

无线传感反应网络综述

徐振阳 窦文华

(国防科学技术大学并行与分布国家重点实验室 长沙 410073)

摘要 从传感器网络衍生出来的传感反应网络是一种全新的信息获取和处理技术。本文先简要介绍了传感反应网络体系结构和特点,再结合已有研究,在设计和开发传感反应网络协议方面,讨论传感节点-反应节点和反应节点-反应节点协调中存在的问题,并探讨反应节点给通信协议带来的问题与挑战。

关键词 无线传感反应网络,无线传感器网络,协调,实时通信,传输,路由,介质访问控制

Wireless Sensor and Actor Networks

XU Zhen-Yang DOU Wen-Hua

(National Laboratory for Parallel & Distributed Processing, NUDT, Changsha 410073)

Abstract Sensor and actor network, which is extended from sensor network, is a novel technology about acquiring and processing information. In this paper, the architecture and characteristics of sensor and actor networks are briefly introduced. Then combining with the existing work, sensor-actor and actor-actor coordination problems are discussed, and research challenges and requirements in communication protocols occurring due to the presence of actors are explored in the design and development of sensor/actor network protocols.

Keywords Wireless sensor and actor networks (WSANs), Wireless sensor networks (WSNs), Coordination, Real-time communication, Transport, Routing, MAC

1 概述

随着硬件技术和工程技术的快速发展,数字电路、无线通信和 MEMS 的尺寸、能量消耗和花费都急剧减少。这使得制作紧凑的、具有自主和移动能力的节点成为可能,每个节点包含了一个或多个传感器和反应装置(具有计算能力和通信能力),以及电源。通过网络,这些节点被组织成一个完整的系统^[1]。目前,无线传感器网络(WSNs)已成为国内外研究的热门课题,而对从 WSNs 衍生出来的分布式无线传感反应网络(WSANs)的研究最近才起步。

将反应装置添加到 WSNs 所形成的 WSANs,极大地增强了传感器网络的应用能力和范围。它能够观察实体世界,处理数据,并能根据观察到的数据做出决策,执行合适的操作。这种网络具有广泛的应用前景,如战场监视系统、建筑内小气候控制系统,核生化攻击检测系统^[2],家庭自动化系统^[3]和环境监测系统^[4,5]等。

2 传感反应网络的体系结构

2.1 节点组成

WSANs 中传感节点和反应节点的部件如图 1 所示^[6]。传感节点一般都配备检测装置、模数转换器(ADC)、数据存储和处理子系统、数据通信子系统(含接收器和发送器)和电源装置。当传感节点的检测装置测量到周边环境中的热、光、声音等信号后,通过 ADC 将这种模拟数据转化为数字数据,再由处理器进行分析。之后,这些数字数据将被传输给附近的反应节点。与传感节点相比,反应节点没有配备检测装置、

模数转换器,但配备了决策装置、激励装置和数模转换器(DAC)。当反应节点的接收器接收到数字数据后,将数据交给处理器进行处理。之后,数字数据被送到决策装置,在那里,节点做出决策,并生成操作命令。然后,这种数字操作命令被 DAC 转化为模拟信号并通过激励装置将模拟信号转换为一种操作。

在一些应用中,采用综合传感/反应节点取代反应节点,如在分布式机器人系统^[7,8]中,机器人具有检测和反应能力,充当综合传感/反应节点。由于这类节点具有检测和反应能力,除了配备反应节点的所有部件外,还配备了检测装置和 ADC。

