

无线传感器网络自律分散区域结构的在线扩展^①

赵国材, 李进发

(辽宁工程技术大学 电控学院, 葫芦岛 125105)

摘要: 实际监控环境中, 比如食品厂监控系统, 随着生产线调整和新生产线的开发, 传感器经常会重定位和重组织, 并在重定位的时候会引起某一区域网络发生拥塞。提出了建立一种双层自治分散区域结构的方法, 用来解决传感器网络堵塞的问题。所建立的这种结构解决了路由区域信息共享的问题, 并且减少了在动态变化过程中传感器和网络的连接时间。最终实验结果表明这种方法可以达到无线传感器网络结构在线扩展的要求。

关键词: 无线传感器网络; 监控; 区域模型; 动态变化; 连接时间

Wireless Sensor Networks Autonomous Decentralized Community Structure of Real-Time Online Extend Connection

ZHAO Guo-Cai, LI Jin-Fa

(Department of Electrical and Control, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: In a practical monitoring environment, for example, food factory monitoring system, sensor need relocations and reorganizations as production lines reorganization and starting of new production lines. It sometime take congestion in some area of the network for relocations. Proposed a two-tier autonomous decentralized community architecture for wireless sensor network to solve the problem. In the architecture routers make community to solve the problem of sharing information among community, dynamic changing environment sensor connection time for the network will decrease. Results show that this technologies can achieve online expansion.

Key words: wireless sensor network; monitoring ;community model; dynamic changing environment; connection time

无线传感器网络是一种分散的计算形式, 其中传感器 (具备体积小、廉价、功耗小的特点) 用来采集某一区域的物理参数, 在大范围目标跟踪和监视应用中, 这种网络逐渐发展为大规模 *ad-hoc* 网络^[1], 紧急灾害预测系统^[2], 商业系统如供应链到冷藏链的端到端监控管理^[3]等等。

本文是针对室内食品生产线, 根据用户的动态需要而提出的无线传感器网络应用。该系统需要有效的对环境进行监测以保证食品的卫生和质量安全。为达到这种要求, 需要大量的传感器在所需的区域安装、移动、重定位, 传感器的添加和重定位会在某一监测区域产生拥塞, 一些传感器需大量时间和网络才能重新建立连接。长时间的等待将导致扩展缓慢和信息采

集不足, 所以系统动态变化后及时的在线扩展是一个亟待解决的问题。

分簇体系结构^[4]是无线传感器网络普遍的结构, 包括节能、伸缩性、可靠性、适应性等相关问题。很多现有的研究都强调高效的聚类会导致簇头节点额外的负担, 因为每一个簇头节点发挥着不同的功能, 比如数据汇总、代码分发、数据优先级调节、时隙管理等; 所以路由节点管理的传感器数目不能超过特定数目, 而且太大的簇区域也会产生网络通信瓶颈。这种过载现象会导致通信延迟并无法实时的跟踪和监控。因而要保证动态环境的在线扩展就要调节进程负载平衡。

传统的 *ad-hoc* 网络功能有限扩展性比较差, 本文

① 基金项目: 安徽省教育厅自然科学基金(2005KJ004ZD)

收稿时间: 2011-07-03; 收到修改稿时间: 2011-09-05

提出的双层分散区域结构是基于自律分散社群系统 (ADCS) [5] (底层包括传感器, 高层包括路由), 每一个传感器和路由连接, 每一个路由和传感器或其他路由连接。路由有强大的处理能力可自行决策, 还能使小组内节点共享信息以达到共同的目的, 这里的小组称为区域[6]。区域不同于簇群, 在簇内负载增加时簇头节点就会有额外的任务, 区域的概念中去掉了簇头处理负担的任务。为了平衡负载, 我们提出区域内和区域间协商机制用来减少新加入传感器的连接时间。在初始时刻, 每一个传感器自动选择路由加入[10]。

1 系统的应用和结构要求

1.1 应用要求

本文主要应用在制造工厂的实时监控系统中, 从原材料的选择到成品等整个生产过程都应该保证产品的质量和监控的效率。环境动态变化是生产过程的一个显著特点。在食品工业中消费者需要不同样式和质量的产品。生产体系要变更以生产新的产品。因此, 监控系统要满足动态环境变化在线扩展的需求。

无线传感器网络由于其传感器成本低、安装方便、可灵活移动等特点, 因而可以满足监控要求。目前大多数系统采用集中管理网络, 传感器节点需要周期性的发送数据[7]。但是, 采用传统集中管理系统难以管理大规模动态网络。主要是如下问题:

