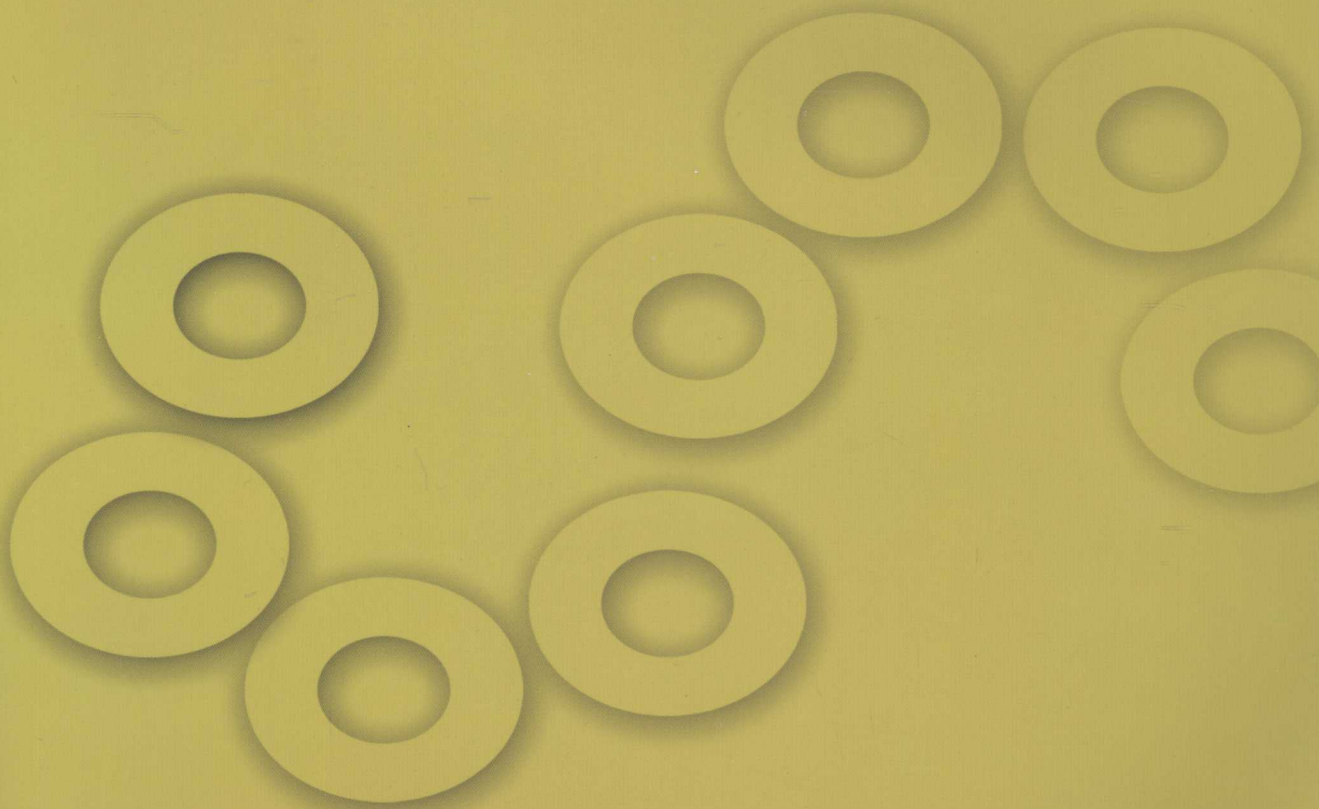


无线传感器网络与信息融合

Wireless Sensor Networks and Information Fusion

主 编 童利标 漆德宁

副主编 李从利 陆文骏



安徽人民出版社

无线传感器网络与信息融合

Wuxian Chuanganqi Wangluo Yu Xixi Ronghe

主 编 童利标 漆德宁

副主编 李从利 陆文骏

责任编辑:杜宇民

装帧设计:李从利

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络与信息融合/童利标、漆德宁主编. —合肥:安徽人民出版社,2008. 6
ISBN 978-7-212-03280-7

I. 无… II. 童… III. 无线电通信—传感器—应用—信息处理—高等学校—教材
IV. TP212 G202

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 072100 号

无线传感器网络与信息融合

主编 童利标 漆德宁

出版发行:安徽人民出版社

地 址:合肥市政务文化新区圣泉路 1118 号出版传媒广场 邮编:230071

发 行 部:0551-3533258 0551-3533292(传真)

编 辑 室:0551-3533272

经 销:新华书店

制 版:合肥市中旭制版有限责任公司

印 刷:合肥远东印务有限责任公司

开 本:787×1092 1/16 印张:16.75 字数:420 千

版 次:2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷

标准书号:ISBN 978-7-212-03280-7

定 价:38.00 元

本版图书凡印刷、装订错误可及时向承印厂调换

前 言

无线传感器网络和信息融合技术是当今国内外备受关注的由多学科高度交叉的两个新兴前沿研究领域。无线传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术和分布式信息处理技术等,能够通过各类集成化的微型传感器协作,实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息。信息融合技术是上世纪 80 年代形成和发展起来的一种自动化信息综合处理技术,它充分利用多源数据的互补性和电子计算机的高速运算与智能来提高结果信息的质量。无线传感器网络和信息融合技术具有十分广阔的应用前景,在军事国防、工农业、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、反恐反恐和危险区域远程控制等许多领域都有重要的科研价值和巨大的实用价值,并被公认为是对 21 世纪产生巨大影响的技术。

