用补偿事务通知外界该  $SNRT_t$  已外化的部分信息可能有较大偏差来消除已外化的影响且其所使用的 SQL 对象不写入数据库. 若  $SNRT_t$  的某些子  $CRT_t$  因为传感器的断接性、能源有限性等原因而无法执行, 则  $SNRT_t$  将因超时回滚, 系统的补偿事务中还要通知观察者相应的传感器有问题, 以便观察者处理.

**回滚规则.** 一个  $ART_t$  的回滚仅仅是它在自己工作区的 RESTART, 数据库不受任何影响. 一个  $CRT_t$  的回滚只是它的执行的中止. 即禁止未开始子事务的执行, 中止已开始但未结束执行的子事务, 对已提交的子事务由于其未对数据库产生任何影响而不做任何操作, 不影响其它的兄弟  $CRT_t$  (尽管它

们可能已使用了该  $CRT_t$  的子事务提交的数据库对象而提交依赖) 的执行 (因为其它  $CRT_t$  可能外化不精确但有价值的结果), 也不影响  $SNRT_t$  的执行, 但影响  $SNRT_t$  的提交. 因传感器事务的周期性、实时性,  $CRT_t$  的 RESTART 已没有意义, 所以  $CRT_t$  的回滚可以看作是特殊的非正常提交. 一个  $SNRT_t$  的回滚 (超时) 则意味着系统禁止它的未开始的子事务的执行, 回滚它的已开始但未结束的子事务, 禁止它的未开始的子事务的执行, 使用的 SQL 对象不写入数据库, 释放它们的锁, 系统自动地通过补偿事务消除已提交的子事务的已外化的影响并通知观察者与未开始子事务相关的传感器可能有问题.

**可见规则.**  $ART_t$  是申请锁的单位,  $SNRT_t$  是释放锁的单位, 一个  $ART_t$  使用的锁在其提交后由祖先  $SNRT_t$  持有,  $SNRT_t$  持有的锁可以传递给所有子孙  $ART_t$ , 但对其它  $SNRT_t$  隔离.

### 4.2 提交、回滚协议

按照上述模型, 我们给出传感器网络实时数据库事务的三阶段提交、回滚协议, 具体描述如下:

ARTT 管理器.

IF  $ART_t$  提交 THEN

修改该  $ART_t$  状态, 调用 CRTT 管理器的 COMMIT-SUB(trid) 通知父事务, 将其持有的 SQL 对象锁传递给根事务, 正常提交该事务.

IF  $ART_t$  回滚 THEN

调用 ARTT 管理器的 ABORT-SUB(trid), RESTART 该事务.

IF  $ART_t$  中止 THEN

调用 ARTT 管理器的 KILL-SUB(trid), 将其持有的 SQL 对象锁传递给根事务, 中止该  $ART_t$  的执行.

CRTT 管理器.

IF  $CRT_t$  的所有子  $ART_t$  正常提交 THEN

修改该  $CRT_t$  状态, 调用 SNRTT 管理器的 COMMIT-SUB(trid) 通知父事务, 正常提交该事务.

IF  $CRT_t$  回滚 THEN

禁止该  $CRT_t$  的未开始子事务的执行, 中止已开始且未结束的子事务, 调用 SNRTT 管理器的 ABORT-SUB(trid) 通知父事务, 非正常提交该事务.

SNRTT 管理器.

