传感器网络*

李志刚, 周兴社
(西北工业大学 计算机科学与工程系, 陕西 西安 710072)

摘　要: 传感器网络作为连接真实的物理世界和虚拟的计算世界的桥梁, 将引起人们越来越多的重视。首先介绍了传感器网络的概念及其应用, 总结了其新的特征, 分析了它对计算技术的挑战。在对传感器网络进行分类的基础上, 探讨了非结构化传感器网络的设计方法; 最后对目前传感器网络的研究热点进行了简要介绍。

关键词: 传感器网络; 非结构化传感器网络; 网络体系结构
中图法分类号: TP393.09　　文献标识码: A　　文章编号: 1001-3695(2004)12-0009-04

Sensor Network

LI Zhi-gang, ZHOU Xing-she
(Dept. of Computer Science & Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shanxi 710072, China)

Abstract: Sensor network will play a key role in connecting actual physical world and virtual computing world, and will attract more and more attentions. This paper introduces the concept of sensor sensor network and it's applications, generalizes it's characteristics, and analyzes the challenges it presents on computing technology. Based on the classification of sensor network, we discuss how to design unstructured network. At last we briefly introduce some research topics of sensor network.

Key words: Sensor Network; Unstructured Sensor Network; Network Architecture

1　引言

过去的十几年, 网络技术, 特别是 Internet 的快速发展, 使整个社会信息交换方式发生了革命性变革, 而当今, 微电子机械系统(MEMS)、无线通信和微电子技术的进步, 使得设计和开发低成本、低功耗、多功能的微型传感器成为可能。这些微型传感器体积小, 具有传感、数据处理和通信部件, 在今后几年, 甚至会出现超低功耗 SOC, 在单片上集成无线通信、微处理器和 MEMS 传感和作动部件。众多具有通信、计算能力的传感器(或作动器)通过无线方式连接, 相互协作, 与物理世界进行交互, 共同完成特定的应用任务, 称为传感器网络。

传感器网络与传统的传感器相比, 易于部署, 即传感器节点位置不需要事先确定或精心设计, 允许任意放置, 部署维护成本低且具有较高的灵活性; 传感器网络由大量廉价节点组成, 可放置在物理现象作用范围内, 从而获得较高的观察精度, 具有较高的性价比; 传感器网络具有大量冗余节点, 即使部分节点失效, 也不会影响整个系统的功能, 因而具有较好的健壮性; 传感器网络节点具有计算能力, 可以相互协作, 能够完成传统传感器所不能完成的任务。

传感器网络系统通常由三个部分组成: 传感器节点网络、网关、用户/应用, 如图 1 所示。传感器节点网络由大量具有传感、处理、通信部件的节点组成, 每个节点能够采集环境信息(如温度、湿度、光强、震动、物体移动等数据), 进行初步处理, 相互之间通过无线方式交换信息。网关(也称为汇聚节点 Sink Node), 将传感器节点网络收集的环境信息汇集后, 递交给用户/应用。用户/应用如果对物理现象感兴趣, 通过网关向网络发布查询和监视命令, 传感器网络响应用户的命令, 采集数据或监视事件发生, 并将结果通过网关反馈给用户。

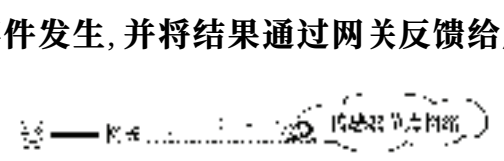


图 1　传感器网络系统结构图

传感器网络在科学研究、环境监测、武器装备、工农业生产、日常生活等领域具有非常广阔的应用前景, 将使整个社会发生又一次变革。在科学研究领域, 传感器网络提供了一种新型的研究手段, 可以揭示以往无法或难以观察的现象, 可以应用在地震、火山活动过程、生态系统微观行为的观察等研究中。传感器网络能够监测温度、湿度、亮度、压力、噪声、物体移动、速度、方向等多种环境状态, 可用于森林火警监测、城市空气质量监测、洪水监测等应用。在军事领域, 传感器网络可应用在战场监测及武器装备试验中, 还可以实现对军用物资的管理, 并能够监视士兵的健康状况。传感器网络与农业结合, 对农作物和环境进行监测, 相应调整水分、肥料和杀虫剂的使用量, 以达到低耗费、低污染、高产出, 可以实现所谓的精细农业。在城市中每个车辆上附加一个或多个传感器, 监测车辆位置、速度、道路状况和车辆密度等信息, 车辆行驶过程中, 这些传感器与经过的其他车辆相互交换信息, 驾驶员可以根据交换的信息选择道路, 估计到达时间, 而城市交通管理部门在对这些信息收集的情况下, 可以对整个城市范围的交通状况进行监控。可以不夸张地讲, 传感器网络应用的广度与深度, 将更多地取决于应用者的想象力。