作者在进行无线传感器网络和信息融合课题研究的过程中,深深感到,虽然无线传感器网络和信息融合技术广泛用于军事等特定应用领域,但至今尚未形成完整的理论框架。本书则侧重于从无线传感器网络和信息融合技术在军事和民用领域的具体成果方面作一些较详细的阐述,以期对新近涉足这一领域的读者有所启发。书中综合介绍了该领域国内外的一些研究成果,并融入了作者近几年的应用研究成果。

本书融科学性、先进性、系统性和实用性于一体,主要有以下特点:

第一,全面、深入地阐述了无线传感器网络的体系结构、关键技术、相关标准及设计应用,充分反映出该领域的国内外最新科技成果。

第二,结构严谨,条理清晰,逻辑性强。内容由浅入深,各章之间也保持相对的独立性,读者既可通读全书,亦可选读部分章节的内容。

第三,具有很高的实用价值。全书给出了无线传感器网络和信息融合技术的多个应用实例,对广大读者开发新型无线传感器网络与信息融合系统,具有重要的参考价值。

全书统筹定稿及第4、第6和第7章由童利标完成,第1、第2章由漆德宁编写,第3章由郑锴编写,第5章由李从利编写,第8章由陆文骏编写。此外何世杰、汪艳红等研究生也参与了部分章节的编写和资料收集整理工作。

书中引用了一些作者的论著及其研究成果,这对于本书的编写是非常重要的,我们在此向他们表示深深的敬意和诚挚的感谢。

作者才疏学浅,书中错误在所难免,对于书中的不当之处,敬请读者批评指正。

主 编

2008年6月

目 录

前 言	(1)
第 1 章 无线传感器网络概述	(1)
1.1 无线传感器网络的基本概念	(1)
1.2 无线传感器网络的发展	(4)
1.3 无线传感器网络的应用	(6)
1.4 无线传感器网络所面临的挑战	(11)
第 2 章 无线传感器网络体系结构	(14)
2.1 无线传感器网络系统架构	(14)
2.2 无线传感器网络体系结构的设计要求	(15)
2.3 无线传感器网络的体系	(17)
2.4 无线传感器网络拓扑结构	(20)
2.5 无线传感器节点结构	(23)
第 3 章 无线传感器网络关键技术	(25)
3.1 无线传感器网络的路由协议	(25)
3.2 无线传感器网络的 MAC 协议	(37)
3.3 无线传感器网络的拓扑控制	(46)
3.4 无线传感器网络的节点定位	(67)
第 4 章 无线传感器网络技术相关标准	(81)
4.1 IEEE 1451	(81)
4.2 IEEE 802.15.4	(90)
4.3 ZigBee	(95)
第 5 章 无线传感器网络设计与应用	(101)
5.1 无线传感器网络的硬件系统	(101)
5.2 无线传感器网络的操作系统	(108)
5.3 无线传感器网络的后台管理软件	(112)
5.4 无线传感器网络的仿真平台	(117)

第6章 多传感器信息融合	(126)
6.1 多传感器信息融合技术概述	(126)
6.2 多传感器信息融合的功能和结构模型	(130)
6.3 多传感器信息融合的过程	(134)
第7章 信息融合技术在机器人手爪中的应用	(137)
7.1 多传感器手爪数据融合概述	(137)
7.2 手爪夹持力和安全连接状态的融合	(153)
7.3 手爪多维腕力的融合	(165)
7.4 多传感器信息融合实例:用于手爪的网络化智能传感器	(178)
第8章 信息融合技术在军事上的应用	(197)
8.1 军事信息融合技术概述	(197)
8.2 军事信息融合的功能模型和结构模型	(202)
8.3 炮兵信息融合系统	(213)
8.4 军事信息融合技术的应用	(230)
参考文献	(262)

第 1 章 无线传感器网络概述

无线传感器网络(WSN)是将大量的具有通信与计算能力的微小传感器节点,通过人工布设、空投、火炮投射等方法设置在预定的监控区域,构成的“智能”自治测控网络系统,能够监测、感知和采集各种环境信息或监测对象的信息。无线传感器网络具有重要的科研价值和广泛的应用前景,它的出现引起了全世界的广泛关注,被公认为是将对 21 世纪产生巨大影响的技术之一。

1.1 无线传感器网络的基本概念

无线传感器网络和基于无线传感器网络的自主智能系统是涉及微机电系统、计算机、通信、自动控制、人工智能等多学科的综合性技术。

MEMS(Micro - electromechanical Systems)的迅速发展奠定了设计和实现片上系统(System On Chip, SOC)的基础,使得将多种传感器集成为一体,制造小型化、低成本、多功能的传感器节点成为可能。

大量的 MEMS 传感器节点只有通过低功耗的无线电通信技术连成网络才能够发挥其整体的综合作用;更小、更廉价的低功耗计算设备代表的“后 PC 时代”冲破了传统台式计算机和高性能服务器的设计模式,普及的网络化带来了难以估量的计算处理能力。

在通信方式上,无线电、红外、声等多种无线通信技术的发展为微传感器间通信提供了多种选择,尤其是以 IEEE 802.15.4 为代表的短距离无线电通信标准的出现,无疑为无线传感器网络的发展奠定了坚实的基础。

具有群体智能的自治系统的行为实现和控制是自动控制和人工智能领域的前沿研究内容,从而为无线传感器网络的智能性提供了有力的技术支持。

以上几个方面的高度发展孕育出了许多新的信息获取和处理模式。无线传感器网络就是其中一例。随机分布的,集成有传感器、数据处理单元和通信模块的微小节点通过自组织的方式构成网络,借助于节点中内置的形式多样的传感器感知所在周边环境中的热、红外、声呐、雷达和地震波信号,从而探测包括温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分、移动物体的大小、速度和方向等众多我们感兴趣的物理现象,并通过无线通信传送信息,由此构成了无线传感器网络。