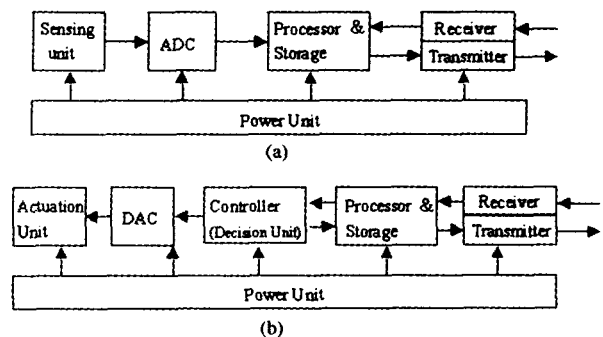


图 1 (a)传感节点部件与(b)反应节点部件

2.2 WSANs 物理结构

在 WSANs 中,传感节点和反应节点被部署在需要监测的环境中,如图 2 所示。传感节点负责从环境中收集数据,而

反应节点根据从传感节点接收到的数据执行相应的操作。Sink 一般远离被监测环境,负责监控整个网络,并与任务管理节点进行通信,必要时与传感/反应节点进行通信。

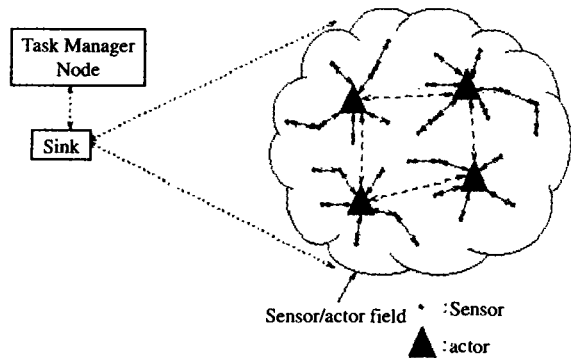


图2 WSANs 物理结构

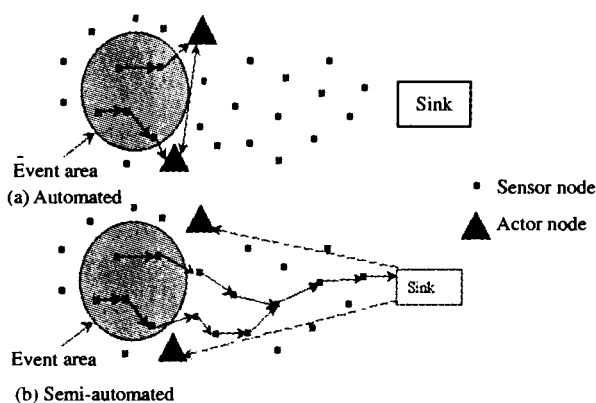


图3 (a)自动结构与(b)半自动结构

当传感节点检测到事件时,有两种方式将数据传输给反应节点。一种称为半自动结构方式,如图3(b)所示,传感节点先将数据路由回 sink,再由 sink 发送操作命令给反应节点。这种方式需要 sink 干预,但不需要传感节点与反应节点协调,也不需要反应节点与反应节点协调,类似于传统 WSNs 方式。另一种称为全自动结构方式,如图3(a)所示,传感节点将数据直接传递给反应节点,由反应节点来处理数据,并做出反应。这种方式不需要 sink 干预,而且由于传感节点与反应节点的距离相对接近,通信延迟低,消耗能量小,有助于延长网络的生存时间。但它需要分布式的传感节点与反应节点协调,以及反应节点与反应节点协调。在传感反应网络中,主要研究全自动结构。

在采用综合传感反应节点替代反应节点的应用中,这种综合传感反应节点虽然具有检测和反应能力,但检测范围很有限,主要是用来实施操作,因此仍需大量的传感节点来监视外部的环境,所以采用综合传感反应节点并不会改变 WSANs 结构。

2.3 WSANs 协议结构^[6]

传感节点和反应节点所用的协议栈如图4所示。管理平台(Management Plane)就其功能可分为三个方面:(1)能量管理平台:管理节点如何使用能量。(2)移动管理平台:检测和注册节点的移动,维护网络的连通性。(3)故障管理平台:探测和解决节点故障问题。协调平台(Coordination Plane)依据通信平台和管理平台接收到的数据,决定节点如何操作。通

信平台(Communication Plane)实现节点之间信息和连接关系的交换和共享,是传感节点和反应节点结构中最最重要的一个平台。它主要用来处理物理通道构造,节点的介质访问控制,路由选择,数据包传输。

