

# 无线传感器网络中节点的动态部署

廖卓凡 王建新 梁俊斌

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

**摘要** 作为无线传感器网络中节点部署的新兴技术,动态部署得到了越来越多的重视并在近年来取得了理论和应用上的一系列进展。首先介绍了动态部署的基本概念和设计难点,并根据移动主体的不同,将动态部署分为节点自主部署和机器人辅助部署两种方式。然后,依据静态和动态两种部署场景,分类论述了节点自主部署的代表性成果。接着从网络构建和网络维护两个阶段介绍机器人辅助部署的主要方案。最后总结了节点动态部署亟待解决的问题,并探讨了进一步研究的方向。

**关键词** 无线传感器网络,动态部署,移动传感器,移动机器人

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Dynamic Deployment of Nodes in Wireless Sensor Networks

LIAO Zhuo-fan WANG Jian-xin LIANG Jun-bin

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract** Wireless Sensor Networks (WSNs) is a self-organized network consisting of multiple sensors with limited resources. One fundamental issue in WSNs is deployment of nodes which reflects the networks construct costs, coverage quality, topology and routing etc. As a new technology, dynamic deployment of nodes makes WSN more applicable in many scenes. This paper first introduced the self dynamic deployment of nodes with recent valuable theories and algorithms, which are focused on uniform distribution of nodes. And then typical robot assistant deployment strategies were described according to different phases of WSN, which are aimed at robot movement control and network maintenance. More specifically, advantages and disadvantages of these algorithms were summarized. Finally, key design points and future research directions were put forward.

**Keywords** Wireless sensor networks, Dynamic deployment, Mobile sensor, Mobile robot

## 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)中,节点的部署直接影响了网络的构建成本、覆盖质量、连通性、拓扑结构和路由算法等性能,是 WSNs 在具体应用时首先需要解决的问题<sup>[1,2]</sup>。传统的部署方式针对的是静止节点和静态环境<sup>[3-6]</sup>。其中,适用于工厂、医院、家庭等可控环境的受控部署根据需要在预先计算节点的位置,然后放置节点,这虽然可使网络的覆盖性能最优,但是由于需要人工干预,因此部署效率低;而适用于山地、战场等恶劣环境的随机部署,是通过飞机等运输工具将节点随机抛洒到目标区域,虽然部署效率高,但节点分布的均匀性具有不确定性,不能保证网络性能。移动传感器和移动机器人在无线传感器网络的应用中<sup>[7]</sup>,学者们开展了大量利用节点移动性优化 WSNs 覆盖性能的动态部署研究。这些工作不仅涵盖了静态场景下的节点动态部署问题,还包括了动态场景下的节点动态部署,例如海洋环境

下的漂浮节点部署<sup>[8-11]</sup>,较好地解决了受控部署和随机部署的不足,提高了传感器网络的应用价值。

传感器网络中节点的动态部署研究可以分为两类:第一类是通过节点的自主移动到达目标位置实现部署,这种节点包括可移动传感器(mobile-sensor)和机器人传感器(robot-sensor)<sup>[7]</sup>。其中,可移动传感器是具有翻动、弹跳<sup>[12-14]</sup>等小距离移动功能的传感器;机器人传感器是机器人与嵌入式无线传感器的结合体,能在地形复杂或者地理信息未知的情况下参与到网络构建和运作之中<sup>[15-18]</sup>。第二类动态部署方法是借助机器人在区域内的移动来放置节点,构建无线传感器网络,并在网络的工作过程中实时调整节点位置以实现网络的维护。

本文将从节点自主部署和机器人辅助部署两个方面介绍近年来无线传感器网络中节点的动态部署研究所取得的进展。第 2 节介绍了动态部署的基本概念和设计难点;第 3 节分别介绍了静态和动态两种场景下的节点自主部署研究成

到稿日期:2010-11-09 返修日期:2011-02-23 本文受国家自然科学基金项目(60873265)和国家高技术研究发展计划(863 计划)(2009 AA11Z205)资助。

廖卓凡(1981-),女,博士生,主要研究领域为无线传感器网络部署、网络优化,E-mail:liaozi@mail.csu.edu.cn;王建新(1969-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络优化理论、计算机优化算法;梁俊斌(1979-),男,博士生,讲师,主要研究领域为无线传感器网络、计算机优化算法。

果;第4节从网络构建和网络维护两个阶段介绍了机器人辅助部署;最后总结了 WSNs 中节点的动态部署研究亟待解决的问题,并探讨了进一步研究的方向。

## 2 基本概念和设计难点

### (1) 覆盖程度、均匀性和部署时延

对任务区域的覆盖程度直接关系到传感器网络能否完整、准确地采集任务区域的信息,所以是部署质量的一个重要指标。它一般被定义为所有节点的覆盖总面积与监测区域面积的比值。