尽管很多文献给出了多种无线传感器网络的定义,但是实际上是大同小异的。本书采用如下的无线传感器网络定义:

无线传感器网络是由大量无处不在的,具有通信与计算能力的微小传感器节点密集布设在无人值守的监控区域而构成的能够根据环境自主完成指定任务的“智能”自治测控网络

系统。

由于传感器节点数量众多,布设时只能采用随机投放的方式,传感器节点的位置不能预先确定;在任意时刻,节点间通过无线信道连接,自组织网络拓扑结构;传感器节点间具有很强的协同能力,通过局部的数据采集、预处理以及节点间的数据交互来完成全局任务。无线传感器网络是一种无中心节点的全分布系统。由于大量传感器节点是密集布设的,传感器节点间的距离很短,因此,多跳(multi-hop)、对等(peer to peer)通信方式比传统的单跳、主从通信方式更适合在无线传感器网络中使用,由于每跳的距离较短,无线收发器可以在较低的能量级别上工作。另外,多跳通信方式可以有效地避免在长距离无线信号传播过程中遇到的信号衰减和干扰等各种问题。

无线传感器网络可以在独立的环境下运行,也可以通过网关连接到现有的网络基础设施上,如 Internet 等。在后面这种情况中,远程用户可以通过 Internet 浏览无线传感器网络采集的信息。

在过去的 80 多年里,无线网络技术取得了突飞猛进的发展。从人工操作的无线电报网络到使用扩频技术的自动化无线局域、个域网络,无线网络的应用领域随着技术的进步不断地扩展。但迄今为止,主流的无线网络技术,如 IEEE 802.11、Bluetooth,都是为了数据传输而设计的,我们称之为无线数据网络。目前,无线数据网络研究的热点问题是无线自组网络技术。作为 Internet 在无线和移动范畴的扩展和延伸,无线自组网络可以实现不依赖于任何基础设施的移动节点在短时间内的互联。与传统网络相比,无线自组网络具有以下显著特点:

①无中心和自组织性:无线自组网络中没有绝对的控制中心,所有节点的地位平等,网络中的节点通过分布式算法来协调彼此的行为,无需人工干预和任何其他预置的网络设施,可以在任何时刻任何地方快速展开并自动组网。由于网络的分布式特征、节点的冗余性和不存在单点故障瓶颈,使得网络的鲁棒性和抗毁性很好。

②动态变化的网络拓扑:网络的拓扑结构是指从网络层角度来物理网络的逻辑视图。在无线自组网络中,移动终端能够以任意速度和任意方式在网中移动,并可以随时关闭电台;无线收发装置的天线类型多种多样、发送功率随着携带能量的变化而变化;加之无线信道间的互相干扰、地形和天气等综合因素的影响,移动终端间通过无线信道形成的网络拓扑随时可能发生变化,而且变化的方式和速度都难以预测。

③受限的无线传输带宽:无线自组网络采用无线传输技术作为底层通信手段,由于无线信道本身的物理特性,它所能提供的网络带宽相对有线信道要低得多。此外,考虑到竞争共享无线信道产生的冲突、信号衰减、噪声和信道之间干扰等多种因素,移动终端得到的实际带宽远小于理论上的最大带宽。

④移动终端的能力有限:无线自组网络中移动终端具有携带方便、轻便灵巧等好处,但是也存在固有缺陷,如能源受限、内存较小、CPU 性能较低等,从而给应用程序设计开发带来一定的难度;屏幕等外设较小,不利于开展功能较复杂的业务。

⑤多跳路由:由于节点发射功率的限制,节点的覆盖范围有限。当它要与其覆盖范围之外的节点进行通信时,需要中间节点的转发。此外,无线自组网络中的多跳路由是由普通节点协作完成的,而不是由专用的路由设备完成的。

⑥安全性较差:无线自组网络是一种特殊的无线移动网络,由于采用无线信道、有限电源、分布式控制等技术,它更加容易受到被动窃听、主动入侵、拒绝服务、剥夺“睡眠”等网络攻击。

信道加密、抗干扰、用户认证和其他安全措施都需要特别考虑。

⑦网络的可扩展性不强:在目前 Internet 环境下,可以采用子网、无级域间路由(Classless Inter Domain Routing, CIDR)和变长子网掩码(Variable Length Subnet Masks, VLSM)等技术,增强 Internet 的可扩展性。但是动态变化的拓扑结构使得具有不同子网地址的移动终端可能同时处于一个无线自组网络中,因而子网技术所带来的可扩展性无法应用在无线自组网络环境中。

无线传感器网络与无线自组网络有许多相似之处,也具有无线自组网络的前6条属性,有些文献甚至将无线传感器网络作为无线自组网络的一种。但通过比较可以发现,二者存在着一些本质的区别。首先,二者的应用目标不同。无线自组网络在不依赖于任何基础设施的前提下,以为用户提供高质量的数据传输服务为主要目标。无线传感器网络以监控物理世界为主要目标。从这种意义上讲,无线自组网络是一种数据网络,而无线传感器网络是一种测控网络。其次,无线传感器网络具有以下一些区别于无线自组网络的独有的特点:

①超大规模:为了完成对物理世界高密度的感知,无线传感器网络系统一般由成千上万个微小传感器构成,较无线自组网络规模成数量级的提高。无线传感器网络主要不是依靠单个设备能力的提升,而是通过大规模、冗余的嵌入式设备的协同工作来提高系统的可靠性和工作质量。尽管在未来的5至10年内,具有计算、存储、通信、感知能力的嵌入式设备(节点)的体积可以小到 1mm^3 ,但单体设备的能力还十分有限。