随着环境的动态变化, 需要在路由和 sink 节点间频繁交换控制信息。比如控制生产线的节点需要频繁的作出决策, 在这种情况下等待 sink 节点作出反应对系统不合适。

过量的控制信息从 sink 节点到路由很可能在路由附近的节点处发生信息冲突。

1.2 ADCS 的概念介绍

自律分散区域无线传感器网络 (ADCWSN) 是一种分散式构架, 路由在区域中为共同的目标而存在。

ADCS 的概念是基于 ADS 的概念提出的。ADS 概念的提出是为了满足大规模控制系统三项系统要求: 在线扩展、在线维护、容错机制。根据 ADS 的概念, 一个系统是自治子系统的集合可以在部分失效的情况下管理和协调事件。一个区域定义为在特定时刻和区域有同样的兴趣的一组自治节点。每一个节点都是区域成员, 区域成员交互合作共享信息来适应动态环境。一个区域是总系统中的一个自治子系统。如果一个问题不能在区域内解决, 可以启动区间协作解决这个问

题。每个成员可以自治决定需要决策的问题, 这就增加了灵活性。

在一个大规模系统中区域失效经常发生, 结果就会产生需要维护和替换的点。这样我们所要求达到的目标比如动态情况下可靠性和可扩充性等就难以达到。因此, 每一个区域成员就需要通过共享信息来适应环境的动态变化。ADCS 思路的优点就是单个节点所做不到事情可以通过信息共享来解决。

1.3 体系结构

图 1 展示了基于 ADCS 概念的二层系统结构。该模型包括两种不同类型的节点: 大量的传感器和少量的路由。路由被安置在生产车间的天花板彼此形成网状网络。传感器以一跳星型拓扑结构围绕在路由四周。路由就组织了一个区域。为控制生产过程执行器和路由连接。路由根据本地信息控制执行器。假设一种高质量的产品在生产线上, 此时由于一些故障质量下降。在不浪费所有原材料的前提下可以生产另一种品质的产品。在这种情况下路由就要在不停止生产进程的情况下控制执行器决定下一阶段操作。有时候可以用 PDA 连接路由控制生产过程。

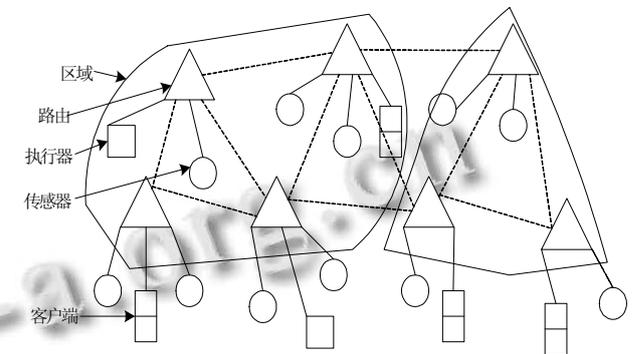


图 1 区域传感器网络结构

本模型和传统模型不同。首先, 像路由和传感器这样的节点可以作为一个子系统自主或协商作出决策。其次, 每一个区域都没有可能承担额外开销的类似于簇头的节点。

传感器网络包含不同类型的传感器测量不同的物理参数比如温度、湿度、压力, 由于电池能量有限和其他传感器连接时会导致不同步, 总的来说一些传感器固定, 另一些可移动。

路由通交流电可以一直处于就绪状态, 可随时传递其他子系统传来的信息。路由的主要功能是中转信息, 维持和传感器的连接, 信息共享和控制执行器等。

若要保证监控的质量,路由就要及时的从传感器获得信息,使每个路由维持和有限的传感器连通。和最大数目的传感器连通数就是路由的连通能力。连通能力同样包括执行器和客户端处理负载。简单起见,本文只考虑传感器处理负载。假设每个路由的连通能力明确,区域内路由共享信息包括:连接的传感器数目,邻居路由列表,路由自己的标识,路由的区域标识,区域广播的信息编号列表,链接代码列表,传感器负载,通信范围内传感器列表等。

当路由连通结束新传感器想要加入时,启动区域协调将传感器负载加入到其他路由。若没有区域协调,连接时间会变得很长。路由通过通信可知道哪些路由还没达到连通能力上限以便负载加入,路由有区域内协调和区域间协调两种功能。通过边界路由实现区域内协调,边界传感器在不同区域至少有一个邻居。区域的作用是通过平衡负载实现在线扩展。区域成员数量由区域大小决定。同一区域的所有路由都有同样的区域编号。