传感器网络作为连接物理世界和虚拟世界的桥梁, 其研究涉及多个学科, 已成为当前的研究热点。本文从计算机学科的角度, 首先简要介绍了传感器网络及其应用, 然后概括了传感器网络的特征, 阐述了传感器网络新的需求。面对这些新特征

收稿日期: 2004-01-12; 修返日期: 2004-03-29
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60273086)

和新需求,传统的网络技术已不再适用。

2 传感器网络的特征与需求

传感器节点具有传感、处理、通信部件,自主动作,相互通信,共同协作完成感知物理世界的任务。因此,其网络可称为一种新型的网络系统。它与传统系统相比,具有许多新的特性:

(1) 与物理世界紧密耦合。传感器网络部署在物理世界中,在无人看守的情况下感知环境状况(如温度、空气质量、震动等),相互通信,对感知数据进行处理并实时地作出反应。

(2) 节点资源受限。由于受成本和物理环境的限制,传感器节点的处理能力、存储空间、通信带宽都极为有限。节点一般由电池驱动,而且在大多数应用环境中采用更换电池的方式以补充能源是不现实的,使能源成为系统中最宝贵的资源。

(3) 大规模密集部署。传感器网络中节点数量庞大,如在对环境进行监测时,可能需要部署成千上万个节点。如果将许多这样的系统连接起来,就可能产生具有数百万节点的传感器网络系统。不仅如此,传感器节点的分布密度也非常大,在某些应用中,部署在直径小于 10m 的区域内,节点数量可能达到数百个。

(4) 高度动态的系统行为。传感器网络具有很强的异构性,其节点易于失效(可能发生故障,能源耗尽或通信受到干扰),而且节点的增加、删除或移动现象也时常发生,导致网络拓扑变化频繁。加之物理环境不确定性的影响,使整个系统呈现高度的动态性。

传感器网络这些新的特征,对计算技术提出新的需求:

(1) 需要主动计算(Proactive Computing)能力。传统网络系统(如 Internet)很少或不与真实物理世界交互,其研究主要集中在如何与用户进行交互或如何方便用户彼此进行交互,因此这种计算模式称之为交互计算(Interactive Computing)。在交互计算系统中,由于人的因素存在,整个系统的智能主要构建于人的智能基础上,即人处于计算循环中,起着中心作用。而对于传感器网络而言,由于其与物理世界的耦合性,物理现象取代人成为整个网络的中心。实际上,传感器网络可能部署在无人区域或危险区域,不可能依靠人对系统进行配置与管理,系统必须能够自我组织、自我配置、自我修复,其运行主要取决于物理环境的刺激和系统本身的状态。因此,这种分散、自治的计算模式称为主动计算[2]。

(2) 需要能源感知(Energy-aware)计算,最大化系统生命期。传感器网络的某些应用(如森林火灾监测),要求系统生命期必须达到数月,甚至数年的级别,而传感器节点一般由电池驱动,能源有限(再生能源技术又不成熟,成本高,目前还无法应用于微型传感器节点),并且对于大规模与物理环境紧密耦合的系统而言,更换电池补充能源的方式是不现实的,这使得能源消耗成为确定系统生命期的最重要的因素。因此,需要将能源感知加入到传感器网络设计和操作的每一个阶段,充分挖掘系统在能源使用方面的潜力,使系统能够在能源消耗、系统性能和操作精度之间作出动态权衡,最大化整个网络的生命期。