②无人值守:传感器的应用与物理世界紧密联系,微传感器节点往往密集地分布于需要监控的物理环境之中。由于规模巨大,不可能人工“照顾”每个节点,网络系统往往在无人值守的状态下工作。每个节点只能依靠自带或自主获取的能源(电池、太阳能)供电。由此导致的能源受限是阻碍无线传感器网络发展及应用的最重要的“瓶颈”之一。

③易受物理环境的影响——动态性强:无线传感器网络与其所在的物理环境密切相关,并随着环境的变化而不断的变化。这些时变因素严重地影响了系统的性能,如低能耗的无线通信易受环境因素的影响;外界激励变化导致的网络负载和运行规模的动态变化;随着能量的消耗,系统工作状态的变化等都要求传感器网络系统要具有对动态环境变化的适应性。

WSN 的早期研究得到了美国国防部高级研究计划局(DARPA)大力支持,多数项目偏重军事应用,由此产生的影响至今还遗留在 WSN 的定义中。目前大多数研究者普遍接受的既成事实的 WSN 定义为:大规模、无线、自组织、多跳、无分区、无基础设施支持的网络、其中的节点是同构的、成本较低、体积较小、大部分节点不移动、被随意撒布在工作区域,要求网络系统有尽可能长的工作时间。这一附加了诸多限制条件的定义充分考虑了战场等恶劣环境下的特殊要求,所界定的技术目标很高,使理论研究面临很大的挑战,这是该定义积极的一面。但在具体工程应用中,该定义的局限性有时也会影响,甚至是束缚研究思路。譬如:定义默认节点的同构性(虽然允许 sink 节点有适度差异,但网络中的节点却被认为是同构的),因此,在时间同步的研究中便放弃了利用装备 GPS 的异构节点作为 Beacon 节点进行授时以提高同步精度的方案,转而寻找纯粹的利用节点间的消息交互来解决同步的方案。不可否认,在一定的应用场合,我们需要非 GPS 支持的同步方案,但也不全然如此。

定位的研究也存在类似的问题,虽然沿着 LPS(局部定位系统)的思路给出了一些定位机制和算法,但目前看来,性能还都不够理想,无法应用于工程实践。因此,一些实际的工程项目选择在部分节点装备了 GPS 接收机来辅助完成定位。同构的节点给系统集成带来了便利,但

系统较脆弱,利用节点异构性增强 WSN 的抗攻击能力或许是一种可选的技术途径。

此外,如果仔细分析,上述定义中的有些要素是相互关联的:譬如大规模和低成本,因如果网络规模很大,势必要求压低每个节点的实现成本。但如果在一些无需大规模网络支持的应用场合,比如在医疗保健等,用在病人的网络节点数量不会很多,未必一定要追求低成本。自组织和无基础设施支持在某些场合也是相关联的。如果我们有良好的基础设施(如 GSM 网络等)可以利用,可以大大简化组网的复杂度,增强网络的可靠性。因为传统网络规划和路由配置技术已经相当成熟,在环境监测等可依赖基础设施的应用中应该能降低技术的实现难度,加速应用的推广。

还有,低功耗几乎成了目前 WSN 研究的一个核心,低功耗的 MAC 协议、路由协议、传输协议,甚至在操作系统中也强调低功耗设计。不可否认,在一些条件苛刻的应用中,如何降低系统功耗,延长网络生命周期是一个非常关键的问题,但不是所有环境下,功耗问题都应该是 WSN 研究的首要优化目标。如果网络节点接近电源系统,或节点可充电,低功耗的要求便没有那么强烈。由此,拓扑控制等减小系统功耗的方案不见得非常必要。当然,从理论研究的角度看,在最极端的条件下,给出最理想的方案应该是我们追求的目标,但从工程实践的角度分析,却未必如此。

最后,关于 WSN 的命名还有一个较大的争议。如前所述,有研究者认为:既然 WSN 研究的最终目标是利用传感器网络节点装备我们生活的物理世界,并实现全方位的测试与控制。那么目前“无线传感器网络”这个名词本身是不完备的,因为它不能准确描述和刻画确定的目标。因为最终目标是全方位测试与控制,而无线传感器网络只能实现测试,是单向的,没有构成控制回路。他们认为“无线传感器和执行机构网络”能更全面准确地概括技术目标。另外,后来衍生出来的水声传感器网络,以及最近提出来无线地下传感器网络,对无线传感器网络这一概念的内涵和外延也提出了新的挑战。再者,已经被成熟应用于工业自动化领域的基于现场总线的各种工控网络也正在逐渐无线化,这也给准确定义 WSN 带来了困难。如何在理论研究和工程实践中定义无线传感器网络这一概念的内涵和外延确实是一个值得进一步讨论的话题。可用“狭义无线传感器网络”和“广义无线传感器网络”来加以区分。前者继承 WSN 的历史定义,具有丰富的内涵和相对较窄的外延,强调理论研究;后者则以应用为中心,偏重工程实现,具有简单的内涵和宽泛的外延,具体讲就是一切借助无线通信技术实现网络化的监控系统均可视为广义无线传感器网络研究的范畴,这一概念与定义也涵盖了近来逐渐成为工业控制领域研究热点的无线工控网路。狭义无线传感器网络强调的微型化、自组织和低功耗等属性不再是它必备的,它仅仅强调灵活、便捷的无线通信技术对传统的独立传感器注入网络通信功能后所展现的勃勃生机和巨大潜能。因为以应用为中心,采用成熟、简单、可行的技术是理智的选择,而突破制约与限制,探求新机制和新算法的努力则不是广义无线传感器网络研究的主要任务。