关于节点分布的均匀性,节点均匀分布的网络不仅可以保证较好的部署程度,还可使得节点能量消耗均衡一些,有助于提高感知质量和延长网络生命周期。节点如果分布不均,将无法监测某些兴趣目标,导致覆盖空洞。节点如果分布过于稀疏或者大量失效,还将导致网络分割。

为了实现节点分布的均匀性,节点会根据动态部署算法移动到最佳位置。部署时延是从网络中第一个节点开始移动到最后一个节点终止移动的时间,它是衡量动态部署算法执行效率的主要指标。

### (2) 设计难点

由于无线传感器网络中节点的能量、存储容量和计算能力有限,因此动态部署方案不仅需要提供高度的区域覆盖,还存在着由网络自身局限性带来的挑战。首先,由于动态部署过程中,节点的能量不仅用于感知和通信,还将大量用于移

动,因此最大程度减小节点总移动距离可以降低节点的能耗,这是动态部署设计的重要目标之一。其次,由于节点能量有限,不宜将大量的通信和计算集中于某个或者某些节点,否则将导致这些节点的能量过快耗尽,因此需要设计不依赖全局信息的分布式算法,使得节点可以协同合作,均衡网络中能量的消耗<sup>[19]</sup>。最后,动态部署不仅考虑了节点的移动性,还考虑了网络和环境的动态变化。这种场景下,部署策略应使得节点可以根据场景的变化自适应调节自身位置,以完成预计的环境监测和数据传输工作。

## 3 节点自主部署

节点自主部署是通过可移动传感器和机器人传感器的自主移动来实现网络部署。根据场景的不同,可以分为静态环境下的自主部署和动态场景下的自主部署两大类。前者只需考虑节点的移动性,后者则需考虑环境和节点的双重动态性。

### 3.1 静态环境下的自主部署

在大规模应用中,节点主要通过随机播撒的方式部署到任务区域中,然后构建传感器网络。在网络构建初期,节点落在监测区域内的位置是随机的,不能保证对区域的均匀覆盖,这决定了网络初期的动态部署目标是通过节点的自主移动来实现均匀分布。研究者分别从减少节点间距的差异、弥补覆盖空洞和最小化单位面积内节点个数的差异来实现节点的均匀部署。表1给出了有代表性的自主部署方案。

表1 节点自主部署

场景	目标	实现方法	理论	代表文献	优点	缺点	
节点自主部署	静态场景	最小化节点间距差异	物理学势能场/虚拟力	[21-27]	分布式自适应算法	节点分布过密或过疏的初始情况下,节点移动频繁,能耗大	
		减少或去除覆盖空洞	基于计算几何 Voronoi 图	[29]	分布式,通信和移动都是本地操作,可扩展性好	在网络较密集时,节点频繁移动,能耗较高;算法的性能依赖网络的连通性	
		节点均匀分布,最大化覆盖	基于静态代理	[30]	避免节点频繁移动,节省移动能耗	局部集中式,存在瓶颈,通信量大	
	动态场景	对目标的周期性覆盖	最小化单位面积内节点个数差异	基于负载平衡思想	[31]	克服网络分割实现节点均匀分布	局部优化策略不能保证全局优化;节点初始分布稀疏时,移动能耗大。
				基于图论思想	[12-14]	实现最小移动代价的最大覆盖	集中式,计算量大
				基于网格划分	[32]	能耗低,延时小	基于簇结构,簇头节点容易成为瓶颈
		利用部署环境的动态性	基于动态场景建模	[33]	低能耗,低延时	动态环境模型对部署的准确性有很大影响	

### (1) 基于势能场和虚拟力的思想

势能场最先用于自动化领域的机器人导航和障碍避免问题<sup>[20]</sup>,而 WSNs 部署中同样需要避免节点过密和障碍物造成的分布不均问题,所以 Howard<sup>[21]</sup>将势能场应用到节点的动态部署设计中。势能场(potential field)的概念是,每个节点受到一个标志势能梯度的外力,其大小反比于受力对象之间距离的平方。在网络的初始阶段,如果节点分布过密,即相对距离过小,那么来自于节点之间、节点与障碍物以及区域边界之间的斥力将把节点推散开,促使节点分布均匀,扩大网络覆盖面积。