(3) 系统必须具有很好的可扩展性。传感器网络的庞大规模,要求传感器网络协议、算法必须具有良好的可扩展性。对于这样的系统,集中控制显然不能满足需求,必须利用局部算法(Localized Algorithm),即传感器节点只与有限范围内的邻居节点交互(传感器网络可能形成层次结构,不同层以自己的局部概念进行交互),但聚集起来却可以实现期望的全局任务[3]。同时,传感器网络的密集部署特性,导致系统若干节点的失效不会对系统的正常运行产生影响,因此传感器网络协议和算法的鲁棒性设计必须考虑传感器网络密集分布的特性。

(4) 系统必须具有自适应计算能力。传感器网络在其生命期内,物理环境具有不确定性,系统本身呈现高度的动态性,因此,传感器网络必须具有一定的学习和适应能力,能够根据环境与系统的变化并相应改变自己的行为。例如,在系统可用能源较少的情况下,传感器网络必须能够对操作策略作出调整(如降低采集数据的精度),从而延长系统的生命期。传感器网络的自适应通常是由于可用资源(包括可用能源、计算资源、通信带宽)或负载动态变化,导致系统操作参数的改变,其策略的实现必须考虑资源有限、空间分布、密集部署等特性的影响。

3 传感器网络的设计

3.1 传感器网络的组织结构

为了设计传感器网络,首先应明确传感器网络的目标和应用需求。前面对传感器网络的应用领域进行了简要介绍,对传感器网络的应用仔细分析,可以发现其应用主要包括:

(1) 查询物理环境参数,或者查询满足一定条件的信息。如查询区域 A 的温度和湿度情况,或查询有没有温度高于 20°C 的区域。查询分瞬态查询和周期性查询。

(2) 监测感知事件的发生并估计事件的某些参数,如监测 A 区域是否发现有毒气体,如发现则估计有毒气体浓度。

(3) 对监测目标进行辨别分类,如辨别进入 A 区域的物体是野生动物还是坦克。

(4) 跟踪监测目标。

前两个应用涉及传感器网络节点采集数据,对数据进行一定处理,并将处理后得到的信息传给网关节点,从而递交给用户。这些信息简单而言可能只是传感器经模数转换后得到的数据,如温度、光强、湿度等;或者是对传感器节点采集的多种数据进行融合后得到的融合信息。后两种应用不仅要采集数据,而且多个节点需要相互交换数据,进行协同的信号和信息处理,能够完成单个传感器节点所无法完成的任务,如多个节点协作对多个目标进行跟踪。因此,传感器网络的目标就是从应用需求出发,根据传感器网络的特征,有效采集环境数据,并以某种方式保证应用所需信息的流通。这种信息的流通并不是对数据包简单地进行点对点传输,中间涉及对信息的融合等操作。其设计并不是为了提高吞吐量,而是在满足应用需求的条件下,根据需要牺牲响应延迟和数据精度等参数来节省能源,以延长网络的生命期。

网络从根本上可以分为有中心网络和无中心网络两类,传统的网络体系结构是有中心的网络。

从已有的无线蜂窝网络(如 GSM)出发,我们可以构建结构化传感器网络,如图 2(a)所示。事先安装、配置网格节点,形成蜂窝,网格节点既可采用有线方式连接,也可以使用高速无线方式连接(如 802.11b)。静态的网格节点通过手动配置组成通信子网,数据采集节点则随意放置在蜂窝范围内,根据需要采集数据,将数据传输给自己的网格节点,网格节点对数

据进行处理,将获取的信息传输给网关节点。结构化传感器网络的优点是技术成熟、实现简单。网格节点采用功能强大的部件,处理能力强,带宽较高;同时网格节点采用有源连接,数据采集节点由电池驱动,通过不对称通信方式,可以有效延长传感器网络的生命期。缺点是部署较为困难,需要事先选择网格节点位置,形成蜂窝,同时存在单点故障,如果一个网格节点失效,那么其覆盖范围内数据采集节点有可能与系统失去联系(如果没有处于其他网格节点通信范围内)。结构化传感器网络适合应用于智能办公室、博物馆安全防盗系统等应用领域。

