

传感器网络中的查询处理体系结构研究

张文涛, 贾小华, 黄传河

(武汉大学 计算机学院 信息系, 湖北 武汉 430072)

摘要: 介绍了传感器网络中查询处理的一些基本概念和性质, 形象地描述了查询处理的体系结构, 并对其中用到各项技术进行了介绍和分析, 同时还对该领域的研究热点进行了分析和展望。

关键词: 传感器网络; 查询处理; 数据聚集

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1001-3695(2006)02-0216-04

Research on Architecture of Query Processing for Sensor Networks

ZHANG Wen-tao, JIA Xiao-hua, HUANG Chuan-he

(Dept. of Information, School of Computer, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China)

Abstract: The architecture of query processing for sensor networks is exploited. After describing general architectural diagram of sensor network's query processor, some most-used techniques in it is exploited. The advance of the research on data processing in sensor networks is also presented.

Key words: Sensor Networks; Query Processing; Data Aggregation

近来, 计算机网络技术、无线通信技术、传感器技术以及机电技术的发展产生了一门新的计算领域——无线传感器网络(WSN)。与传统方式部署的传感器不同, 无线传感器网络中的节点是高度智能的。事实上, 每个节点都是一个功能完善的计算机系统, 不仅具备从环境中获取一些重要参数的能力, 而且还能够将取得的数据过滤、重组、合并, 甚至与其他节点共享、协作, 最终将有效数据通过互联网传递给控制终端, 具有无所不在的计算能力。

传感器网络中的智能节点具有价格低、体积小、能耗不高、各自分散独立等优点, 同时由这些节点组成的整个网络又具有自我配置和自我维护的能力, 因此其应用前景十分宽广, 大量应用于环境监测、生态观察、灾难营救以及军事侦察等领域。

为了满足大量不同领域的应用要求, 传感器网络不仅要有设计良好的硬件结构^[1], 更重要的是需要一组功能完善、易于配置的软件系统, 从而能够定期地收集和传输各节点感测的信息, 并仔细地管理有限的电能和无线带宽, 保证信息的实时性、准确性和充分性。为此, UCB 的 S. Madden 以及 Cornell 的 J. Gehrke 等人分别参与设计和实现了可用于快速开发无线传感器网络中数据收集应用程序的软件体系结构^[2,3]。利用这种体系结构, 用户只需使用简单的、声明式的查询语句就可获取所关心的数据, 而具体地在网络中有效地收集和数据处理的功能则由系统软件负责。UCB 和 Cornell 都是利用数据库技术来实现这种系统软件的, 它们设计和开发的这种传感器网络查询处理器原型分别称为 TinyDB^[5] 和 Cougar^[6]。

1 查询处理体系结构

为了满足应用的需求, 对传感器网络设备的要求非常苛刻, 这给基于传感器网络的应用程序设计带来了极大的挑战。

传感器设备必须十分小巧且紧凑, 各部分独立性不强, 容易相互影响, 这给操作系统的设计和实现带来很多麻烦; 程序的调试只能通过几个 LED 显示灯来观察, 十分不方便; 设计出的应用程序必须具有良好的分布性, 同时还必须仔细地管理好有限的能量和带宽资源。

由于传感器网络硬件环境存在诸多限制因素, 因此其系统软件必须要能够满足许多特殊的需求, 例如:

(1) 必须对资源进行十分有效的管理, 特别是能量。在传感器网络中, 最消耗能量的两个环节, 即通信和感测(Sensing)。而且根据摩尔定律, 电子管将越来越小, 所需电压也越来越低, 因此每个 CUP 周期的能耗也越来越少; 另一方面, 根据电池技术的物理限制和发展来看, 使用无线电方式传输数据所需的能量比电池的能量密度更昂贵。因此, 为了节约能量, 必须在通信这个环节大做文章。

(2) 软件必须对网络的瞬时动态性具有足够的应付能力, 也就是说, 应用程序应该尽可能少地受到一些相关因素的影响。这些因素包括节点的移动、随着电池电量的降低导致节点间信号强度以及干扰模式的改变等。系统软件必须保证应用程序尽量少地受到这些因素的干扰。