IF  $SNRT_t$  的所有子  $CRT_t$  都提交 THEN

IF  $SNRT_t$  的所有子  $CRT_t$  都正常提交 THEN  
将其所有 SQL 对象写入 DB, 释放所有锁, 提交该事务

ELSE

其所有 SQL 对象不写入 DB, 释放所有锁, 并调

用应用补偿事务通知外界其已外化的结果可能有误, 结束该事务。

IF SNRT<sub>t</sub> 回滚(超时) THEN

其所有 SQL 对象不写入 DB, 释放所有锁, 并调用应用补偿事务通知外界其已外化的结果可能有误, 相应未开始子事务的传感器可能有问题, 结束该事务。

## 5 性能分析

### 5.1 相关模型对比

传统的扁平事务“要么全做, 要么全不做”的特点既是优点也是缺点. 它用最简单的扁平逻辑描述事务及操作对象的结构, 用最简单的方法处理所有的失败语义, 它旨在通过保持事务的 ACID 特性维护系统对象的一致性、完整性. 嵌套事务对扁平事务进行了改进, 它形成了一个层次的控制框架. 这种框架对描述具有复杂结构的应用及对回滚范围进行精细控制提供了有力的机制, 它对解决分布环境下复杂长事务问题是有效的. 其内部父子事务间使用对象有一定的可见性, 但独立执行的子事务之间对 SQL 对象是不可见的且子事务的执行行为受父事务控制. 尽管该模型可控制子事务外化数据的正确性, 但推迟了子事务的完成时间(也影响父事务时间). 而在传感器网络实时系统中外化结果的正确性包括时间和值两方面, 对外化值的精确性往往是允许有偏差的. 多级事务是嵌套事务的一般化的版本, 其实质是一种能预先提交子事务结果的嵌套事务. 这种能力增加了系统的事务吞吐率, 但这种预先提交的子事务是基于将操作对象层次化的实现模式, 系统通过隔离高层对象来保护较低层次上的修改, 且假设存在一个补偿事务可以在语义上消除子事务已经完成的操作. 操作对象上的一个操作是由子事务在更低层的操作对象上完成的, 其原理依赖于对象的映射层次, 而不是包含层次. 例如, 元组  $X$ 、 $Y$  映射为同一个低级别的对象页面  $P$ , 这使得一个对  $X$  操作的父事务在其子事务对  $P$  修改提交后, 另一个对  $Y$  操作的父事务的子事务可以马上使用  $P$ , 由于高层的  $X$ 、 $Y$  是隔离的, 每个子事务使用同一对象  $P$  时, 实质是相互隔离地使用  $P$  中自己的空间, 因此, 两个父事务实质还是隔离的. 它是一种精细调整提交控制粒度的方法, 对系统的实现是有意义的. 另外有针对长时间运行的复杂事务的契约模型, 实现异构多数据库事务的柔性事务模型及迁移事务模型等, 但上述所有事务模型由于其本质上均是一种满足严格 ACID 的事务, 因此无法描述传感器网络

中事务的协作性.

两层结构的事务 workflow 模型由于其放宽了事务流的 ACID 特性而使得不同事务流之间具有协作性, 但系统为了避免不同事务流之间的依赖关系要求底层原子事务是严格满足 ACID 的单元, 这样一个事务流的回滚并不导致其它使用了该事务流内部子事务提交对象的事务流的回滚. 这种通过底层事务的 ACID 保证上层事务的 ACID 方法存在系统无法控制一个事务流外化结果的语义完整性. 另外它还要求每个底层原子事务必须具有一个语义补偿事务, 当一个事务流回滚时, 系统通过语义补偿事务来消除已提交 ACID 子事务对数据库的影响, 在实际应用中, 无法满足每个 ACID 子事务都有一个语义补偿事务.

我们的基于应用语义依赖的三层事务模型放宽了隔离性, 使得事务间具有协作性、可见性. 事件驱动方式使得实时事务的执行是独立的行为, 这符合实时任务通常是传感器中断驱动模式的情况. 系统根据语义依赖关系自动建立更高的提交控制区域. 它将应用语义与数据时间相联系, 将数据时间与事务的时间相联系, 从而将应用语义与事务执行过程相联系, 保证应用在更高的语义层次上的 ACID 特性. 这样既保证了系统数据库的一致性、完整性又不影响事务的提交实时性, 同时系统对提交事务的外化结果建立了一个语义完整性的控制单位, 同时考虑了传感器网络断接性、能源有限性等因素. 因为目前还没有能解决不可逆操作的事务模型<sup>[16]</sup>, 我们的模型对 CRT<sub>t</sub> 外化结果的处理上采用了简单的通知式补偿事务. 这要求编程者在编程时仔细考虑 CRT<sub>t</sub> 外化结果的选取. 例如对重要的处理结果, 当 SNRT<sub>t</sub> 正确提交时这些数据才可外化, 其它事务可以先部分外化一些不会导致灾难性后果的数据. 这是符合传感器网络实时应用特点的, 因为传感器网络提供给观察者的值是允许有误差的, 我们只是将一个可能有较大误差(但可能有用)的值先实时地外化给观察者, 随后又通知观察者该值可能有误. 显然不要出现一个 CRT<sub>t</sub> 通知发射导弹, 系统在随后的 SNRT<sub>t</sub> 提交时又补偿通知发射导弹信息可能有误的情况.

本文所述模型适应于传感器网络环境中对监测区域中监测对象的大量采集流数据的分析、处理实时监测系统.

### 5.2 实验结果分析

我们在由国家自然科学基金资助、自行研制的分布式主动实时数据库原型系统 ARTs-II 上模拟传感器网络计算环境完成了模型的性能测试. 从两

个方面进行测试:一是在外部数据高于系统数据处理时间下系统对高速数据的接受能力,测试指标为外化率  $MR = \text{外化数据数量(单位时间观察者看到数据)} / \text{采集数据数量(单位时间输入系统的采集数据)} \times 100\%$ .二是在系统任务繁重(调整并发执行的协作事务数量)下对外部数据的实时响应能力,测试指标为事务的超截止期比率  $DR = \text{超截止器事务数量} / \text{协作事务总数} \times 100\%$ .表 1 是主要测试参数.