Poduri 和 Sukhatme<sup>[22]</sup>增强了这种方案,在已有的斥力基础上,加入引力来约束节点的邻居度,保证了节点的 K-连通。Heo<sup>[23,24]</sup>提出的自扩散算法(DSSA, Distributed Self-

Spreading Algorithm)与 Poduri 类似,其虚拟力来自于电荷之间的力的概念,这种力将依据节点的相对距离表现为斥力或者引力,通过相互吸引或排斥的多轮调节,使节点间距离差异减小,从而实现均匀覆盖。以上方案都需要节点反复调整自身位置以达到平衡状态,所以能耗较高并且部署时延较长。如果有节点失效或者新节点加入,这个过程还需要重新开始,所以在规模较大的网络中,该类方案的计算量和部署延时也是比较大的。

为了避免节点反复调整位置带来的高能耗,Zou<sup>[25,26]</sup>提出了基于分簇网络结构的虚拟力算法 VFA。在节点呈随机分布的情况下,由簇头节点计算簇内每个节点所受的虚拟力合力,并且指导簇内节点向最终目的地移动。这种局部集中式算法避免了节点的反复移动,减少了移动能耗。但是,簇头

节点能量消耗大大高于普通节点,并且簇内节点需要等待簇头的指示才能开始移动,所以在节点分布过密的初始状态下,该移动算法的延时仍然较高。

前面提及的工作都假设节点初始分布较密,所以网络是连通的。而初始呈随机播撒的网络并不能保证所有节点之间的连通性,所以 Liu Hai<sup>[27]</sup>等人提出了不依赖于网络连通性的虚拟力算法。首先让区域中心对所有节点产生引力,使得初始呈随机分布的节点都向区域中心移动。当节点聚集到一定程度时,网络实现了连通。随着节点继续聚拢,当节点间距离逐渐变小到设定阈值时,节点间斥力产生作用,保证节点均匀散开,实现节点的最大化覆盖。但是,这种算法没有考虑障碍物存在的情形,并且动态部署结束后,节点总是汇聚在区域的中心部分,无法避免区域边缘附近的覆盖空洞。

### (2) 基于 Voronoi 多边形的思想

Wang Guiling 等人使用本地 Voronoi 多边形<sup>[28]</sup>来判断覆盖空洞,以最小化覆盖空洞为目标提出了 3 种分布式自主部署算法<sup>[29]</sup>:基于矢量的 VEC 算法、基于 Voronoi 多边形的 VOR 算法、贪婪算法 Minimax。

其中,VEC 与虚拟力方法类似,节点均在虚拟向量的驱使下移动。不同的是,Wang 所用的向量不仅来自邻居节点的相互作用力,还来自于任务区域边界给予的斥力,并且节点停止运动的条件是落入节点感应范围内的 Voronoi 多边形面积不再增大;与 VEC 中虚拟力的排斥行为不同的是,VOR 是将节点向距离自己最远的本地 Voronoi 多边形顶点牵引;Minimax 则将节点向本地 Voronoi 多边形的外包圆心牵引。这 3 种算法的共同点是,当落在自己覆盖区域内的本地 Voronoi 多边形面积不再增加时,节点将停止新一轮的移动。依此类推,直到全网络中的节点停止运动,自主动态部署完成。

基于 Voronoi 多边形思想的算法最大限度地减少了网络中的覆盖空洞,实现了节点的均匀分布。但是由于每个节点的 Voronoi 多边形是根据邻居节点的相对位置构建的,因此本地 Voronoi 多边形的正确性和网络初始分布过密都对部署效果有明显影响。另外,在 VEC 和 VOR 中,节点仍然会出现反复移动的现象,只是当网络节点初始分布较稀疏时,这种反复移动现象才有所缓解;Minimax 由于以本地多边形外包圆心为最终目标,不需要节点反复调整位置,因此在移动距离和能耗方面较前两者好。

### (3) 基于代理的思想

因为节点反复移动导致了较高的移动代价和较长的部署时延,所以为了缓解这一问题,Wang Guiling 引入了“决策代理”的方法<sup>[30]</sup>,即假设网络节点分为静止和动态两种。静止节点作为决策代理,负责通知各个动态节点最近的覆盖空洞信息,然后动态节点移动到指定位置覆盖空洞,实现了全网中节点的均匀部署。这种方法避免节点反复调节自身位置,减小了移动总距离,达到了基于 Voronoi 多边形思想的策略的部署效果。但是由于移动节点必须与代理节点保持信息交换,等待代理节点的移动指示,因此算法执行的通信量较大,网络部署时延相对较长。