(3) 在提供数据存储、收集以及审计功能时尽量进行离线(Off-line)分析, 以便减少和降低在线(On-line)数据。如果将各传感器节点获取的大量原始数据都实时地、不加修改地传回汇聚点, 必将对网络的能量、带宽等资源带来沉重的负担, 而且数据收集率也不可能很高, 整体运行效果会很不理想。相反, 如果系统软件能够将收集到的实时的数据进行合并或聚集, 效果将会大大改善。

(4) 系统软件必须构建在 TinyOS 之上, 并为用户提供一个更为简便的基于嵌入式 C 语言的编程模型, 使得用户可以利用十分方便有效的方式收集和处理信息。

(5) 系统软件还必须提供一套用于管理和了解网络状态

的工具。

以上这些问题是研究者们希望达到的目标,还处于不断研究的过程中,其中有许多问题还远非完善。

1.1 查询处理体系结构概述

图1显示的是传感器网络查询处理体系结构的一个简单框图。该体系结构主要包括两部分:①服务器端的软件运行在用户的PC机上,相当于查询应用中的一个基站。这部分的软件功能主要是解析查询语句并将其传输到传感器网络中,然后当数据到达时收集查询结果。②传感器端的软件运行于智能微粒(Mote)之上。如图1所示,该部分的软件构建在TinyOS之上,是一组分层次的软件组件。

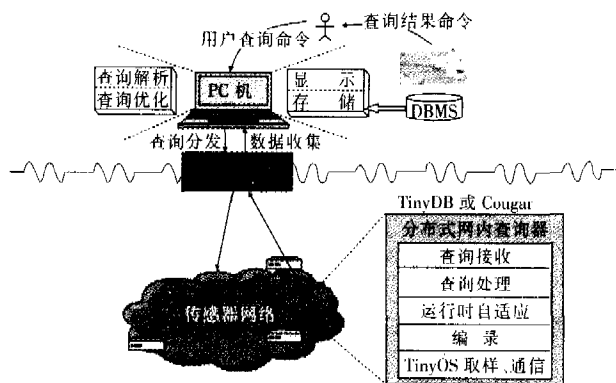


图1 传感器网络查询处理体系结构

在该体系结构中,用户只需在PC机基站端输入简单的、类似于SQL语言的查询语句就可得到其想要收集的数据。

1.2 查询和查询优化

在1.1节中描述的体系结构中所使用的SQL语言跟传统的SQL语言存在很大的区别,主要表现在此处所使用的查询将是持续的(Continuous)、定期的(Periodic)。如用户发出查询命令“每隔10s查询一次八楼的温度值”后,传感器网络就要不断地(持续)、每隔10s(定期)查询指定的参数并返回查询结果。相邻的两个查询结果之间的时间间隔称为取样周期(Epoch),即传感器连续两次取样之间的时间。上例中,取样周期为10s。

与传统的数据库系统一样,查询语句只描述用户感兴趣的逻辑上的一组数据集合,至于实际用到的算法、软件以及操作符等,用户并不关心,更不必在查询语句中指出。一般地,当逻辑查询语句到来时,系统会从一组查询计划和操作序列中智能地选取一个进行查询。例如,要查询四楼上传感器的平均温度有两种方案:①查询所有的传感器的温度值,然后过滤掉非四楼上的传感器,再计算平均值;②仅查询四楼上的传感器,获取温度后计算平均值。在传感器网络中,显然后者要优于前者。

选择最好的查询计划的过程称为查询优化。查询优化的通常做法是枚举所有可能的查询计划,估算每个计划中每个操作符的开销,然后从中选取开销最小的查询计划。在传感器网络中,查询优化可以集中式地处理,通常放在服务器端的PC机上执行。但是,由于服务器对整个传感器网络的当前状态的掌握并非十分完备,用于优化所使用的开销可能会在传感器网络的生命周期中随着节点的变化而变化,因此,有必要不时地获取查询计划的反馈以及网络的状态信息,从而不断调整估算的操作符开销值,适应网络的动态变化。

