

无线传感器网络的研究进展

Progress in the Research of Wireless Sensor Networks

曹彦川/CAO Yan-chuan, 陶 然/TAO Ran

北京理工大学信息安全与对抗研究中心, 北京 100081

Information Security & Antagonism Research Center, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

[摘要] 作为下一代“无处不在的计算(Ubiquitous Computing)”形式之一的无线传感器网络,集成了传感器、微机电系统和网络 3 种技术。目前该领域世界范围内的研究已进入原型机实验阶段与标准制定阶段。就无线传感器网络研究的主要分支、进展及应用进行了综述。

[关键词] 无线网络, 智能传感器, 路由协议

[中图分类号] TN91, TP21, TP39

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2005)09-0063-03

Abstract : As key form of the next generation Ubiquitous Computing, Wireless Sensor Networks (WSN) combined the three promising technologies: sensor, MEMS and network. Current research in WSN has come to the prototype platform verification and standard charting stage. This paper reviewed the state of the art research in WSN and focus on the major research branches, proceeding of each branch and applications of WSN.

Key Words : wireless networks, smart sensor, routing protocol

CLC Numbers : TN91, TP21, TP39

Document Code : A

Article ID : 1000-7857(2005)09-0063-03

1 引言

无线传感器网络是由一组传感器以 Ad Hoc 方式构成的无线网络,其目的是协调地感知、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。随着通信技术、嵌入式计算技术和传感器技术的飞速发展和日益成熟,具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器开始在世界范围内出现,由这些微型传感器构成的传感器网络引起了人们的极大关注。这种无线传感器网络综合了传感器技术、微机电系统技术、分布式信息处理和网络通信技术,能够协调地实时监测、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。在信息采集及处理的过程中,涉及到了基于嵌入式系统及面向片上系统(SoC)的平台设计,基于微机电系统技术(MEMS)的传感器研发,针对分布式系统的数据挖掘及队列数据处理,以及具有自适应组网和自主路由的无线网络协议及其安全问题。正是对这些课题的不断探索,促成了无线传感器网络研究的各个分支的产生以及标准的制定。

2 无线传感器网络的主要标准及平台

2.1 主要标准

无线传感器网络目前通行的标准为 IEEE802.15.4 标准 Zigbee 协议^[1]。IEEE802.15.4 满足国际标准组织(ISO)开放系统互连(OSI)参考模式。它定义了单一的 MAC 层和多样的物理层。Zigbee 联盟制定了 MAC 层以上协议,其协议套件由高层应用规范、应用会聚层、网络层、数据链路层和物理层组成。物理层:IEEE802.15.4 定义了 2.4 GHz 物理层和 868/915 MHz 物理层两个物理层标准,它们都采用了直接序列扩频(DSSS)。MAC 层:IEEE802 系列标准把数据链路层分成逻辑链路控制(LLC)和媒介接入控制(MAC)两个子层。LLC 子层在 IEEE802.6 标准中定义,为 802 标准系列共用;而 MAC 子层协议则依赖于各自的物理层。IEEE802.15.4 的 MAC 层支持多种 LLC 标准,通过业务相关的会聚子层(SCS)协议承载 IEEE802.2 类型的 LLC 标准,同时也允许其它 LLC 标准直接使用 IEEE802.15.4 的 MAC 层的服务。

基于 802.15.4 标准的传感器主要有两

种使用方式:Ad-hoc 方式和接入点方式^[2]。

Ad-hoc 方式:各传感器与控制设备组成独立封闭的微网。传感器将数据发送给控制器,控制器据此完成相应的任务,数据不需要上传,一切功能都在本地完成。这种情况常见于移动范围较大和信息数据自成一体的应用,如机器人、汽车等。接入点方式:各传感器之间可以互相访问,并可通过接入点与有线网上的设备交换数据,甚至可以再次通过有线网上的另一个接入点与远端的设备互通信息。在这种情况下,无线成为有线的延伸和补充,一般用于需要经常移动传感器的地方,及线缆密集不宜再度布线的地方。

2.2 研发平台

目前主流的无线传感器网络平台包括 Telos、MicaZ、iMOT2、Cricket 和 Smart-Dust。

Telos 是 Moteiv 公司研制的一种用于传感器网络、监测应用程序开发和快速无线应用程序原型设计的极低功耗的无线模块,它采用 IEEE 802.15.4 和 USB 标准以便与其它器件无缝接合。通过采用工业标准

收稿日期:2005-06-10

作者简介:曹彦川,男,北京市中关村南大街 5 号北京理工大学电子工程系,硕士生,主要从事无线传感器网络、通信与信息系统领域的研究;E-mail: ycao@bit.edu.cn

陶 然(通讯作者),男,北京市中关村南大街 5 号北京理工大学电子工程系副主任,信息安全与对抗研究中心主任、教授,主要从事信息安全与对抗、通信与信息系统领域的研究;E-mail: rantao@bit.edu.cn