表 1 模拟参数

参数	值
测试时间	10s
节点数	5
平均包传送时间	316 $\mu$ s
数据传送周期	10~100ms
数据库尺寸	500
子事务数	1~30
每个子事务中的操作数	5~15

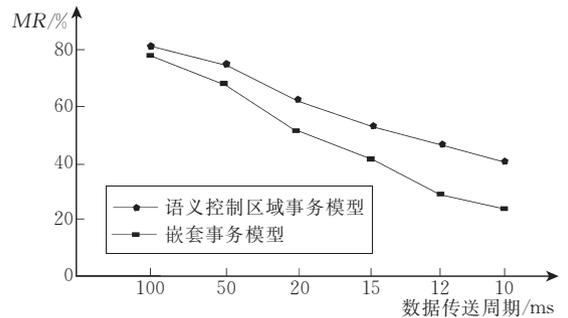
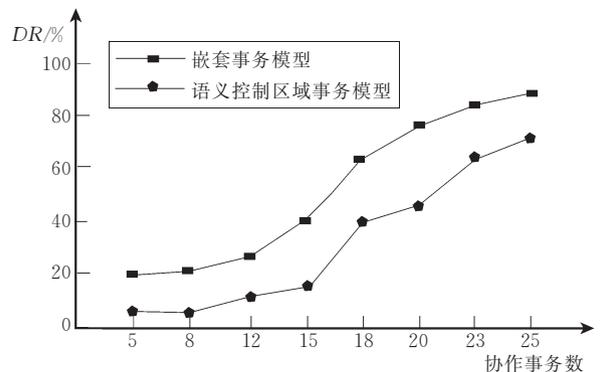
在第一种情况下,我们采用由两个传感器采集数据,通过改变采样周期,对同样一个应用分别用嵌套事务、应用语义依赖事务模型进行测试.实验例程为系统对 A、B 两个不同工作站点上采集的代表监测区域不同地点的温度值进行分析处理,使用图形方式分别显示每个地点及整个区域的温度变化情况.若采用嵌套模型,为保证采集数据的时间一致性,当两个端口缓冲区都有数据时才驱动嵌套事务执行.一个缓冲区先满,新到的采集数据自动覆盖先前的数据直到另一个缓冲区满.该模型下,应用由一个父实时温度分析事务及三个子事务组成:两个分别显示 A、B 点温度的子事务及一个显示全局温度的子事务.若采用我们的应用语义依赖事务模型,应用由三个独立的协作事务组成,它包括两个分别在 A、B 站点由该点缓冲区满驱动的处理、显示局部温度并将导出结果交给实时导出数据管理器的事务及一个由导出数据(A、B 点温度导出值)驱动的显示全局温度的事务.

图 4 是采样周期对  $MR$  的影响.可以看出,当采样周期越小,语义依赖提交方式的  $MR$  值明显优于嵌套方式,这是语义依赖模型放宽 ACID 特性提高了系统并发性、实时性的特点.

在第二种情况下,我们通过改变并发执行的协作事务数量,对一组周期执行的协作事务分别使用应用语义依赖事务提交机制及按照实时事务提交机制进行测试.按照传统的事务模型,两个独立执行的事务是隔离的而无法协作.因此采用一种实时事务提交方式进行测试:当一个事务使用了另一个并发事务的数据时,该事务的提交依赖于另一个事务的提交<sup>[13]</sup>.提交算法为一个协作事务的提交仅当其所

有提交依赖的事务都已提交才能提交,回滚算法使用级联回滚方法.

图 5 是两种提交机制对  $DR$  的影响.测试结果表明,语义依赖提交方法的事务成功率要高于传统的事务提交方法,即因超截止期而失败的事务数要少.当系统负载增大,特别在一组协作事务的是长短不一的事务时,语义依赖提交方法的  $DR$  值明显要优于传统的事务提交方法.这是语义依赖提交在保证数据库的一致性的前提下,通过补偿事务放宽了事务的提交限制带来的益处.

图 4 采样周期对  $MR$  的影响图 5 并发协作事务数量对  $DR$  的影响

## 6 结束语

传统的事务模型不能较好地支持传感器网络中实时事务的协作执行,它们主要是为保证系统一致性完整性设计的.本文将应用语义与系统中运行的事务相结合,提出一种基于实时事务间使用实时数据的语义依赖关系的三层事务模型,既保证了实时事务的协作性、实时性,提高了系统分析处理复杂传感器网络应用的能力,又保证了系统数据库对象一致性.并给出了基于此模型的提交规则、回滚规则、可见规则及提交、回滚协议.通过模拟实验进行测试,证明其提高了对外部监测数据的系统协作处理能力及时协作事务的成功率.该技术适合对传感器网络实时应用环境中高速的外部采集数据进行周期性的协作分析和处理.