1.3 查询语言

与标准的SQL语言类似,在Cougar和TinyDB中的查询语句的格式也是SELECT-FROM-WHERE-GROUPBY-HAVING模式,支持选择、连接、映射、聚集以及分组等操作。它们还都显式地支持滑动窗口和子查询;同时,TinyDB还显式地支持取样。在查询中,所有的传感器数据将被看作是一个单一的、虚拟的表,其中每个传感器属性占据一列。系统会以查询中指定的时间间隔将数据元组插入到表中。两次取样之间的时间间隔即是取样周期。

例如,查询语句“SELECT nodeid, light, temp FROM sensors, SAMPLE PERIOD 1s FOR 10s”的意思是每个传感器每隔1s报告一次自己的节点标志、光强值以及温度值,并持续10s。在虚拟表Sensors中,对编录(图1)中的每一个可能的属性都有一列与之对应,同时,每一行对应一个取样的实例。其中虚拟的意思是这些行和列并非物理上存在的,系统产生的是对这些列和行的引用,也就是说Sensors是逻辑上的一个表。查询的结果将通过多跳路由的方式传回根节点,然后再存储在数据库中或者展现给用户看。该查询的输出内容将是一个不断增长的元组簇序列,相邻两个元组间隔1s的时间,同时每个元组包含一个显示其产生时间的时间戳。

从概念上讲,表Sensors是一个没有边界的、持续增长的数据流,因此,有些封闭操作(如排序以及对称连接等)都是不允许的,除非用户指定一个有限的子集或者窗口。TinyDB中的窗口是指传感器数据流上的一个固定大小的具体化范围,相当于一个小的缓冲区,存储了数据流上的一小段,提供给查询使用。类似地,Cougar中的视图节点(View Nodes)是用来存储中间查询结果的,很像关系型数据库系统中的视图。传感器节点将数据推入(Push)视图节点,而查询再将其拉(Pull)出来或者定期地将其推入其他视图节点或基站。考虑下面的查询例子(使用TinyDB语法):CREATE STORAGE POINT recentlight SIZE 8 seconds AS (SELECT nodeid, light FROM sensors SAMPLE PERIOD 1s),该语句提供了一个共享的、本地的(也即是单节点的)地点用于存储最近数据流的一个有限映像或视图,称为存储点,这与其他流式系统中的物化点(Materialization Point)以及传统数据库中的物化视图(Materialized View)非常类似。在同一个节点的两个存储点之间可以进行连接操作;同时,在一个存储点和Sensors表之间也运行连接操作。在这种情况下是一种嵌套循环连接,Sensors表充当外部关系的角色。当Sensors表中到来一条新记录时,它将与存储点中的各元组进行连接。例如语句SELECT COUNT(*) FROM sensors AS s, recentLight AS rl WHERE rl.nodeid = s.nodeid AND s.light < rl.light SAMPLE PERIOD 10s,即是存储点与Sensors表之间的连接操作,查询结果将返回传感器节点光强变弱的节点个数。

1.4 查询分发和结果数据收集

当原始的用户查询在PC机上经过优化后,系统会立即将经过优化后的查询语句分发到网络中。网络的通信协议会维护一棵以基站或存储点为根节点的路由树,查询命令将沿着路由树一步一步转发下去,直到整个网络都收到为止。网络中的每个中间节点负责将查询命令转发给自己的子节点,同时还要

负责将子节点的查询结果收集起来,回送给基站。传感器网络还支持同时拥有多棵路由树,实现多个根节点不同的查询请求。这种类型的通信拓扑结构就是传感器网络中经常使用的基于树的路由结构。