1.2 无线传感器网络的发展

WSN 的基本思想起源于 20 世纪 70 年代;1978 年,DARPA 在卡耐基-梅隆大学成立了分布式传感器网络工作组;1980 年,DARPA 的分布式传感器网络项目(WSN)开启了传感器网络

研究的先河;20世纪80至90年代,研究主要在军事领域,成为网络中心战的关键技术,拉开了无线传感器网络研究的序幕;20世纪90年代中后期,WSN引起了学术界、军界和工业界的广泛关注,发端了现代意义的无线传感器网络技术。

2003年2月份,美国的《技术评论》杂志评选出对人类生活产生深远影响的十大新兴技术中,WSN被列为其中之一。美国的《商业周刊》在2003年8月份的技术评论中,将WSN定位为21世纪高技术领域中的四大支柱型产业之一。美国《今日防务》杂志认为WSN的应用和发展,将引起一场划时代的军事技术革命和未来战争的变革。2004年,《IEEE Spectrum》杂志发表一期专题:传感器国度,专门论述WSN的发展与可能的广泛应用。具体而言,WSN的地位可从以下三方面分析。

(1) 第四代传感器网络

可将传感器网络的发展划分为4个阶段。一般将简单点到点信号传输功能的传统传感器所组成的测控系统称为第一代传感器网络;第二代为由智能传感器和现场控制站组成的测控网络;第三代为基于现场总线的智能传感器网络;无线传感器网络为第四代传感器网络,其应用领域发生了很大的变化。

(2) 新一代计算设备

依计算科学领域的Bell定律,每十年会有一类新的计算设备诞生。是从巨型机、小型机、工作站、PC、PDA到WSN节点、生物芯片。WSN被认为是新一代的计算设备。

(3) 普适计算的一个重要途径

普适计算是与信息空间发展相适应的一种计算模式。1991年,Mark Weiser提出了“普适计算(Pervasive Computing)”的思想,即把计算机嵌入到环境或日常生活中去,让计算机从人们视线中消失,使人们能够随时随地和透明地获得数字化的服务。WSN是普适计算的一个重要途径,是普适计算发展的趋势。在WSN环境中,在任何时间、任何地点能够与外界信息更方便地交流,让人们可以自由地穿行于物理世界和信息空间中,实现物理世界与信息世界的融合。

无线传感网络的研究历史不长,但发展很快。从国外的研究现状来看,整体的研究成果仍处于原型和小规模试验阶段,距离实际应用需求还有一定距离。对我国而言,无线传感网络的研究处于起步阶段,因此,无线传感网络给科技工作者提供了巨大的研究空间。具体地从以下方面介绍WSN的研究现状。

(1) 美国

美国军方最先开始无线传感器网络技术的研究,开展了包括有CEC、REMBASS、TRSS、Sensor IT、WINS、Smart Dust、Sea Web、 μ AMPS、NEST等研究项目。美国国防部远景计划研究局已投资几千万美元,帮助大学进行无线传感器网络技术的研发。

美国国家自然基金委员会(NSF)也开设了大量与其相关的项目,NSF于2003年制定WSN研究计划,每年拨款3400万美元支持相关研究项目,并在加州大学洛杉矶分校成立了传感器网络研究中心。2005年对网络技术和系统的研究计划中,主要研究下一代高可靠、安全的可扩展的网络,可编程的无线网络及传感器系统的网络特性,资助金额达到4000万美元。此外,美国交通部、能源部、美国国家航空航天局也相继启动了相关的研究项目。

美国所有著名院校几乎都有研究小组在从事WSN相关技术的研究,加州大学洛杉矶分校、加州大学伯克利分校、麻省理工学院、康奈尔大学、哈佛大学、卡耐基-梅隆大学等在WSN研究领域成绩较为突出。国际相关学术会议对WSN的研讨增多,检索论文数目逐年以较大幅

度增加。

美国的 Crossbow、Dust Network、Ember、Chips、Intel、Freescale 等公司也开展了 WSN 的研究工作。

(2) 其他国家

加拿大、英国、德国、芬兰、日本和意大利等国家的研究机构也加入了 WSN 的研究。

欧盟第 6 个框架计划将“信息社会技术”作为优先发展领域之一,其中多处涉及对 WSN 的研究,启动了 EYES 等研究计划。

日本总务省在 2004 年 3 月成立了“泛在传感器网络”调查研究会。

韩国信息通信部制订了信息技术“839”战略,其中“3”是指 IT 产业的三大基础设施,即宽带融合网络、泛在传感器网络、下一代互联网协议。

欧盟的 Philips、Siemens、Ericsson、ZMD、France Telecom、Chipcon 等公司;日本的 NEC、OKI、SKYLEYNETWORKS、世康、欧姆龙等公司都开展了 WSN 的研究。

(3) 中国

我国关于 WSN 研究首次正式启动出现于 1999 年中国科学院《知识创新工程重点领域方向研究》的《信息与自动化领域研究报告》中,是该领域的五大重点项目之一。2001 年,中国科学院依托上海微系统所成立微系统研究与发展中心,旨在引领中科院 WSN 的相关工作。

国家自然科学基金已经审批了 WSN 相关的一个重点课题和多项课题。2004 年,将一项无线传感器网络项目(面上传感器网络的分布自治系统关键技术及协调控制理论)列为重点研究项目。2005 年,将网络传感器中的基础理论和关键技术列入计划。2006 年,将水下移动传感器网络的关键技术列为重点研究。国家发改委下一代互联网(CNGI)示范工程中,也部署了 WSN 相关的课题。