### (4) 基于负载均衡的思想

Wu Jie 等研究者<sup>[31]</sup>受到并行处理中负载均衡的启发,将

区域内节点的均匀分布问题看成这个区域的负载平衡问题,提出了 SMART 算法。该算法将整个任务区域划分成多个分区,每个分区内的节点个数即为该分区的“负载”。为了实现每个分区内节点个数差异最小(负载平衡),SMART 对分区进行行扫描和列扫描两个操作。首先对同一行的分区进行扫描,计算同行分区内节点的平均值。当分区节点个数高于平均值时(负载过高),将派遣多余节点到个数较少(负载过低)的同行分区;然后进行同列分区扫描,原理与行扫描相同。通过在行和列分区上的扫描和移动部署,SMART 算法实现了分区间节点个数差异的最小化,达到了节点均匀分布的目的。

当网络初始时节点分布过于稀疏时,SMART 部署下节点移动的距离较大,所以 SMART 更适用于网络初始时节点密度较大的情况。

### (5) 基于图论的思想

考虑到以上工作对节点的运动能力没有限制,而实际动态部署中节点不可能无限制运动,Chellappan<sup>[12-14]</sup>提出了节点最大移动距离受限情况下的动态部署,并把它转化成图论问题。将任务区域划分为多个方形分区,每个分区即为图论概念中的“点”,节点的最大移动距离称为移动步长。由于初始状态下不同分区内节点的个数存在差异,或者有的分区没有节点,因此需要在分区之间重新分配节点,实现均匀分布。作者把分区之间重新分配节点的移动路径建模为图论中的一个流(flow),该条流的权值即为节点从一个分区移动到目标分区的移动能耗。因此,实现了“最小能耗-最大覆盖”的目标转化成图论中的“最小代价-最大流”问题。

作者通过仿真说明了该算法的覆盖改进效果与节点步长、分区大小和网络初始情况的关系:1)步长越大,每单位覆盖改进需要的移动次数越少;2)覆盖改进效果与分区的大小成反比关系,即分区越小,改进效果越明显;3)节点步长、分区大小对覆盖改进的效果都受网络初始情况的影响,网络初始分布越均匀,算法的动态部署效果越不明显,所以该方法的效果受网络初始情况的影响较大。并且因为图论的动态部署算法是集中式,所以其适用范围受到了限制。

### (6) 基于网格的思想

在传感器网络的应用中,随着时间的推移,节点死亡或者新节点加入都将带来网络覆盖和分布的变化。为了快速检测到这些变化带来的节点分布不均问题,Wang 等人<sup>[32]</sup>将网络划分成若干网格,设定网格内的法定个数,其含义是节点的平均个数。当网格内实际节点个数超过法定个数时,该网格的簇头节点在同行和同列的网格范围内广播自己节点“富余”的消息;当网格内实际节点个数低于法定个数时,该网格的簇头节点在同行和同列的网格范围搜索其他网格发布的“富余”消息。根据就近原则建立网格间的“援助关系”后,“富余”网格将向“贫穷”网格调配节点。这种群体感应方法能快速检测到网络中节点个数的变化,并消除因为节点“死亡”导致的覆盖空洞等问题。

在调配节点到故障位置的修复过程中,Wang 采取了“逐步进位”的节点运动策略<sup>[32]</sup>,防止了单个节点远距离移动带来的高能耗。在移动起始地与目的地之间选取中间节点接替原节点向目的地移动,如此一来,每个节点的移动距离较小,均衡了能量消耗。

### 3.2 动态环境下的自主部署

随着无线传感器网络应用领域的扩大,网络部署的场景逐渐从静态到动态扩展,目前常见的动态场景是海洋环境。与静态场景应用要求不同的是,海洋环境中传感器网络的应用一般是对兴趣区域进行周期性取样,并不需要长期不间断地覆盖。换言之,WSNs 只要在每个周期时段  $T$  内实现对目标区域的一次感知,即可完成覆盖要求。

Luo 等人<sup>[33]</sup>指出,动态环境带来的影响不一定总是负面的。比如在海洋这种动态环境下,漂浮于海面的移动节点可以借助洋流的推动进行移动,然后结合自主移动在  $T$  时段内到达目标位置,实现对兴趣区域的周期性覆盖。Luo 等人把洋流推动导致的节点移动称为不可控移动。将节点的自主移动称为可控移动,利用这两种移动,提出了双重动态(double mobility)部署方案。通过对动态环境建模,节点可以预测自己在不可控移动下的位置。节点如果仅依靠不可控移动就可以在  $T$  时段内到达目标位置,则不进行自主移动;否则,节点启动可控移动,在双重移动下达到目标位置,实现对海面的覆盖。