图2显示的是传感器网络拓扑结构和路由树的一个例子。实线箭头由路由树的子节点指向父节点,而虚线表示虽然两节点在一跳通信范围内,但路由树并不包含该链路。在路由树的形成过程中,通常每个节点都有多个一跳邻居节点可以作为父节点,从中选取一个即可。一个简单而直观的方法是选择跳数最小的那个节点——也就是离根节点最近的邻居节点,作为其父节点。图2(a)显示的即是这种方式;图2(b)显示的则是节能的路由机制,其中,节点D以E为其父节点,这样,在查询分发阶段,节点C成为一个叶节点,从而使整个网络中转发查询的中间节点数目减少,最终节约了能量。事实上,选择适当的父节点是一个非常重要的问题,极大地影响网络的通信开销和数据收集效率。而且,传感器网络的拓扑结构很不规则,传感器节点的计算能力又很有限,传统的路由算法对传感器网络来说并不适用。针对传感器网络的特殊性,研究者们已经提出了许多优秀的路由机制,包括节能路由、以数据为中心的路由(Data-centric Routing)、层次路由、基于位置的路由以及满足QoS的路由等^[4]。

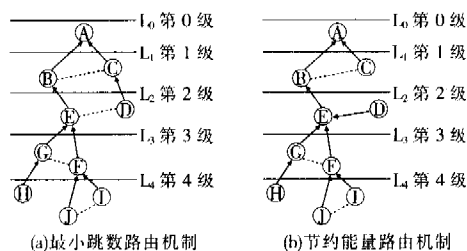


图2 传感器网络的拓扑结构和路由树

1.5 查询处理

接收到查询命令的节点必须立即执行查询,查询处理过程按取样周期循环执行,即每个节点利用特定的获取操作符按查询中指定的属性或域进行取样,然后查询处理器按照优化过程建立查询计划,将取得的数据或元组沿着路由树传递回去。查询计划由一组有序操作符组成,每个操作符对数据元组的常见处理包括直接将其传递给下一个操作符、将其作为无用数据丢掉或与其他一个或多个数据元组合并等。处理完毕后,节点将数据元组沿着路由树传递给自己的父节点,父节点进一步将其转发或者将其与自己获取的数据或从其他子节点上收集到的数据进行合并后再转发出去,如此不断进行下去,直至基站常见的查询处理操作符包括数据获取(Data Acquisition)、选择(Select)、聚集(Aggregate)以及连接(Join)等。其中,数据获取操作符使用可用属性对应的编录(图1)将查询中指定的操作映射为系统调用。利用编录这种方式对传感器属性进行抽象,用户可以方便地向传感器网络中引入新型的传感器节点,并支持那些使用不同软件接口的传感器。例如,在TinyDB系统中,用户不仅可以对光、温度等传感器属性进行查询,还可以查询反映硬件设备及操作系统状态的那些属性,如动态内存分配器中现在还有多少可用的RAM等。

图3显示的是一个简单的聚集查询的处理过程。查询命

令为每隔10s返回三楼上的温度的平均值。该查询命令的查询计划包含三个查询操作符:一个数据获取操作符、一个检查楼层属性是否为3的选择操作符和一个计算温度平均值的聚集操作符。每个传感器节点将在每个取样周期执行一次该查询计划,当数据流传回到根节点时,其数据就是对此次查询的应答。在该查询中,每个节点的部分状态记录(PSR)^[2]是一个{sum, count}形式的二元组,路由树中的中间节点接收其子节点传来的这些二元组,并与自己获取的进行合并、聚集,然后沿着路由树向上传递,直到根节点。