1.4 区域自治

在 ADS 中每个节点有两种自治方式:控制自治和协调自治。控制自治就是子系统故障或新的子系统加入系统其他子系统继续管理自己的功能不受影响。协调自治是子系统故障或新的子系统加入系统其他子系统相互协调达到共同目标。这两种特性保证了系统的在线特性(在线扩展,在线维护,容错),说明子系统可以不受其他子系统的指挥。

在不同的操作阶段每个路由和传感器都有自治功能。比如,在初始阶段每个路由自主的加入区域,每个传感器自主的加入路由;在区域内每个路由自主的传递信息;路由通过区域广播将请求信息发送到各成员;区域内成员并不转发其他区域信息;每个区域成员都存储区域、邻居信息以便根据自己情况做决定。

2 自治区域的构建与区域间的协调

2.1 自治区域构建

自治区域的构建在路由初始化过程中,路由发送一个区域构造请求信息给它的相邻的路由,相邻路由根据情况作出回应,从得到的回应信息中路由选择区域加入或构建一个新的区域^[1]。

对于每个新路由 R_i 的建立遵循以下步骤:

(1) 初始路由 R_i 给它的一跳邻居节点发送区域构建请求;

(2) 邻居路由回应它的区域编号,连接传感器列表和距离初始路由距离等信息;

(3) R_i 收到所有邻居路由反馈的信息按下面的方式作出决策。

(a) 如果没有收到回应信息(如第一个节点)则初始化一个新的区域。

(b) 否则,以最小连接能力为标准找到连接路由,即意味着到初始路由的跳数小于 h 。

自治传感器初始化可以让新传感器在任意时刻加入网络。如果一个传感器在一个路由覆盖范围内且该路由已达到最大联通数目,则通知路由连接失败,路由就会平衡连接负载并回应传感器。如果处在多个路由覆盖范围内选择连通数目最小的路由。具体步骤如下。

每个传感器按如下步骤连接

(1) 每个新传感器 S_j 广播加入请求信息。

(2) S_j 设置定时器等待回应。

(a) 如果 S_j 只在一个路由覆盖范围内,只会收到一条应答信息。

(b) 如果 S_j 在多个路由覆盖范围,会收到多条应答信息。

(3) 当定时时间到,如果 S_j 发现可连接的路由则加入,发现多个可连接路由选择连接数目最小的路由加入。

(4) 计入成功 S_j 向区域范围内所有路由发送加入信息,否则逐个向路由发送失败信息直到成功连接。

2.2 区域间自治协调

传感器重定位和加入会加大路由的负载。为平衡这种负载区域成员共享信息。当路由连接达到上限初始化负载平衡操作。

如果邻居节点有连接能力,过载的路由可以发送传感器负载到它的邻居节点。同样的,如果目的路由有连接能力且路径上每对路由都有相同的共同传感器,就能实现多跳负载平衡。这两种负载平衡分别为区域内负载平衡和区间负载平衡。

2.3 区域内调节

建立了一种区域内调节方式,针对在线扩展的要求,由一个路由到另一个路由通过区域内的平衡来实现。假设路由 R_i 想要通过路径 $R_1, R_2, R_3 \dots R_n$ 向 R_n 发送传感器负载,这里 R_n 必须有连接能力。为平衡负载 R_{n-1} 向 R_n 发送传感器, R_{n-2} 向 R_{n-1} 发送传感器以此类推。

当收到传感器连接失败信息路由启动区域内调节，具体步骤如下。

(1) 路由 R_i 想要转移负载，向一跳邻居节点发送请求信息并等待响应；

(2) 如果没收到区域内邻居的信息，每个邻居都转发这条信息；

(3) 路由的响应信息包括连接的传感器数、通信范围传感器列表等；

(4) 每个路由将自己的情况通过最短路径回应到请求的发送者；

(5) 当 R_i 收到所有的回应，找到可以接收传感器负载的路由， R_i 通知所有的路由转换负载传感器。传感器在加入的路由中记录新的信息。

因为请求信息只传播一次，所有的路由都回应。如果不只一条路径可以平衡负载，如何在合适的时间内找到最佳的路由就是一个问题。图 2 展示了区域内协调的例子， R_i 允许新传感器加入平衡负载，假设 R_i 发现 R_4 ，平衡传感器负载， $R_1 R_2 R_3 R_4$ 在同一区域， C 是路由连接能力。所有的成员用竞争代码^[8]通信。竞争代码不包含任何目的地址信息，只有描述数据的代码。比如区域协调请求信息包括区域编号，表示该信息可传到所有的区域成员。