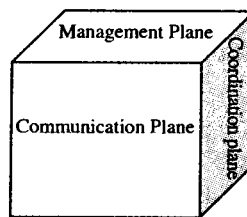


图4 WSANs 协议栈

2.4 WSANs 特点

从 WSNs 衍生而来的 WSANs 既有传感节点与反应节点通信,又有反应节点与反应节点通信。通信所需要实现的高效操作,都是通过传感节点和反应节点的协调来实现的,而执行数据收集和协调的中央组织并不是必须的。与 WSNs 相比,WSANs 具有如下特点:

(1)存在不同种类节点:在 WSNs 中一般只有传感节点一种类型。而 WSANs 中存在两类节点,一类为传感节点,只能被动检测环境,能量有限,处理能力和通信能力都比较弱;另一类为反应节点,可以主动对外部环境实施操作,能量资源丰富(更长的电池寿命或者恒定电源),具有更高的处理和通信能力。

(2)追求实时需求:在 WSNs 中, sink 一般距离事件区的传感节点比较远,从传感节点检测到事件至 sink 接收到数据需相当长的时间,实现实时需求难度很大。而在 WSANs 中,反应节点与传感节点距离相对接近,从传感节点检测到事件至反应节点做出反应之间的时间延迟较短,更能够满足实时应用的需求。WSANs 追求的一个主要目标就是减少检测和反应之间的通信延迟,要求反应节点对传感节点的输入快速做出反应。例如,在火灾应用中,事件区域周围的反应节点需要快速做出反应,并且传感数据在做出反应时必须是有有效的。因此,实时通信对 WSANs 很重要。

(3)存在多种部署要求:在 WSNs 中,只有一种类型的节点,不需要考虑多种部署问题。而在 WSANs 中不同类型的节点部署是不同的。为了便于监测环境,传感节点一般部署比较稠密,可能达到成百上千的数量级;而反应节点的部署应该考虑网络的连通性和作用范围的平衡,一般部署比较稀疏,只需保证至少有一个反应节点能够对环境中的每一点做出反应,但在要求多个反应节点对指定事件做出反应时,其应该部署足够密集,便于相互协调,同时对一个区域做出反应。

(4)存在多种协调:在 WSNs 中,主要的通信问题在于传感节点和 sink 之间。而在 WSANs 中,除了传感节点与反应节点通信外,主要的通信范例还需要反应节点与反应节点通信,以实现全面的应用目标。因此,为了提供高效的检测和反应,在传感节点和反应节点中分布式的局部协调机制是必要的,如传感节点与传感节点协调、传感节点与反应节点协调、反应节点与反应节点协调。

(5)具有移动特性:在 WSNs 中,一般考虑节点是静止的,或微小移动。而在 WSANs 中,节点,特别是反应节点,可能是移动的。例如,分布式机器人应用中的机器人、战场中配备数字收发器的战士通常是移动的。

3 传感反应网络研究中的热点问题

目前, ad-hoc, 传感器网络已经成为热门的研究课题, 而传感反应网络的研究才刚刚起步。从协议模型的角度分析, 每个平台都需要结合传感反应网络的特点进行细致研究, 但主要的研究集中在协调平台和通信平台。在 WSNs 中, 传感节点与反应节点间的通信有些类似于 WSNs 中传感节点与 sink 通信, 而反应节点之间的通信与 ad-hoc 中的通信模式类似。因此, 下面将结合 ad-hoc 网络和传感器网络的研究现状, 归纳总结 WSNs 研究中的热点问题。

3.1 协调平台

WSNs 中存在多种协调方式: 传感节点与传感节点协调、传感节点与反应节点协调、反应节点与反应节点协调。目前, 很少针对 WSNs 同时研究这几种协调。在文[9]中, 只研究了反应节点相互间协调。对传感节点相互协调的研究同 WSNs 中的研究一样, 这里就不多叙述。下面从另外两种协调方式来探讨 WSNs 中研究的难题。