在一份我国未来 20 年预见技术的调查报告中,信息领域 157 项技术课题中有 7 项与传感器网络直接相关。2006 年初发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》为信息技术定义了 3 个前沿方向,其中两个与 WSN 的研究直接相关,即智能感知技术和自组织网络技术,我国 2010 年远景规划和“十一五”规划中将 WSN 列为重点发展的产业之一。

1.3 无线传感器网络的应用

无线传感器网络可以包含大量的由震动、(地)磁、热量、视觉、红外、声音和雷达等多种不同类型传感器构成的网络节点,可以用于监控温度、湿度、压力、土壤构成、噪声、机械应力等多种环境条件。传感器节点可以完成连续的监测、目标发现、位置识别和执行器的本地控制等任务。

微型传感器技术和节点间的无线通信能力为无线传感器网络赋予了广阔的应用前景。作为一种无处不在的感知技术,无线传感器网络广泛应用于军事、环境、医疗、家庭和其他商用、工业领域;在空间探索和反恐、救灾等特殊的领域,它也有着得天独厚的技术优势。

(1) 军事应用

无线传感器网络的相关研究最早起源于军事领域。由于其具有可快速部署、自组织、隐蔽性强和高容错性的特点,因此能够实现对敌军地形和兵力布防及装备的侦察、战场的实时监

视、定位攻击目标、战场评估、核攻击和生物化学攻击的监测和搜索等功能。

在战场中,指挥员往往需要及时、准确地了解敌我人员、武器装备、通信和军用物资供给的情况。通过随机撒播、特种炮弹发射等手段,可以将大量传感器节点密集地散布于预定区域,收集该区域内有价值的信息,并通过汇聚节点将数据传送至指挥所,也可经由卫星信道转发到指挥部,最后融合来自各战场的的数据形成我军完备的战区态势图。在战争中,对冲突区和军事要地的监视也是至关重要的:通过布设无线传感器网络,可以方便地监控我军布防的阵地是否有敌军入侵,或是以更为隐蔽的方式近距离地观察敌方的布防;当然,也可以直接将传感器节点撒向敌方阵地,在敌方还未来得及反应时迅速收集有关作战信息。无线传感器网络可以为火控和制导系统提供准确的目标定位信息。在生物和化学战中,利用无线传感器网络及时、准确地探测爆炸中心将会为我军提供宝贵的反应时间,从而最大可能地减小伤亡。作为 C^4 ISRT 系统的一个不可或缺的组成部分,无线传感器网络以其低成本、密集型、随机分布、自组织性和强容错能力的特点,及时、准确地为战场指挥系统提供高可靠的军事信息。即使在部分传感器节点失效时,无线传感器网络作为整体仍能完成观测任务。

美国国防部和各军事部门都对传感网络给予了高度重视。在 C^4 ISR 的基础上提出了 C^4 KISR 计划,强调战场情报的感知能力、信息的综合能力和信息的利用能力。把传感网络作为一个重要研究领域,设立了一系列的军事传感网络研究项目。美国隶属于总统办公厅的国家信息技术研究与发展综合办公室主任大卫·纳尔逊说,无线传感网络技术,预示着为战场上带来新的电子眼和电子耳,“能够在未来几十年内变革战场环境”。先进的传感器技术使传感器设备的创造成为必需,使它能够检测一些像运动这样的物理现象,处理收集到的数据,向网络中心无线传输这些数据。美国军方开展了许多项 WSN 的研究项目,并取得了一批研究成果。

由美国国防部远景计划研究局 DARPA (Defense Advanced Research Project Agency) 资助,加州大学洛杉矶分校与罗克韦尔研究中心合作开展的 WINS (Wireless Integrated Network Sensors) 开始于 1996 年。该研究计划的目标是结合 MEMS 技术、信号处理技术、嵌入式计算和无线通信技术,构造大规模、复杂的集成传感系统,实现物理世界与网络世界的连接。

美国 DARPA 在 1998 年启动了 SensIT (Sensor Information Technology) 计划。该计划的目的是将多种类型的传感器、可重编程的通用处理器和无线通信技术组合起来,建立一个廉价的无处不在的网络系统,用以监测光学、声学、震动、磁场、湿度、污染、毒物、压力、温度、加速度等物理量。该计划共有 29 个研究项目,分别在 25 个研究机构完成。

在 DARPA/MTO MEMS 的资助下,U. C. Berkeley 大学于 1998 年开始了名为 Smart Dust 的研究计划,其目标是结合 MEMS 技术和集成电路技术,研制体积不超过 1mm^3 ,使用太阳能电池,具有光通信能力的自治传感器节点。由于体积小、重量轻,该节点可以附着在其他物体上,甚至可以在空气中浮动。

Sea Web 是由美国海军研究办公室 (ONR) 支持,目标是研究基于水声通信的无线传感器网络的组网技术。该项目针对水声通信带宽窄、速率低、时延抖动大等特点,利用无线传感器网络获取的信息对水声信道时变、空变的特点进行建模。该项目在 1999 年到 2004 年间进行了多次实验,取得了大量的现场数据,验证了构造水声传感器网络系统的可行性。

美国陆军 2001 年提出了“灵巧传感器网络通信”计划,在 2001—2005 财政年度期间批准实施。灵巧传感器网络通信的目标是建设一个通用通信基础设施,支援前方部署,将无人值守