并集成湿度、温度和光传感器,Telos 使大尺度的网状网(Mesh Network)应用成为可能。由于支持 TinyOS 系统,Telos 在某种程度上促进了无线协议的融合以及推动了开源软件运动的发展。由此,Telos 成为一系列在提高系统鲁棒性的同时,以降低功耗和缩减尺寸为设计目标的无线模块的代表。(见图 1)



图 1 Telos 无线传感器网络平台

MicaZ 是 Crossbow 公司 Mica 系列无线传感器网络节点模块中的一员,符合 IEEE 802.15.4 协议,专为深度嵌入的传感器网络(Deeply Embedded Sensor Networks)而设计;可以作为路由器与网络中所有节点通信,并具有插接光、温度、湿度、气压、加速度/地震、声波、磁场传感器的扩展接口。MicaZ 可用于室内安全监控,采集音频、视频、振动等高速传感器数据,并可支持 1 000 节点以上大规模传感器网络组网。(见图 2)



图 2 MicaZ 无线传感器网络平台

iMOTE2 是 Intel 公司研制的为工业制造增值服务而设计的无线传感器节点,可用于生产环境监测、流水线监视、结构监测及损伤检测。iMOTE2 并不局限于单一通信机制,而是可通过插接不同子板而支持 IEEE 802.15.4、蓝牙、WLAN 等多波通信,更多的通信射频可通过 SDIO 网卡和 UART 及 USB 接口加载。(见图 3,图中阴影区域为未公开的版图设计)

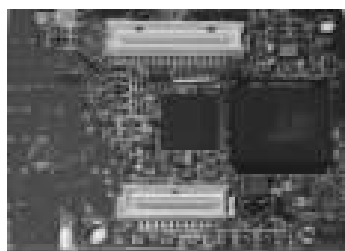


图 3 iMOTE2 无线传感器网络平台

Cricket 是由 Crossbow 公司和麻省理工学院(MIT)共同开发的具自定位能力的无线传感器网络处理器/无线电模块。它具有低功耗的设计,通过处理超声波信号,可对无线传感器网络节点进行较高精度的定位。定位信息包括空间标记、位置坐标和方位,精度可达 1~3 cm,并可通过运行于掌上电脑、笔记本电脑和传感器节点上的应用程序显示或读取。(见图 4)

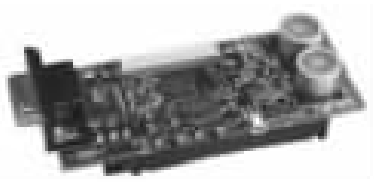


图 4 Cricket 无线传感器网络平台

SmartDust 是加州大学伯克利分校研制的、运行 TinyOS 系统的微型结点,中文名为“微尘”,设计目标体积为 1 mm³,目前可工作的原型机体积已缩至 100 mm³;在加载上温度、湿度、气压、光强、倾斜、振动、磁场传感器、双向无线电通信模块、微控制器和电池后的封装体积也只有 25.4 mm³,如图 1 所示。SmartDust 节点间可进行 20 m 的无线电通信和 21 km 的激光通信,并具有 1 星期的持续工作电池寿命。借助飞行器的播撒,大量 SmartDust 节点可在空中自动组网并通过激光通信。(见图 5)

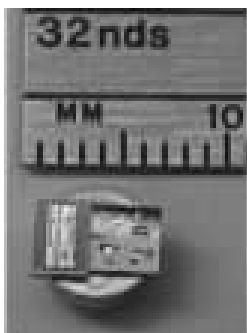


图 5 SmartDust 无线传感器网络平台

3 无线传感器网络的主要研究分支及进展

在美国自然科学基金委员会的推动下,美国的加州大学伯克利分校、MIT、康奈尔大学、加利福尼亚大学洛杉矶分校(UCLA)等学校开始了传感器网络的基础理论和关键技术的研究。英国、日本、意大利等国家的一些大学和研究机构也纷纷开展了该领域的研究工作。

3.1 加州大学伯克利分校 TinyOS 项目系列

3.1.1 TinyOS 和 NesC

TinyOS 是为无线嵌入式传感器网络设

计的开源操作系统。它具有基于组件(Component-based)的结构,能够有效缩减代码量,满足了传感器网络有限存储资源的限制,同时使快速开发和应用成为可能^[3]。TinyOS 的组件库包括了可定制的网络协议、分布式服务、传感器驱动和数据采集工具。它还具有事件驱动(Event-driven)的执行模型和优化的电源管理程序,使得自组织的网络具有灵活的时序安排,足以应付多变的通信环境。TinyOS 已被移植到数十种平台上,全世界有超过 500 个研究团体在进行基于 TinyOS 的无线传感器网络研究。NesC 是专为描述 TinyOS 系统的结构概念与执行模型而设计的一种编程语言,是 C 语言的一个扩展集。