另一种组织方式采用无中心的网络结构,即采用无线自组网(Wireless Ad hoc Network)方式。所有节点作用相同,既采集数据,又进行数据通信的中转,从而形成多跳(Multi-Hop)的通信方式,构成非结构化传感器网络,如图 2(b)所示。非结构化传感器网络的优点是部署简单,节点随意放置,并且健壮性好,不存在单点故障。但实现复杂,需考虑自组织与拓扑维护等问题,适用于战场监测、森林火灾监测等应用领域。目前传感器网络的研究主要集中于非结构化的传感器网络,因此本文主要对非结构化传感器网络(或无线 Ad hoc 传感器网络)的设计和研究热点作简要论述。

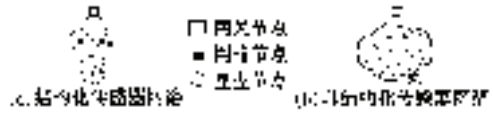


图 2　传感器网络的组织结构

3.2　非结构化传感器网络的设计

传感器网络设计首先应确定网络体系结构,传统的 OSI 参考模型过于复杂,而 Internet 的 TCP/IP 是端到端的交互模型,且占用过多的资源,也不适合传感器网络。应通过分析传感器网络的特征和应用需求,研究传感器网络的新的通信体系结构。对大多数应用来说,可采用下列协议体系:

应用层 (Querying, Monitoring, Collaborative Processing)	服务层 (Data Dissemination, Aggregation, Query Processing)	路由层	MAC 层	物理层

通信体系确定后,应着重考虑逻辑网络的设计,包括拓扑结构设计、寻址和命名规则以及选择路由协议。传感器网络本质是一种无线 Ad hoc 网络,但它与传统的无线自主网存在差别。传感器网络节点数量要比传统无线自主网多几个量级,节点的密集分布程度较高;传感器网络节点资源有限,失效几率大;传感器网络拓扑变化频繁。因此,传统的无线自主网的设计方案不能直接应用于传感器网络。

在传感器网络中,能源有限,且计算和通信的能源消耗具有巨大差异,如文献[1]通过实验得出,距离 100m 使用无线通信传输 1KB 数据消耗的能源,相当于 100MIPS/W 的通用处理器执行 3 百万条指令。这一特性对传感器网络的命名和通信产生了重要影响。传统的网络系统由于采用端到端的交互模型,因此节点地址(如 IP 地址)既作为该节点全局唯一的表示,又可提供拓扑信息,用来对路由进行选择。在传感器网络中采用类似方案,一方面传感器网络拓扑变化频繁,因而维护全局路由信息代价太大,而且全局标志需要较多的数据位,因此通信的额外开销也较大。此外传感器网络具有一个重要特征——以数据为中心(Data-Centric)[3]。通常应用不会提出这样的问题——27#节点监测的温度值是多少?而可能询问某一位置的温度情况。因此,节点的全局标志不再具有重要意义,而应对传感器网络产生的数据命名,即按照数据的属性进行命名,应用请求符合特定属性值的数据。确定了命名规则后,传感器网络可采用基于属性的路由或地理路由,并在路由过程中,应提供对网络内部处理(In-Network Processing)的支持。

对于物理网络设计来说,重点是通信技术和设备的选择。传感器网络的通信介质可选用无线、红外和激光。红外和激光通信能耗小,但有方向性,且容易被障碍物阻挡,因此无线通信是普遍使用的方式。通信器件,可选择蓝牙、CC1000 等低能耗通信部件。此外,对于底层通信需要的节点标志,可利用 MAC 层地址,或者利用传感器网络的局部交互特性,采用较小的、暂时的局部标志,保证底层通信的进行。

从传感器网络以数据为中心的特性出发,我们可以看出:用户很少对一个或两个特定节点的数据感兴趣,而是关注动态物理过程的某些参数。在传感器网络中,节点紧密协作以产生富含信息的结果,用户主要是与网络进行交互,而不是与具体某个节点交互,因此可以将传感器网络看作是一种分布式系统——分布嵌入式系统。分布式系统中,中间件的设计至关重要,通用分布式中间件侧重于系统各节点间的信息传递机制,如 RPC、分布对象,而忽略了资源约束、时间开销以及与物理世界耦合等传感器网络的主要特征。传感器网络中,服务层相当于中间件层,应首先确定服务层模型。根据以数据为中心的特性,可采用分布数据库的中间件模型,该模型有利于传感器网络的查询操作;或者从传感器网络协同信号处理的角度出发,考虑一些并行计算的模型。模型确定后,再根据传感器网络的特征,寻求新的计算机制加以支持,如研究新的时间同步机制、位置服务等。传感器网络作为一种分布嵌入式系统,具有嵌入计算的应用定制(Application-Specific)性。实际的设计方案应根据具体应用需求进行定制,或采用领域专门的知识来简化设计。此外,在定制设计过程中,还需考虑透明性的问题,根据需要对性能和透明性作出权衡。