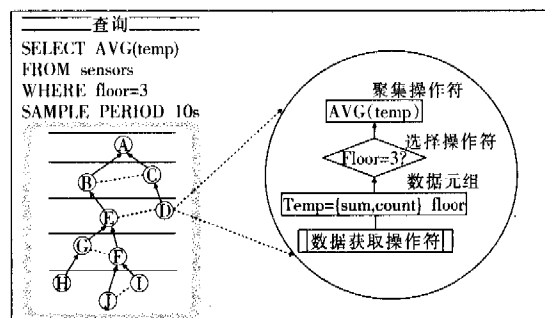


图3 传感器网络中一个简单查询的执行过程

2 与传感器网络相关的特殊技巧和优化

由于传感器网络自身的特殊性,存在着一些非通用的优化和查询处理技巧。

2.1 生命周期子句

在查询语句中,除了可以显式地指明取样周期(Sample Period)子句外,还可以指定查询生命周期(Query Lifetime),其子句的形式为Lifetime <x>,其中<x>是指查询将持续的时间,单位可以是天、周以及月等。指定生命周期可以让用户更直观地把握整个网络的能量消耗状况。例如,在环境监测应用中,用户可能并不十分在意取样频率的细微调整,更不会关心这种将会对能量消耗具体产生什么样的影响;但他们十分关心整个网络执行查询工作可持续的时间是多久。因此,在这种情况下,查询的执行可优先保证网络的生命周期这个要求,然后在能量允许的情况下,再尽量提高取样的频率。由此可见,取样周期和生命周期是一对矛盾,查询语句中,到底应该使用哪个子句要视具体情况而定。

为了实现生命周期子句功能,传感器网络的查询处理模块使用了所谓的生命周期估计策略,其思想是通过节点剩余能量以及查询语句的分析来估算取样和传输速率。查询语句一旦产生,在对查询进行优化的过程中同时执行生命周期估计,并在查询执行期间定期地予以执行。

生命周期估计是一种简单的优化技巧,利用生命周期子句,用户可以更加方便地与传感器网络进行交互。

2.2 数据聚集

带有聚集操作的查询计划通常可分为两个部分,即通信组件和计算组件。通信组件负责建立起一个合适的通信结构,用于将空间上分散的传感器的感测值传送到一个中心目的节点以执行聚集;而计算组件则负责对原始数据或已部分聚集的数据实施聚集。数据聚集通常包括以下两种简单的方案:

(1) 部分聚集。对于那些可以在连续空间上递增维护的

聚集操作(或者说满足算术分配律的聚集操作符),可以将其计算操作从根节点下推到中间节点,让中间节点执行部分聚集后再将结果逐级上传直至根节点,如聚集操作 Average(计算均值),就可应用这种方案。图3描述的就是部分聚集方式的下推计算。

(2)数据包合并。考虑到信道占用即数据包头信息,发送多个小的数据包比发送一个大的数据包的开销要大得多。因此可以将多条数据记录合并成一个人的数据包再进行发送,数据部分只是简单地叠加在一起。这就是数据包合并方式的下推计算,该方式适合于那些(没有紧凑的递增状态表示的)整体性聚集操作,如求中值等。

3 传感器网络中查询处理的研究热点问题

传感器网络查询处理是一个十分活跃的研究领域,近来的几个主要研究主题和方向是:

(1)数据的网内聚集^[7]。通过对查询语义的详细分析和探索,对查询操作实施智能的分解和组合,使大量冗余数据在网内实施聚集,从而提高整个网络的性能。

(2)获取式查询处理^[8]。在传感器网络中建立获取式的查询处理器,智能地控制整个传感器网络何时、何地,以何种频率收集数据。

(3)异构型传感器网络^[9]。为了提高传感器网络的可扩展性,可在网络中适当放置少数高性能节点,构成一个分层次异构型网络,将有利于提高网络的整体性能。

(4)间歇性连接和自配置。

(5)基于统计的概括和取样。

(6)网内连接查询。

(7)传感器网络的自适应性。

(8)多查询。

以上这些问题有些已经取得一些阶段性成果,有些则刚刚起步。要使得传感器网络的配置和使用方便地应用于实际工作中,研究者们还需要做大量的工作。

4 结束语

本文介绍了无线传感器网络中查询处理的一些基本概念和特点,形象地描述了无线传感器网络中查询处理的体系结构,并对其中使用到各种常用的技术进行了介绍和分析,还对相关领域的研究工作进行了总结和展望。下一步我们将对传感器网络进行实地部署和实验,通过对大量实际数据的分析提出更加可靠、性能更加完善的方案。

参考文献:

- [1] J L Hill, et al. System Architecture Direction for Networked Sensors [C]. Proc. of Int'l Conf. Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, ACM Press, 2000. 93-104.
- [2] Samuel Madden. The Design and Evaluation of a Query Processing Architecture for Sensor Networks[EB/OL]. <http://astragalus.lcs.mit.edu/madden/pubs.html>, 2003.
- [3] J Gehrke, S Madden. Query Processing in Sensor Networks[J]. Pervasive Computing, 2003, 46-55.
- [4] K Akkaya, M Younis. A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks [EB/OL]. <http://www.cse.cuhk.edu.hk/~yfzhou/sensor.html>, 2004.
- [5] Tiny DB. A Declarative Database for Sensor Networks[EB/OL]. <http://telegraph.cs.berkeley.edu/tinydb/>, 2004.
- [6] COUGAR: The Network Is the Database[EB/OL]. <http://www.cs.cornell.edu/database/cougar/>, 2004.
- [7] S Madden, et al. TAG: A Tiny Aggregation Service for Ad hoc Sensor Networks[C]. Proc. of OSDI, ACM Press, 2002. 45-52.
- [8] S Madden, M Franklin, et al. The Design of an Acquisitional Query Processor for Sensor Networks[C]. Proc. of SIGMOD ACM Press, 2003. 491-502.

作者简介:

张文涛(1976-),男,湖北武汉人,博士研究生,主要研究领域为分布并行计算、无线传感器网络、Ad hoc 网络等;贾小华(1962-),男,教授,博士生导师,主要研究领域为分布并行计算、WDM 全光网络、Ad hoc 网络等;黄传河(1963-),男,湖北武汉人,教授,博士生导师,主要研究领域为分布并行计算、WDM 全光网络、Ad hoc 网络、无线传感器网络等。

(上接第210页)成熟模型。以上所有的研究都是为了准确地分析企业集成风险,以设计良好的风险信息系统为企业服务。在今后的研究中,还需要经过更多的实证案例来探讨、证实和扩充集成风险的特征、框架和模型,以设计更加适合于企业风险管理的信息系统。

参考文献:

- [1] Jochum C. Integrated Safety[J]. Journal of Occupational Accidents, 1990, 13(1-2): 139-144.
- [2] Proceedings of the 1998 International Conference on Risk Management [C]. A Conference Board of Canada, 1998.
- [3] Smallman C. Challenging the Orthodoxy in Risk Management[J]. Safety Science, 1996, 22(1-3): 245-262.
- [4] Tian J. An Integrated Approach to Test Tracking and Analysis[J]. Journal of Systems and Software, 1996, 35(2): 127-140.
- [5] Holdsworth R. Practical Applications Approach to Design, Development and Implementation of an Integrated Management System[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 104(1-3): 193-205.
- [6] Labodová A. Implementing Integrated Management Systems Using a

Risk Analysis-based Approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2004, 12(6): 571-580.

- [7] Hernandez, Ramiro L. Integrated Risk Management in the Internet Age[J]. Risk Management, 2000, 47(6): 29-32.
- [8] 孙峰. 中国金融控股公司风险管理系统设计[J]. 中国软科学, 2003, (9): 64-68.
- [9] 杨乃定,姜继娇. 基于项目的 EIRM 信息系统研究[J]. 研究与发展管理, 2004, 16(1): 34-38.
- [10] Klonian H F. Risk Management Report[M]. California: Seawrack Press, 1996.
- [11] Hand D J, Blunt G, Kelly M G, et al. Data Mining for Fun and Profit[J]. Statistic Science, 2000, 15(2): 111-126.
- [12] Kushmerick N, Thomas B. Adaptive Information Extraction: Core Technologies for Information Gents[R]. Intelligent Information Agents R&D in Europe: An Agent Link Perspective, 2002.

作者简介:

闫晓霞(1982-),女,山西平遥人,硕士研究生,研究方向为风险管理;杨乃定(1964-),男,陕西户县人,博导,研究方向为风险管理、项目管理;姜继娇(1979-),男,山东巨野人,博士研究生,研究方向为项目管理。