3.1.2 TinyDB 和 COUGAR

TinyDB 是用于处理从无线传感器网络中获取的询问处理数据库系统。不同于 TinyOS 中其它的数据处理的方法,TinyDB 并不要求编写传感器的 C 代码,而是提供了简捷的类 SQL 界面来选择要获取的数据和设定数据采集的刷新速率,从而使无线传感器网络数据库可以像传统的数据库那样操作^[4]。在选择要获取的数据后,TinyDB 通过低能耗的在线处理算法,从网络中各节点采集数据并过滤、整合,而后通过适当的路由传至终端。COUGAR 是康奈尔大学研发的无线传感器网络分布式数据库系统^[5]。传统的无线传感器网络数据库将传感器采集的数据发送到一个中心前端,并将数据综合存储供离线处理和分析。COUGAR 则可以分布式地在线查询,从而实现了与传感器网络的动态交互并极大地缩减了存储和电源的开销。

3.1.3 TinySEC 和 TOSSIM

TinySEC 是无线传感器网络的链路层加密机制,是无线传感器网络安全解决方案的第一部分。TinySEC 的核心是与 TinyOS 射频层次设计紧密结合的段密码(Block Cipher)和密钥机制。现阶段,TinySEC 采用多数无线传感器网络节点通用的单对称密钥。在发送一个数据包之前,各个节点首先将数据加密并加入消息认证码(Message Authentication Code)。接收方通过校验消息认证码,确认数据在传输过程中未被更改,然后解密。TOSSIM 是 TinyOS 无线传感器网络的节点模拟器。它可以在比特级模拟 TinyOS 各网络层次,即从低层的协议实验到高层的应用程序。TOSSIM 还提供了和真实无线传感器网络一样的接口,并可通过可视化的图形用户界面程序 TinyViz,实现对网络的动态配置和实时交互显示。

3.2 美国国防部 NEST 项目系列

3.2.1 Vanderbilt 的 PinPtr 定位系统

现存的反狙击系统通过追踪由射击产生的声波、光波、红外或电磁波来确定狙击手的方向或具体位置,其中大部分依赖声

波的系统由于障碍物的影响而极大地限制了性能^[6]。范德比尔(Vanderbilt)大学的PinPtr无线传感器网络声学定位系统,通过上百个自适应组网并彼此定位的传感器节点协作定位,有效解决了复杂地理环境产生的多径效应。当触发事件发生,信号到达各个节点的时间被分别记录并通过优化的路由程序发送至基站,通过对数据的处理可将目标的位置实时显示在3D的城市模型中,在宽50 m长100 m的实验场地中误差小于1 m。由于嵌入式的传感器网络节点不能支持高消耗的信号处理,因此PinPtr系统采用了在Mica节点平台上插接声学传感器子板的方法,并在节点母板上定制了用于时间同步、数据采集和路由的中间件服务程序^[10,11]。

3.2.2 UCLA的CENS研究

UCLA的CENS(嵌入式传感网中心)开发了自己的无线传感器网络和网络模拟环境^[7]。他们研发出了低级通信不依赖于网络拓扑结构的分布式系统技术、支持多应用传感器网络中命名数据和网内数据处理的软件结构、变换初始感知为高级数据流的层次系统结构、传感器网络的时间同步的解决方法、自组织传感器网络的设计问题和解决方法、新的多路径模式等。

3.3 其它研究项目

3.3.1 MIT的LEACH和SPIN路由协议研究

LEACH是Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy(低功耗自适应聚类层次)的缩写,是为远程监视的无线传感器网络而设计^[8]。在这种情况下,各个节点采集的数据必须被传输至一个远离现场的中心基站,通过此基站,终端用户可以访问采集到的数据。通常希望此种网络具有这样的特性:100~1 000个节点,最大化的系统使用时间,最大化的网络覆盖区域,使用统一的电池驱动节点。传统的网络协议,例如直接传输、最小化传输功耗、多跳路由和聚类(Clustering),都不能同时达到上述特性要求。LEACH具有分布式聚类形式,可以减少全局通信的本地处理、随机轮换聚类中心,这些特点使得LEACH得以达到预期的特性要求。模拟表明,LEACH协议是低能耗的并可延长系统寿命。

SPIN是一族用于在无线传感器网络中高效传播数据的协议。传统的数据传播方法如Flooding和Gossiping因向整个网络发送冗余信息而浪费了宝贵的通信和电能资源;而且这些协议不能自动适应网络资源。SPIN通过使用数据协商(Data negotiation)和资源自适应算法,弥补了传统方法的不足。运行SPIN的节点为数据分配一个高层的名称,即元数据(Meta-data),并在传送数据之前进行元数据协商。这样确保了没有向全网发送的冗余信息。此外SPIN可以访