3.3　传感器网络设计的衡量指标

传感器网络的设计确定后,需要对设计方案进行评价,除了定性分析外,还需要量化的指标加以衡量。下面,简要介绍一些传感器网络的衡量指标[5]:

(1)能源有效性/系统生命期。尽可能地有效利用能源是影响传感器网络设计的重要因素。传感器网络的设计,从硬件、协议、软件都必须考虑能源有效性的问题,以最大化系统生命期。而系统生命期是与应用相关的参数,通常指网络从启动到无法向应用提供期望信息的时间。

(2)延迟。它是指应用向传感器网络下达查询命令,到网络返回查询结果的时间;或是指网络监测到事件的发生,到通报给应用所需的时间。传感器网络的某些应用(如军事应用),对延迟上限有明确要求。

(3)感知精度。获得精确的信息是用户的首要目标,精确度的度量与应用密切相关,如采用置信度进行度量。传感器网络的设计,必须以最小的能源代价,在规定的延迟范围内,获得准确的信息。

(4)容错性。传感器节点易于失效,并易遭受环境的干扰,因此,传感器网络必须能够在错误发生的同时继续满足应用的服务质量要求,这要求传感器网络的设计必须具有一定的鲁棒性。

(5)可扩展性。传感器网络节点的数量差别较大,从数百到上万,甚至达到百万的级别,因此可扩展性是传感器网络设

计的一个重要指标。

(6) 透明性。传感器网络的设计,不能仅考虑性能因素,还需要考虑传感器网络应用开发的简易程度,即透明性的问题。

上述传感器网络的衡量指标,不是孤立的,相互之间存在一定关系,甚至有些是相互矛盾的,不可能全部达到最优,需要根据应用需求,在它们之间进行动态的权衡,甚至可以将若干参数结合起来,作为一个综合的参数进行考虑。

4 传感器网络目前的研究热点

目前传感器网络已经成为研究的热点,主要的研究集中在以下几个方面:

(1) MAC 层协议。传感器网络的 MAC 层协议必须达到两个目标:①创建网络基础设施。由于数千个传感器节点密集分散在感知区域,MAC 层协议必须为数据传输建立通信链路。②在传感器节点间公平有效地共享通信资源。传统的无线 MAC 层协议要么或者没有考虑能源有效性,或者需要全局协调,因此,需要根据传感器网络的特点设计简单高效的 MAC 层协议。

(2) 路由。它是无线 Ad hoc 网络的一个核心问题。传统的无线 Ad hoc 路由技术通常不符合传感器网络的需求,传感器网络的路由必须考虑能源有效性需求,以数据为中心,或者利用位置信息进行路由。在路由过程中同时需要考虑数据融合等操作。因此,传感器网络的路由协议既要有效维持数据传输通路,又要减少网络中的通信量,还要具有一定的鲁棒性。

(3) 能源感知计算。如何有效节省能源是传感器网络的一个核心问题。能源节省涉及节点的能源管理、网络范围内能源优化以及自适应能源/精度计算。在传感器节点上,需要实现计算、通信、传感相互协调的能源管理。在网络范围内,需要考虑通信的分布、拓扑管理、计算/通信的权衡以及如何减少通信的额外开销。同时,需要网络和应用相互配合,实施自适应能源/精度计算,有效减少能源消耗。

(4) 自组织。传感器网络的自组织可以通过两种方式实现,或者以层次结构的方式进行管理,或者采用对等管理方案。层次结构管理方案涉及组的自动生成,可以按照固定大小生成组,或者按照环境和应用的相关属性生成组。在对等方式管理中,每个传感器节点地位相同,需要研究如何通过局部对等的交互完成全局目标。