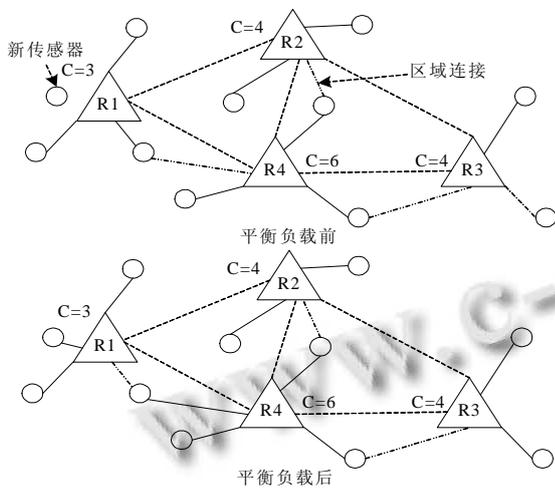


图 2 区域内负载平衡

2.4 区间协调

当区域内负载平衡协调失败时区间协调启动。图 3 展示了区域内协调失败的条件当 R_i 想要平衡它的负载的情况。区间调节从向边界路由发送请求开始，边界路由作为发送者向边界区域传递信息。具体步骤如下：

(1) 路由 R_i 区域内平衡负载失败通过选择边界路

由 R_b 转向区间调节， R_b 可以发送负载且和邻居在不同区域有共同的传感器。当 R_b 达到上限时 R_i 不能直接将负载发给 R_b 。

(2) 现在区间调节是区内调节和路由到路由在转换的集合：

(a) R_i 向 R_b 发送请求把负载发给它的邻居区域。

(b) 向邻居区域的路由发送请求承担负载。如果没有空余的连接，邻居路由初始化区内调节。调结成功邻居向 R_b 发送信息并承担负载。

(c) R_b 成功后回应 R_i 马上接收负载。

3 评估与参数设置

本文用概率方法分析模型来显示扩展的性能。假设 SP_1 是一个新传感器可以通过传感器初始化连接的概率。 p 是一个路由具有一个或更多连接能力的概率。 C 和 m 分别是平均区域大小和路由平均邻居的数目，则 SP_1 可定义为

$$SP_1 = 1 - (1 - p)^m$$

如果传感器初始化失败，区内调节启动，区内调节事件发生的概率为 EP_1 ，它等于传感器初始化失败概率，所以有

$$EP_1 = 1 - SP_1 = (1 - p)^m$$

在区内调节过程中，区域内一个路由可以没有连接能力。因此，当区内调节失败后， $C-1$ 个路由没有连接能力。假设区内调节成功率为 SP_2 ，则定义如下

$$SP_2 = EP_1(1 - (1 - p)^{C-1})$$

当区域调节失败后，区间调节开始。假设区间调节事件发生的概率是 EP_2 ，有

$$EP_2 = (1 - p)^C$$

假设 G 是周边区域数目，如果路由周边区域没有能力平衡负载，则区间调解失败。假设区间调节成功率如下

$$SP_3 = EP_2(1 - (1 - p)^{C * G})$$

综合考虑该结构中传感器连接失败的概率 FP 为

$$FP = 1 - (SP_1 + SP_2 + SP_3)$$

假设 T_1 ， T_2 ， T_3 分别是传感器初始化时间、区内调节时间、区间调节时间。如果连接失败， T_f 时间后重新初始化。设 $Time_{ADC}$ 是理想连接时间，则有

$$Time_{ADC} = T_1 SP_1 + T_2 SP_2 + T_3 SP_3 + T_f FP$$

在传统方法中，由于路由连接能力达到上限传感器连接到路由经常失败。快速连接的成功率 SP_{PRO} 等于 SP_1 ，快速连接失败率 FP_{PRO} 定义为

$$FP_{PRO} = 1 - SP_{PRO} = 1 - SP_1$$

快速连接成功时间 T_{PRO} 小于 T_1 ，因为传感器需要等待一定的时间去连接能力更高的路由。快速连接超时的时候， T_{PRO} 小于 T_f ，因为快速连接没有额外的时间进行区域内调节。传统方法的快速连接时间 $Time_{PRO}$ 定义为

$$Time_{PRO} = T_{PRO}SP_1 + T_{PRO}(1 - SP_1)$$

设置参数如表 1 所示。

表 1

参数	数值	参数	数值
m	3	T_3	$5 + C[s]$
G	3	T_f	100[s]
T_1	1[s]	T_{PRO}	0.5[s]
T_2	$1 + 0.2 * C[s]$	T_{PRO}	10[s]