式弹药、传感器和未来战斗系统所用的机器人系统连成网络,成倍地提高单一传感器的能力,使作战指挥员能更好、更快地做出决策,从而改进未来战斗系统的生存能力,后来,美国陆军确立了“无人值守地面传感器群”项目,其主要目标是使基层部队指挥员具有在他们所希望部署传感器的任何地方灵活地部署传感器的能力,该项目是支持陆军“更广阔视野”的3个项目之一。美国陆军最近还确立了“战场环境侦察与监视系统”项目,该系统是一个智能化传感器网络,可以更为详尽、准确地探测到精确信息,如一些特殊地形地域的特种信息,如登陆作战中敌方岸滩的翔实地理特征信息,丛林地带的地面坚硬度、干湿度等信息,为更准确地制定战斗行动方案提供情报依据。它通过“数字化路标”作为传输工具,为各作战平台与单位提供“各取所需”的情报服务,使情报侦察与获取能力产生质的飞跃。该系统组由撒布型微传感器网络系统、机载和车载型侦察与探测设备等构成。

美国海军也确立了“传感器组网系统”研究项目。传感器组网系统的核心是一套实时数据库管理系统。该系统可以利用现有的通信机制对从战术级到战略级的传感器信息进行管理,而管理工作只需通过一台专用的商用便携机即可,不需要其他专用设备。该系统以现有的带宽进行通信,并可协调来自地面和空中监视传感器以及太空监视设备的信息,该系统可以部署到各级指挥单位。此外,美国海军开展的协同交战能力(Cooperative Engagement Capability, CEC)是一项革命性的技术。CEC的实质就是把高性能传感器网络与高性能交战网络有机地结合起来,高效的传感器网络能快速生成交战质量的态势信息,交战网络则可把这一态势信息转化成更高的作战能力。CEC传感器网络的感知数据是原始的雷达数据,通过舰船或飞机战斗群携带的电脑进行感知数据的处理。每艘战船不但依赖于自己的雷达,还依靠其他战船或者装载CEC的战机来获取感知数据。例如,一艘战船除了从自己的雷达获取数据以外,还从舰船战斗群的20个以上的雷达中获取数据,也可以从鸟瞰战场的战机上获取数据。空中的传感器负责侦察更大范围的低空目标,这些传感器也是网络中的重要部分。利用这些数据合成的图片具有很高的精度。由于CEC可以从多方面探测目标,极大地提高了测量精度,利用CEC数据可以准确地击中目标。CEC还可以快速而准确地跟踪混乱战争环境中的敌机和导弹,使战船可以击中多个地平线或地平线以上近海面飞行的超声波目标。

美国BAE系统公司为提高美军的电子战能力而研发的“狼群”地面无线传感器网络系统,就是一个典型的无线传感器电磁信号监测网络。它具有多功能电子战能力,不仅可以监听敌方雷达和通信,分析敌方的网络和系统的运动,还可干扰敌方发射机或用算法包来渗透敌方的计算机。

美国科学应用国际公司采用无线传感器网络,构筑了一个电子周边防御系统,为美国军方提供军事防御和情报信息。在这个系统中,采用多枚微型磁力计传感器节点来探测某人是否携带枪支,以及是否有车辆驶来;同时,利用声传感器,该系统还可以监视车辆或者移动人群。其远期目标是能够通过无人飞机,将无线传感器投掷到崎岖不平、气候恶劣的地区,以达到监视敌人的目的。

网络嵌入式系统技术(NEST)战场应用实验作为DARPA主导的一个重要项目,致力于为火控和制导系统提供准确的目标定位信息。该项目成功地验证了能够准确定位敌方狙击手的无线传感器网络技术。这些传感器节点能够跟踪子弹产生的冲击波,在节点范围内测定子弹发射时产生声震和枪震的时间,以判定子弹的发射源。三维空间的定位精度可达1.5m,定位延迟达2s,甚至能显示出敌方射手采用跪姿和站姿射击的差异。

(2) 环境应用

无线传感器网络因其部署简单、布置密集、低成本和无需现场维护等优点为环境科学研究的数据获取提供了方便,因而可广泛应用于气象和地理研究、自然和人为灾害(如洪水和火灾)监测、监视农作物灌溉情况、土壤空气变更、牲畜和家禽的环境状况以及大面积的地表检测;还可以通过跟踪珍稀鸟类、动物和昆虫进行濒危种群的研究等。

在美国的 ALERT 计划中,研究人员开发了数种传感器来分别监测降雨量、河水水位和土壤水分,他们通过预定义的方式向中心数据库提供信息,并依此预测暴发山洪的可能性。类似地,对于森林火灾的监测,可以将传感器节点随机密布于森林之中。当发生火灾时,这些节点会协同工作,在很短的时间内将火源的具体地点、火势的大小等信息传回给有关部门。

2002 年,美国加州大学伯克利分校 Intel 实验室和大西洋学院联合在大鸭岛上部署了用来监测岛上海鸟生活习性的无线传感器网络。他们使用了包括光、湿度、气压计、红外传感器、摄像头在内的近 10 种类型的传感器,系统通过自组织无线网络,将数据传输到 100m 外的基站计算机内,再由此经卫星传输至加州的服务器进行分析研究。

2005 年,澳洲的科学家利用传感器网络来探测北澳大利亚的蟾蜍的分布情况。由于蟾蜍的叫声响亮而独特,因此利用声音作为检测特征比较有效。采集到的信号在节点上就地处理,然后将处理后的少数结果数据发回控制中心。

另外,还有研究人员把传感器节点布放在葡萄园内,测量葡萄园气候的细微变化。研究动机是,葡萄园气候的细微变化可极大影响葡萄的质量,进而影响葡萄酒的质量,通过长期的数据记录以及相关分析,便能精确地掌握葡萄酒的质地与葡萄生长过程中的日照、温度、湿度的确切关系。这无疑是一个典型的精准农业与智能耕种的实例。