3.1.1 传感节点与反应节点的协调 目前对传感节点与反应节点协调的研究需要解决以下几个问题:

(1) 如何进行协调? 我们将从单个反应节点 (Single-actor, SA) 和多个反应节点 (Multi-actor, MA) 两种情况来探讨这个问题。

SA 是指传感节点只将数据传送给一个反应节点。SA 中最大的挑战在于确定由哪个反应节点来接收传感节点发送的数据。为选出一个反应节点, 需要传感节点相互协调。反应节点可以依据事件区到反应节点的距离、传感节点的能量消耗、反应节点的作用范围和当前能力等因素来选择。在 SA 中, 不需要反应节点相互协调, 并且从检测到数据至做出反应的时间延迟也短。特别是在多个事件同时发生或者事件频繁发生且反应节点个数少的时候, SA 能够实现更有效的操作。但事件区中所有传感节点需要进行复杂的分布式协调, 从而消耗能量较大, 导致资源受限的传感节点更容易失效。

MA 是指传感节点将数据发送给某个反应节点时, 其它反应节点也可以接收到感知数据。事件区中传感节点相互间可以不协调, 各自决定将数据发送给哪个反应节点, 但不进行协调可能激活过多不必要的反应节点, 并且导致所有传感节点的总能量消耗更多。为了避免这种情形, 可以采用簇结构。簇可以按传送数据时间、传感节点的能量消耗等因素进行构造。在 MA 中, 传感节点只需要与邻近传感节点进行通信, 形成簇并且每簇选择各自的反应节点, 这样减少了传感节点的计算开销和能量消耗, 也减少了网络流量负载。此外, 多个接收到事件信息的反应节点可以计算出事件的中心, 如果反应节点可以移动, 这种能力有助于更多的反应节点移向事件中心, 实现更有效的操作。

(2) 协调的传输类型。传感节点、反应节点都涉及传输问题, 可以采用两种传输类型: 单跳和多跳。在 WSNs 中, 反应节点与传感节点位置接近, 因此单跳通信效率并不一定低, 具体要看反应节点的位置, 可以说传输类型依赖于接收感知数据的反应节点的部署位置。

(3) 协调的通信要求。在 WSNs 中, 存在两种节点: 传感节点和反应节点。传感节点和反应节点的生存周期决定了 WSNs 的生存周期, 而且传感节点能量有限, 因而在传感节点与反应节点通信中要求尽可能降低节点能量消耗。此外, 正如在前面特点中所提到的, WSNs 追求实时应用需求, 所

以传感节点与反应节点通信还必须支持实时通信。

总之, 传感节点与反应节点协调的挑战在于选择接收事件信息的目标-反应节点, 并且开发的通信协议满足实时和能量高效的要求。

3.1.2 反应节点与反应节点的协调 在 WSNs 中, 除了与传感节点通信外, 反应节点在许多情形下还需要与其它反应节点进行通信, 如接收到传感数据的反应节点的作用范围不足覆盖事件区, 或没有足够能力做出响应时。在反应节点相互通信过程中, 任务分配是一个十分重要的问题, 可以从下列两条轴线来分析。

(1) 单反应节点任务 (Single-actor task, SAT) 与多反应节点任务 (Multi-actor task, MAT)

SAT 是指每项任务只需一个反应节点就能完成。在 SAT 中, 如果只有一个接收到事件信息的反应节点, 并能够执行所需的操作时, 它不需要与其它反应节点/决策中心进行通信, 以避免超过延迟界限。但如果有多反应节点从传感节点接收到数据包, 反应节点就需要相互协调, 为该事件选出一个最佳反应节点。对于 SAT, 主要问题在于如何选择单一反应节点?