(5) 时间和空间约束。传感器网络的物理耦合性,导致其必须使用物理时间对所感知的事件建立关联,而传感器节点又通常基于空间关系决定所要采取的动作。因此,传感器网络具有时间和空间的约束关系。

传感器网络的许多应用,如数据融合、信号处理,需要多个节点具有彼此同步的物理时钟。为了达到能源有效性,传感器网络的时钟同步应充分引用硬件特性和领域知识,并考虑同步时机和同步方式。传感器网络不应持续同步,而应在需要时同步,同时为了消除网络延迟的影响,应在接收者之间进行同步。

位置是建立传感器节点空间关系的一种机制。在普及计算中,位置作为一种重要的上下文信息,得到了深入研究[7],但其解决方法大多需要事先组织,不能适应传感器网络任意部署、规模大的特点。对于传感器网络而言,其位置系统必须具有良好的可扩展性、容错性和健壮性,并能够适应资源有限的约束。

(6) 编程抽象。为了有效支持传感器网络的应用,还需考虑编程模型的问题。目前存在两种编程模型:分布数据库模型和分布虚拟机模型。分布数据库模型支持说明性语言,可使用扩展 SQL 语言编写应用,能够有效支持传感器网络数据查询操作,但对协同信号处理等应用支持不足。分布虚拟机模型支持传统过程式语言,提供高层指令,可有效减少代码的长度,并可实现自动代码划分、放置与迁移。除此之外,还可考虑如 Tuple Space 等模型,并考虑能否从并行计算中得到启发。

(7) 协同的信号处理。传感器网络的许多应用(如多目标跟踪、目标识别),需要多个传感器节点相互交换获取的多种数据协同处理,才能完成。传统的信号处理方法主要研究在有限资源下如何优化估计的质量。而对于能源有限和多种应用的传感器网络而言,仔细选择参与协作的节点,根据资源消耗或应用需要均衡信息分布,将至关重要。特别由于网络密集分布特性,产生的信息高度冗余,而网络带宽又严重受限,高效的数据融合算法将非常重要。

(8) 安全。传感器网络处于真实的物理世界,缺乏专门的服务与维护,因此传感器网络的安全受到严峻的挑战。传感器网络可能会遇到窃听、消息修改、消息注入、路由欺骗、拒绝服务、恶意代码等安全威胁,另外,在传感器网络中,安全的概念也发生了变化,通信安全是其中重要的一部分,隐私保护日渐重要,而授权重要性则降低。目前传感器网络的安全研究仅处于起步阶段,需依据传感器网络的特点,针对传感器网络的安全威胁,研究新型的安全协议和安全策略。

5 结论

信息技术的快速发展使传感器网络的出现成为可能,从而可能带来一场新的技术变革。在本文中,我们首先介绍了传感器网络的概念,总结了传感器网络的特征,分析了传感器网络对计算技术的挑战。在此基础上,探讨了传感器网络的设计问题,并对传感器网络目前的研究热点进行了简要介绍,希望能对我国从事传感器网络的研究起到一定的借鉴作用。

参考文献:

[1] J Pittie, W J Kaiser. Wireless Integrated Network Sensors[J]. Communications of the ACM, 2000, 43(5): 51-58.

[2] T Thorn. Proactive Computing[J]. Communications of the ACM, 2000, 43(5): 43-50.

[3] D Estrin, R Govindan, J Heidemann. Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Network[C]. ACM Mobicom 99, Washington, USA, 1999. 263-270.

[4] I F Akyildiz, W Su. Wireless Sensor Network: A Survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(2): 393-422.

[5] Sameer Tilak, Nael B Abu-Ghazaleh, et al. A Taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models[J]. ACM Mobile Computing and Communications Review, 2002, 6(4): 28-36.

[6] John Heidemann, et al. Building Efficient Wireless Sensor Networks Low-Level Naming[C]. SOSP 2001, Lale Louise, Canada, 2001.

[7] Jeffrey Hightower, Gaetano Borriello. Location Systems for Ubiquitous Computing [J]. IEEE Computer, 2001, 34(8): 57-66.

作者简介:

李志刚(1975-),男,博士研究生,主要研究方向为网络化嵌入计算;周兴社(1955-),教授,博士生导师,主要研究领域为网络与分布计算。