为更好地了解地球气候的变化,挪威科学家利用 WSN 监测冰河的变化情况,目的在于通过分析冰河环境的变化来推断地球气候的变化。在没有基础设施支持的冰河中进行观测试验,WSN 成了最佳选择。网络节点被埋在冰床下面,深浅各不相同,节点除了可以测量压力和温度等基本参数外,还装备了特殊的传感器用来测方向,冰面上作为簇头的节点安装有 GPS 来定位,各簇头通过 GSM 链路将监测数据传回基站。本项目的一个技术难点是如何在水中和冰里提供可靠的无线通信支持。

WSN 还在一些特殊应用中发挥出了意想不到的效用。哈佛大学 Mate Wel 领导的研究小组利用 WSN 对活火山 Volcan Tungarahua 进行了持续观测,节点采集的次声波数据被实时传回离火山十几公里远的监测站,而且监测站还可以远程控制各网络节点。在传统观测模式下,只能事先放置好观测节点,等火山喷发告一段落后,取回节点,读出数据。相比而言,WSN 为这种特殊的监测任务增添了更多可控性,降低了试验的危险性。

电子牧场是一个非常有趣的研究项目。在牛的脖子上套上 WSN 节点,当牛接近围栏时,上面的电子装置探测到有牛接近围栏,随即模拟出驱赶牛的声音,防止牛跑出电子桩划定的放牧区域,这样放牧人便可以坐在家中轻松自在地喝咖啡、看电视。

(3) 医疗应用

无线传感器网络所具备的自组织、微型化和对周围区域的感知能力等特点,决定了它在检测人体生理数据、健康状况、医院药品管理以及远程医疗等方面可以发挥出色的作用,因而在医疗领域有着广阔的应用前景。

如果在住院病人身上安装特殊用途的传感器节点,如心率和血压监测设备,利用无线传感

器网络,远端的医生就可以随时了解被监护病人的病情,进行及时处理。还可以利用无线传感器网络长时间地收集人体的生理数据,这些数据在研制新药品的过程中非常有用。在药品管理方面,将传感器节点按药品种类分别放置,计算机系统即可帮助辨认所开的药品,从而减小病人用错药的可能性。在 SSIM(Smart Sensors and Integrated Microsystems)项目中,100 个微型传感器被植入病人眼中,从而帮助盲人获得了一定程度的视觉。

科学家还创建了一个“智能医疗之家”,即一个 5 间房的公寓住宅,使用无线传感器网络来测量居住者的重要生命体征(血压、脉搏和呼吸)、睡觉姿势以及每天 24 小时的活动状况,所搜集的数据被用于开展相应的医疗研究。

哈佛大学的一个研究小组利用无线传感器网络构建了一个医疗监测平台。传统模式下,住院病人躺在病床上,身上安装了若干监测传感器,通过线缆被连接到病床边的监测仪器上。这种模式下,病人必须呆在床上,很不自由。利用无线传感器网络技术,病人便可摆脱线缆的束缚,自由活动,医生通过手持 PDA 可以随时接收报警消息或查询病人状况。该系统已经在美国一些医院里进行测试。

(4) 家庭应用

嵌入家具和家电中的传感器与执行单元组成的无线网络与 Internet 连接在一起,能够为人们提供更加舒适、方便和具有人性化的智能家居环境。用户可以方便地对家电进行远程监控,如在下班前遥控家里的电饭锅、微波炉、电话机、录像机、电脑等家电,按照自己的意愿完成相应的煮饭、烧菜、查收电话留言、选择电视节目以及下载网络资料等工作。

在家居环境控制方面,将传感器节点放在家庭里不同的房间,可以对各个房间的环境温度进行局部控制。此外,利用无线传感器网络还可以监测幼儿的早期教育环境,跟踪儿童的活动范围,让研究人员、父母或是老师全面地了解和指导儿童的学习过程。

(5) 工业应用

自组织、微型化和对外部世界的感知能力,决定了无线传感器网络在工业领域大有作为。它包括车辆的跟踪、机械的故障诊断、建筑物状态监测等。

将无线传感器网络和 RFID(无线射频识别标签,简称“电子标签”)技术融合是实现智能交通系统的绝好途径。通过传感器节点的探测可以得到实时的交通信息,如车辆的数量、长度、道路拥塞程度等;通过车载主动式的 RFID 可以得到每辆车的精确信息,如车辆的编号、证号、车型以及车主的相关信息等。将这两个信息融合,就可以全面掌握交通信息,并根据需要查询、追踪某车辆。

在一些危险的工作环境,如煤矿、石油钻井、核电厂等。利用无线传感器网络可以探测工作现场有哪些员工、他们在做什么以及他们的安全保障等重要信息。

在机械故障诊断方面,Intel 公司曾在芯片制造设备上安装过 200 个传感器节点,用来监控设备的振动情况,并在测量结果超出规定时提供监测报告,效果非常显著。美国最大的工程建筑公司贝克特营建集团公司也已在伦敦地铁系统中采用了无线传感器网络进行监测。

采用无线传感器网络,可以让大楼、桥梁及其他建筑物能够感知并汇报自身的状态信息,从而让管理部门按照优先级来进行一系列的修复工作。例如,将具有温度、湿度、压力、加速度、光照等传感器的节点布放在重点保护对象当中,无须拉线钻孔,便可有效地对建筑物进行长期的监测。英国的一家博物馆利用无线传感器网络设计了一个警告系统,他们将节点放在珍贵文物或艺术品的底部或背面,通过侦测灯光的亮度是否改变,测量物品是否遭受到振动等