问节点当前的电池能量水平,并使当前运行的协议适合剩余的能量。仿真结果表明,在以相同甚至更高传输速率传播数据,SPIN比包括Flooding和Gossiping在内的所有协议都具有更低的功耗^[12]。

3.3.2 Intel的无线传感器网络研究

Intel公司发布了“基于微型传感器网络的新型计算发展规划”^[9]。今后,Intel将致力于微型传感器网络在预防医学、环境监测、森林灭火乃至海底板块调查、行星探查等领域的应用。实现该计划需要3个阶段,即物理阶段、实现阶段和应用阶段。物理阶段主要开发集成感知、计算和通信功能的超微型传感器。实现阶段将在实际商务中使用来自传感器网络的感知数据。应用阶段将应用传感器网络于预防医学、环境监测及灾害对策等领域。

4 无线传感器网络的应用

4.1 环境生态监测

位于缅因州海岸大鸭岛上的洞穴中生活着白腰叉尾海燕,由于环境恶劣,加上白腰叉尾海燕十分机警,研究人员无法采用通常的跟踪观察方法。在不打扰它们和避免这种多风暴又极冷的恶劣环境的情况下,在2002年,Intel研究中心Berkeley实验室研究人员将设置于岛上的32个基于TinyOS的传感器接入互联网,以读出岛上的气候,评价海燕筑巢的环境条件。而2003年第二季度,他们换用150个安有D型微型电池的第二代基于TinyOS的传感器节点组成更大规模的无线传感器网络,来评估这些海燕鸟巢内外的温湿条件,并应用TinyDB对采集的数据进行实时处理,使世界各国研究人员实现无入侵式及无破坏式的、对敏感野生动物及其栖居地的监测成为可能。

4.2 民用交通监控

美国交通部提出了“国家智能交通系统项目规划”,预计到2025年全面投入使用。该计划试图把先进的信息技术、数据通信技术、无线传感器网络技术、控制技术、计算机处理技术有效地集成运用于整个地面交通管理,建立一个在大范围内全方位发挥作用的、实时准确高效的综合交通运输管理系统。这种新型系统将有效地使用无线传感器网络进行交通管理,不仅可以使汽车按照一定的速度行驶、前后车距自动地保持一定的距离,而且还可以提供有关道路堵塞的最新消息、推荐最佳行车路线以及提醒驾驶员避免交通事故等。由于该系统将应用大量的传感器组成的网络与各种车辆保持联系,人们可以利用计算机来监视每一辆汽车的运行状况,如制动质量、发动机调速时间等。根据具体情况,计算机可以自动进行调整,使车辆保持在高效低耗的最佳运行状态,并就潜在的故障发出警告,或

直接与事故抢救中心取得联系。

4.3 军事信息栅格

在军事领域,无线传感器网络将成为C⁴ISRT(Command, Control, Communication, Computing, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance and Targeting)系统不可或缺的一部分。C⁴ISRT系统的目标是利用先进的高科技技术为未来的现代化战争设计一个集命令、控制、通信、计算、智能、监视、侦察和定位于一体的战场指挥系统,且受到了军事发达国家的普遍重视。无线传感器网络是由密集型、低成本、随机分布的节点组成的,自组织性和容错能力使其不会因为某些节点在恶意攻击中的损坏而导致整个系统的崩溃,这一点是传统的传感器技术所无法比拟的;正是这一点使传感器网络非常适合应用于恶劣的战场环境中。

5 结语

无线传感器网络是下一代“无处不在的计算”的关键技术。它的出现整合并推动了传感器、微机电系统和网络3种技术。目前世界范围内的研究已进入原型机实验与标准制定阶段。无线传感器网络有着传统技术不可比拟的优势,同时也必将开辟出不少新颖而有价值的商业应用。

参考文献(Reference)

- [1] Sanli H O. Energy efficient differentiable coverage service protocols for wireless sensor networks [C]. Pervasive Computing and Communications Workshops, 2005, 406~410
- [2] Gracanin D. A service-centric model for wireless sensor networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(6): 1 159~1 166
- [3] www.tinyos.net
- [4] telegraph.cs.berkeley.edu/tinydb/
- [5] www.cs.cornell.edu
- [6] www.isis.vanderbilt.edu/projects/nest/
- [7] www.cens.ucla.edu/Research
- [8] nms.lcs.mit.edu/projects/
- [9] www.intel.com
- [10] Su W. Time-diffusion synchronization protocol for wireless sensor networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2005, 13(2): 384~397
- [11] Qicai Shi. Performance analysis of relative location estimation for multihop wireless sensor networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(4): 830~838
- [12] Sabbineni H. Location-aided flooding: an energy-efficient data dissemination protocol for wireless-sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2005, 54(1): 36~46

(责任编辑 王 芷)