MAT 是指每项任务需要多个反应节点才能完成。在 MAT 中, 无论延迟要求如何, 无论接收到感知数据的反应节点个数 (SA 或 MA) 有多少, 反应节点都需要相互协调, 以确定完成整项任务所需要的节点个数。对于 MAT 来说, 主要问题在于除了需要决定执行操作的最佳反应节点个数, 还需要从可执行该项任务的反应节点中选出最适合的节点。

(2) 集中决策 (Centralized Decision, CD) 与分布决策 (Distributed Decision, DD)

在 WSNs 中, 反应节点需要依据事件决定执行的操作。CD 是指这种决策过程以集中的方式实现的。它使动作决策以一种有组织的方式进行。CD 的缺点在于如果决策中心远离事件区, 将导致通信延迟时间长, 并且当反应节点移动时决策中心很难及时更新网络中反应节点的新位置。因此如何选择决策中心的反应节点是 CD 中一个研究难题。

DD 是指决策过程以分布的方式实现的。它允许相邻反应节点进行局部协调, 以提供及时的操作和独立于网络规模的协调。DD 的缺点在于可能导致高能量消耗, 因为反应节点相互间需要交换事件的信息。

此外, 反应节点相互间的协调还存在其它有待解决的问题:

(1) 需要研究适用于 SAT 和 MAT 的反应节点之间的通信模型。反应节点能够执行长距离通信, 一般可以直接与邻居反应节点进行通信。如果到相邻反应节点的距离大于反应节点的传输距离, 反应节点可以将传感节点作为中继点, 这样反应节点相互间的协调可以借助传感节点来实现。因此, 这就需要研究反应节点-传感节点-反应节点通信模型。

(2) 在 DD 中, 需要研究反应节点对事件做出反应的合适程度的度量机制, 以方便反应节点相互间协调, 并做出由谁来执行操作。

(3) 需要研究两类节点共存对任务分配、节点协调和通信机制的影响。

(4) 在反应节点相互协调中, 最重要的一个需求就是实现任务完成时间最小化。因此, 协调和通信协议必须支持 WSNs 的实时特性。

3.2 通信平台

3.2.1 传输层 在WSANs中,有两种通信范例:传感节点与反应节点通信、反应节点与反应节点通信。这两种通信总是相互关联,相互影响的。因而需要为这两种通信开发出一种统一的传输协议。

在WSANs中,反应节点为作出正确反应,必须确保能可靠地接收到感知数据。传感节点与反应节点通信只需要事件可靠性(event reliability),这是因为许多感知数据彼此重叠。反应节点是依据传感节点提供的综合信息做出反应,而不是针对每条感知信息。而对于反应节点之间的通信,它需要传统的可靠性(conventional reliability),也就是说,反应节点相互间传送的每个消息必须是可靠的。因为反应节点相互通信中的协调信息都包含有事件和对应任务的详细资料,为避免做出错误的反应,反应节点相互间通信的每条消息都应该是完整可靠的。此外,对于传感节点与反应节点通信和反应节点与反应节点通信,传输协议都必须支持实时特性。

对于传感节点与反应节点通信,目前在文献中还没有关于处理事件可靠和实时问题的协议。在WSNs中,有一些研究可靠性的尝试。在文[10]中RMST只考虑了传统的可靠性问题,但根本没有考虑事件可靠性,也没有考虑实时性问题。在文[11]中,基于事件到sink的可靠性概念,ESRT采用没有任何中间缓存的可靠事件检测,但并不支持WSANs中的实时特性。

对于反应节点与反应节点通信,目前已有几个传输层协议针对ad-hoc网络提出。在文[12]和文[13]中,只研究了ad-hoc网络中的TCP高效问题。在文[14~16]中,为ad-hoc网络开发了可靠传输协议,但没有考虑实时问题。在文[17]中,MRTP(multi-flow real-time transport protocol)提出了支持多路径实时数据传输,但不支持传统意义上的可靠性问题。因此,目前还没有相关的研究涉及这种WSANs的传输协议:支持反应节点相互间通信所要求的传统意义上的可靠性和实时性。