从分析结果发现 $p=0.3$ 时对区域大小为 6 响应时间更好。该方法特点是利用本地信息连接传感器到路由，而传统方法中当路由达到连接上限时需要长时间等待中央服务器决定调控。结果在 $p=0.3$ 区域大小为 6 时，不需要区域调节的连接时间比区域调节连接时间快 5 倍。

4 仿真及其结论

仿真环境配置了 400 个路由和 4000 个传感器并让它们任意分布在 $200m \times 200m$ 区域范围内。传感器和路由的通信范围分别是 $25m$ 和 $50m$ ，网关为两路，具备连接能力且上限为 10。为模拟动态环境下的变化，假设网络工作时间内传感器每分钟参与和离开的数目分别是 50 和 20，仿真时间设为 5 分钟。

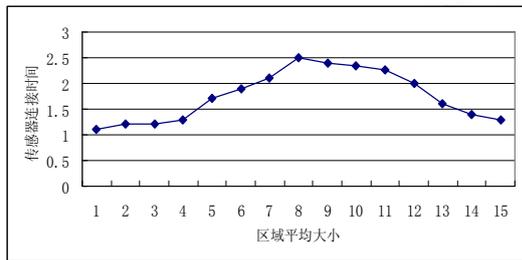


图 3 区域大小和传感器连接时间的关系

图 3 表示区域大小对连接时间的影响,图 4 表示在动态网络中,随着时间的增加,传感器连接时间会上升,这是因为没有区域路由调节就无法平衡传感器的负载,所以传感器的等待时间会变长。

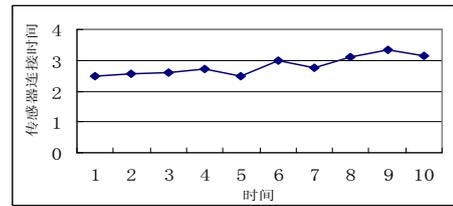


图 4 传感器连接时间随时间变化的关系

综上所述,本文讨论了网络拓扑结构动态变化下的环境实时监控。鉴于系统需要调整生产线和引入新的生产线,所以要求系统具有高的灵活性。本文提出的无线传感器网络可以达到高扩展性能的要求,进一步提出区域构造和协调的方法来提升传感器的扩展连接时间。因为目前的网络不能满足负载均衡这一点,所以还需要进一步做的工作是找到合适的区域大小来满足最优时间的在线扩展。

参考文献

- 1 Kahn JM, Katz RH, Pister KSJ. Mobile networking for 'smart dust'. Proc. 5th IEEE/ACM MOBICOM, 1999:271-278.
- 2 Malan D, Jones TF, Welsh M, Moulton S. CodeBlue: An ad hoc sensor network infrastructure for emergency medical care. Proc. International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, 2004.
- 3 Riem R, Vis R. Cold chain management using an ultra low power wireless sensor network. Proc. WAMES, Boston, Jan. 2004.
- 4 Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. Wireless Commun., 2002,1(4):660-670.
- 5 Du X, Guizani M, Xiao Y, Chen HH. Two tier secure routing protocol for heterogeneous sensor networks. IEEE Trans. Wirel. Commun., 2007,6(9):3395-3401.
- 6 Ragab K, Kaji N, Mori K. ACIS: A Large-scale autonomous decentralized community communication infrastructure. IEICE Trans. Inf. & Syst., 2004,87(4):937-946.
- 7 Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. Comput. Netw, 2002,38: 393-422.
- 8 Mahmood K, Lu X, Horikoshi Y, Mori K. Autonomous pull-push community construction technology for high-assurance. IEICE Trans. Inf. & Syst., 2009,92(10):1836-1846.
- 9 李善仓.无线传感器网络原理与应用,2008.
- 10 陈瑞,王青云.无限传感器网络的路由协议研究.现代电子技术,2006,17:15-18.
- 11 金岩,王玲,等.无限传感器网络节点调度算法及研究进展.宇航学报,2007,28(5):1086-1093.
- 12 宋文.无限传感器网络技术及应用,2007.