## 参 考 文 献

- [1] Tilak S, Abu-Ghazaleh N B, Heinzelman W. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *Mobile Computing and Communications Review*, 2002, 1(2): 1-8
- [2] Ratnasamy S, Karp B. GHT: A geographic hash table for data-centric storage//Reghavendrv C S ed. *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*. New York: ACM Press, 2002: 94-103
- [3] Girod L, Bychkovskiy V, Elson J, Estrin D. Locating tiny sensors in time and space: A case study//Manoli Y, Kim K S eds. *Proceedings of the International Conference on Computer Design*. Piscataway: IEEE Press, 2002: 195-204
- [4] Rentala P, Musunuri R, Gandham S, Saxena U. Survey on sensor networks. University of Texas at Dallas; Technical Report UTDCS-33-02, 2002
- [5] Madden S R, Szewczyk R, Franklin M J, Culler D. Supporting aggregate queries over Ad-Hoc wireless sensor networks//Kindberg T ed. *Proceedings of the Workshop on Mobile Computing and Systems Applications*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002: 49-58
- [6] Madden S R, Shah M A, Hellerstein J M, Raman V. Continuously adaptive continuous queries over streams//Franklin M J, Moon B, Ailamakj A eds. *Proceeding of the SIGMOD Conference*. New York: ACM Press, 2002: 49-60
- [7] Bonnet P, Gehrke J E, Seshadri P. Towards sensor database systems//Tan K-L, Franklin MJ, Lui J C S eds. *Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile Data Management*. Hong Kong: Springer-Verlag, 2001: 3-14
- [8] Liu Yun-Sheng, Li Guo-Hui. Nested transaction in real-time database systems. *Journal of Software*, 1999, 10(5): 552-556(in Chinese)  
(刘云生, 李国徽. 实时数据库系统中的嵌套事务. *软件学报*, 1999, 10(5): 552-556)
- [9] Yoon Y. Transaction scheduling and commit processing for real-time distributed database systems[Ph. D. dissertation]. Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1994
- [10] Kayan E, Ulusoy O. Real-Time transaction management in mobile computing systems//Chen A L P, Lochovsky F H eds. *Proceedings of the 6th International Conference on Database Systems for Advanced Applications*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1999: 127-134
- [11] Lam K Y, Kuo T W, Tsang W H et al. Concurrency control in mobile distributed real-time database systems. *Information Systems*, 2000, 25(4): 261-286
- [12] Babcock B, Babu S, Datar M, Motwani R, Widom J. Models and issues in data streams//Popa L ed. *Proceedings of the 21st ACM SIGACT-SIGMOD-SIGART Symposium on Principles of Database Systems*. Madison: ACM Press, 2002: 1-16
- [13] Liu Yun-Sheng. *Advanced Database Technology*. Beijing: National Defence Industry Press, 2001(in Chinese)  
(刘云生. *现代数据库技术*. 北京: 国防工业出版社, 2001)
- [14] Whiting P G, Pascoer S V. A history of data-flow languages. *IEEE Annals of the History of Computing*, 1994, 16(4): 38-59
- [15] Alonso G, Agrawal D, Abbadi A et al. Advanced transaction models in workflow contexts//*Proceedings of the International Conference on Data Engineering*. New Orleans, 1996: 574-581
- [16] Gray J, Reuter A. *Transaction Processing: Concepts and Techniques*. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1993



**HU Kan**, born in 1962, Ph.D. candidate. His main research interests include mobile database, real-time database and data integration.

**LIU Yun-Sheng**, born in 1940, professor, Ph.D. supervisor. His main research interests include advanced database, real-time database, active database, mobile database and their integration technology, real-time data engineering, software methodology and engineering technology.

## Background

The research is supported by the National Natural Science Foundation of China under grant No. 60073045, the National Pre-Research Foundation of China under grant No. 00J15. 3. 3. JW529.

Wireless sensor networks are a significant technology attracting considerable research attention in recent years and pose many new challenges for computer researchers. Much work has been focusing on energy efficient routing to maximize network life time, effective target tracking for certain applications. However, providing efficient data service is one of the fundamental goals for sensor networks. The data service paradigm requires that coordinate concurrent transactions can report information to observers as accurately and quickly as possible. The research group of authors has entered in the

field of real-time data management system over twenty years and gained many achievements in the field. They have published more than 100 high-quality papers in related conferences and journals. And they also have developed an active real-time database management system (ARTs-II) and an embedded real-time operating system (ARTs-OS). This paper focuses mainly on the submission control technique for synergic real-time database transactions in sensor networks. Integrating application knowledge of sensor networks into the design and implementation of software, the authors propose a new transaction model for coordinative concurrent real-time database transactions, reduce the submission, back-rolling, visible regulations upon the model, and design a three-phase submission protocol.