总之,这两种通信的传输协议既有共同之处,也有不同之处。在设计统一的传输协议时除了应该考虑这些差异,还要考虑到WSANs可能有不断变化的拓扑。所以这种传输协议不仅要支持事件可靠性、传统的可靠性和实时,还要能够对节点的移动和失效问题做到自适应。

3.2.2 路由层 WSANs中存在多个反应节点,且检测到事件的传感节点并没有与特定的反应节点直接对应起来,这种不确定因素给路由问题带来了巨大的挑战。在WSANs中,路由协议面临的挑战性问题是:为传感节点到反应节点和反应节点到反应节点选择最佳路径,且支持实时特性。

对于传感节点与反应节点通信,目前已有许多路由协议针对WSNs提出。DIRECTED DIFFUSION^[18]考虑了多源单sink、多sink单源问题,但没有涉及多源多sink的情况,也不能很好地处理sink的移动问题,且还会导致网络发送同一数据的复本到多个sink的情形。LEACH^[19]中实现了传感器网络能量分布的最小化,但只是针对同一种类型的节点,且不支持多跳通信。与文[18]相比,TTDD(Two-tier Data Dissemination)^[20]能更好地处理sink的移动,但它将同一数据包发送到多个sink。而在WSANs中,资源丰富的反应节点通过相互协调可以容易地交换到数据,因而不需要发送同一数据包给多个反应节点,避免资源有限的传感节点消耗更多的能量。SER(Stream Enabled Routing)协议^[21]考虑了指令的QoS需求,支持两种路由方式和四种类型通讯(一对一,一对

多,多对一,多对多)。但它只考虑同一种类型的节点,也不支持sink的移动。另外,SER协议在多路径路由时可能形成环,导致无法满足实时通信要求。SEAD^[22]是一种可扩展、能量高效的异步分发协议,在建立分发树和将数据分发给移动的sinks时能实现能量消耗最小化,但它不能实现端到端延迟的最小化。SEAD是针对所有的sink以某个刷新速率向一个源请求数据的情形而开发的,而WSANs中仅仅在事件附近的反应节点会对事件信息感兴趣。anycast^[23]协议是以每个事件源为根构造的一棵最短路径树,反应节点是作为树的叶子节点,可以动态地加入(通过泛洪路由发现兴趣)和离开。在协议中数据只被发送到树上最近的反应节点。但这种协议不支持传感节点相互间协调,造成重复发送相同内容的数据包,增加了不必要的能量消耗;也不支持反应节点相互间协调,导致离反应节点一跳距离的传感节点也会接收到来自网络中其它反应节点发送的兴趣(interest),产生不必要的流量负载。SPEED^[24]是一种基于位置的自适应实时路由协议,提供了三种类型的实时通信服务,即实时单播、实时区域多播和实时区域anycast。它采用反馈控制和非确定地域转发相结合的机制,保障跨跃传感器网络所需的发送速率,实现端端的软实时通信。但它不支持多个反应节点情况下传感节点与反应节点间的协调,也不支持反应节点的移动。总之WSNs中已有的协议并不能满足WSANs的所有需求,这需要进行进一步研究可靠、实时路由协议。

对于反应节点之间的通信,采用泛洪算法通常效率很低,因为泛洪导致有限资源的传感节点接收到同一数据包的多份拷贝。因而广泛采用局部广播、单播或多播路由算法。具体采用哪种路由算法取决于决策过程的类型,如是CD,还是DD。目前为自组网络开发的路由协议如:DSR,AODV,OLSR等,虽然可以用于反应节点之间的通信,但需要考虑通信所造成的传感节点能量开销,以及支持实时约束特性、所有类型的决策过程和任务类型的问题。

3.2.3 介质访问控制 为了实现大量传感节点能有效地将事件信息发送给反应节点,需要MAC协议协调传感节点与反应节点之间的数据通信。在WSANs中,节点,特别是反应节点,是可以移动的,因此,MAC协议还需要维护传感节点与移动反应节点之间的网络连通性。此外,在传感反应网络应用中,实时检测、处理和发送信息也是必不可少的。作为通信栈的基础,MAC层必须支持实时保证或QoS特性,并且适应反应节点的移动。

对于传感节点与反应节点的通信,传统基于竞争的协议不适合于这种实时通信,因为基于竞争的通道访问需要握手协议(如文[25]中所说的),这样必然增加数据传输延迟。文[26]中S-MAC只考虑节能问题,而WSANs中的MAC协议还需考虑QoS问题。同样,TDMA方法也需要考虑如何调度?TRACE^[27]是一种预留的TDMA协议,它需要增加预留竞争的开销。而PBP(Predictive Back off Protocol)则由于所有传感节点需要监听通道而增加了能量开销。在文[28]中,利用传感器网络流量的周期特性,提出无竞争的实时策略。因为无竞争协议能够潜在地减少时间延迟,提供实时保证,并通过消除冲突节省能量,它适用于WSANs。在文[29]中,针对无线传感反应网络提出了无竞争调度的TDMA MAC协议,文中将传感节点和反应节点看作同种类型的节点,但没有指出WSANs的异构问题。当前无竞争协议中大多数采用了多个通道^[28]。这将增加网络中节点的硬件开销,如文[30]所

提到的。所以需要进一步研究:性能的获得是否大于硬件增加的开销。无竞争机制的另一个问题就是协议的复杂性。通常,传感节点具有有限的计算能力,更适合采用简单的协议。但WSANs中反应节点并非资源受限的节点,因而在设计MAC协议时可以利用能力更强的反应节点。此外现有的无竞争协议没有考虑机动性问题。

对于反应节点相互间的通信, ad-hoc 网络中的现有MAC协议不能完全满足需求,需要改进以支持实时通信。

总之,现有的MAC协议并没有完全满足传感反应网络的需求。对于访问介质来说,主要的挑战在于:最小化数据包开销和节点能量消耗的同时,能够提供预留延迟、优先级保证,并适用于节点移动,以及协调传感节点与反应节点。

3.2.4 跨层设计 前面所讨论的协议问题是基于分层方法。由于不同层次之间部分功能实现重叠,且各层依据各自情形独立做出响应,这种范例的局部优化和不灵活特性导致WSANs的性能很低。采用跨层设计方法,可以实现在传输层、路由层,MAC层和物理层之间共享数据,共同实现全局优化,从而避免这种低效。采用跨层设计方法,可以有效地提高数据检测、数据传输和快速响应能力。

结论 传感反应网络是近年来提出的新型网络模型,它一方面既有传感网络的传感检测功能,另一方面又具有快速对检测到事件的反应能力,具有很强的军事、商业应用背景。在本文中,我们结合现有的研究,归纳和总结了传感反应网络的研究现状,并对一些研究的难点进行了简要的阐述,期望能推动国内对这一新兴的网络技术的关注与研究。

参考文献

- Haenggi M. Mobile sensor-actuator networks: opportunities and challenges. In: Proc. of 7th IEEE Intl. Workshop, Frankfurt, Germany, July 2002. 283~290
- Akyildiz I F, et al. Wireless sensor networks; a survey. Computer Networks (Elsevier) Journal, 2002, 38 (4): (2002) 393~422
- Petriu E M, et al. Sensor-based information appliances, IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, 2000, 3 (4): 31~35
- Cerpa A, et al. Habitat monitoring: application driver for wireless communications technology. In: ACM SIGCOMM Workshop on Data Communication, San Jose, Costa Rica, April 2001
- Szewczyk R, et al. Wireless sensor networks for habitat monitoring. in: ACM WSNA'02, Sep. 2002
- Akyildiz I F, Kasimoglu I H. Wireless sensor and actor networks: research challenges. to appear in Ad Hoc Networks Journal (Elsevier), Oct. 2004
- Everett H R, Gage D W. A third generation security robot. SPIE Mobile Robot and Automated Vehicle Control Systems, vol. 2903, Boston, MA, Nov. 1996
- DARPA Tactical Mobile Robotics. Available from (http://www.darpa.mil/ato/programs/tmr.htm), visited in March 2004
- Gerkey B P, Mataric M J. A market-based formulation of sensor-actuator network coordination. In: Proc. of the AAAI Spring Symposium on Intelligent Embedded and Distributed Systems, Palo Alto, California, March 2002. 21~26
- Stann F, Heidemann J. RMST: reliable data transport in sensor networks. In: Proc. of the First Intl. Workshop on Sensor Net Protocols and Applications (SNPA '03), Alaska, April 2003
- Sankarasubramaniam Y, Akan O B, Akyildiz I F. ESRT: Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks, in: ACM Mobihoc'03, Annapolis, Maryland, 2003
- Holland G, Vaidya N. Analysis of TCP performance over mobile ad hoc networks. ACM Wireless Networks Journal, 2002, 8(2-3): 275~288
- Liu J, Singh S. ATCP: TCP for mobile Ad Hoc networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(7): 1300~1315
- Rajendran V, et al. Combining source- and localized recovery to achieve reliable multicast in multi-Hop Ad Hoc Networks. In: Proc. of the Networking'04, May 2004
- Sun D, Man H. ENIC: an improved reliable transport scheme for mobile ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Globecom Conf., vol. 5, Nov. 2001, 2852~2856
- Sundaresan K, et al. ATP: a reliable transport protocol for ad-hoc networks. In: Proc. of ACM MOBIHOC, June 2003
- Mao S, et al. MRTP: A multi-flow realtime transport protocol for ad hoc networks. In: IEEE Vehicular Technology Conf. Orlando, Florida, Oct. 2003
- Intanagonwivat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In: Proc. of ACM MobiCom '00, Boston, MA, 2000. 56~67
- Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: IEEE Proc. of the Hawaii Intl. Conf. on System Sciences, Jan. 2000. 1~10
- Ye F, Luo H, Cheng J, Lu S, Zhang L. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks. In: Proc. of the ACM Mobicom'02 Eighth Annual Intl. Conf. on Mobile computing and networking, ACM Press, 2002. 148~159
- Su W, Akyildiz I F. A Stream Enabled Routing (SER) Protocol for Sensor Networks Appear in "Med-hoc-Net 2002", Sardegna, Italy, Sep. 2002
- Kim H S, Abdelzaher T F, Kwon W H. Minimum-energy asynchronous dissemination to mobile sinks in wireless sensor networks. In: Proc. of the First Intl. Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys'03), Nov. 2003. 193~204
- Hu W, Bulusu N, Jha S. An anycast service for hybrid sensor/actuator networks; [CSE Technical Report 0331]. The University of New South Wales (UNSW) Oct. 2003
- He T, Stankovic J, Lu C, Abdelzaher T. SPEED: A real-time routing protocol for sensor networks. In: Proc. of IEEE Intl. Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS), Providence, Rhode Island, USA, May 2003. 46~55
- Woo A, Culler D. A transmission control scheme for media access in sensor networks. In: Proc. of ACM Mobicom'01, Rome, Italy, July 2001. 221~235
- Yei W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: Proc. of IEEE INFOCOM 2002, vol. 3, June 2002. 1567~1576
- Tavli B, Heinzelman W. TRACE: time reservation using adaptive control for energy efficiency. IEEE Journal on Selected Areas of Communication, 2003, 21(10)
- Caccamo M, Zhang L Y, Sha L, Buttazzo G. An implicit prioritized access protocol for wireless sensor networks. In: Proc. of IEEE Real-Time Systems, Dec. 2002. 39~48
- Carley T W, Ba M A, Barua R, Stewart D B. Contention-free periodic message scheduler medium access control in wireless sensor/actuator networks. In: Proc. of Real-Time Systems Symposium, Cancun, Mexico, Dec. 2003
- Stankovic J A, Abdelzaher T F, Lu C, Sha L, Hou J. Real-time communication and coordination in embedded sensor networks. In: Proc. of the IEEE, 2003, 91(7)