双重动态部署因为充分利用了动态环境的动态性,所以相对于同等环境下让节点一直处于运动状态的方法来说,其能耗是比较小的。

## 4 机器人辅助部署

机器人辅助部署是由执行机器人的移动开展的动态部署。这一类动态部署的设计目标是如何规划机器人在任务区域内的运动,并在适当位置放置节点,在最小部署时延下实现区域的最大化覆盖和网络维护。根据执行机器人在网络不同时期的不同作用,本节从网络构建和网络维护两个阶段介绍代表性的研究工作。

### 4.1 网络构建阶段的机器人部署

在任务区域没有放置节点的初始状态下,执行机器人将携带多个节点在任务区域中移动,并在适当位置放置节点,从而构建出无线节点网络。为了便于设计和分析,已有工作均假设执行机器人的数量为 1,从任务区域的一端或者中心开始移动。由于执行机器人可能没有任务区域的地理信息,因此部署算法需要解决的问题是:1)规划机器人的运动,使之能避开障碍物和区域边界,完成对任务区域的探测;2)探测过程中放置节点,实现对区域的最大化覆盖,防止覆盖空洞。

根据执行机器人移动策略的不同,以网络构建为目的的机器人部署可以分为基于先驱节点信息的部署和基于机器人自主探测的部署两类。

#### 4.1.1 基于先驱节点信息的部署

Batalin<sup>[34,35]</sup>使用区域中已放置的节点提供的“最少访问方向”信息来指导机器人的运动,提出了 LRV(Least-Recently-Visited)移动部署方案。在初始状态下,区域内没有节点,并存在障碍物,机器人选择自己的起始位置放一个节点,然后根据该节点推荐的方向作为候选方向开始移动过程。当确定推荐方向上没有障碍物后,机器人开始移动,否则请求周围节点再推荐一个新的方向,节点将选择机器人访问次数最少的方向进行推荐。机器人在推荐的方向上每移动一定距离后,停下来检查通信范围内有没有放置节点。如果没有,在当前放

置一个新的节点,这个新节点将与其他节点一起为执行机器人推荐下一步移动方向。

作者将部署好的网络建模成“图”,在这个有限的网络图中证明了 LRV 的收敛性,访问次数的上限可以根据实际应用设定。LRV 是一种基于本地信息的分布式算法,由于借助已部署节点的“导航”,其效率比随机游走高。但是,由于全局信息未知,因此 LRV 必须假设机器人携带的节点个数无限制。

#### 4.1.2 基于机器人自主探测的部署

LRV 中执行机器人的移动完全依赖已部署的节点提供的信息,因此没有充分发挥机器人的区域探索能力。Chang<sup>[36,37]</sup>等人提出了基于机器人自主探测的部署方案,使执行机器人可根据区域的地理特性(存在不规则边界和障碍物等)自主移动。由于机器人在该类算法下的移动轨迹类似蛇形,因此又可形象地称之为蛇形部署(SLD, Snake Like Deployment)。

在蛇形部署中,机器人将根据正三角形点阵关系放置节点,这样的相对位置关系可以保证相邻节点的覆盖重叠面积最小<sup>[3]</sup>,从而在保证最大覆盖的同时减少使用节点的个数。

执行机器人运动的方向包括普通方向和检查方向两类。前者进行正常移动,后者用来检查有无覆盖空洞。机器人将根据检查方向上是否已经放置了节点,来决定下一步移动。如果已存在节点,则向普通方向移动;否则,向检查方向移动并部署节点,直到检查方向上无覆盖空洞之后,再向普通方向移动。

在蛇形部署算法下,执行机器人可以根据区域的边界和障碍物分布情况,自主决定移动方向并放置节点。但由于机器人的移动路径具有方向性,因此如果障碍物的形成是从区域边界开始,向机器人走向的反方向生长,那么蛇形部署仍然不能避免覆盖空洞。

### 4.2 网络维护阶段的机器人部署

网络构建完毕并运作一段时间后,由于节点失效或者网络动态变化造成覆盖空洞或者网络分割时,执行机器人必须及时更换失效节点。这个阶段需要解决的问题是“规划机器人的运动,使之能以最小移动代价完成对所有失效节点的替换”。根据执行机器人个数的不同,网络维护可以分为两类问题:1)如果机器人的数量为 1,并且每个节点失效处只需机器人访问一次就能修复,那么原问题实质上是一个旅行推销员问题(traveling salesman problem),这个问题是 NP 完全的<sup>[38]</sup>;2)如果有多个机器人,则它们之间可以协同工作,实施对网络的维护。

Mei<sup>[39]</sup>等人针对多个机器人的场景,提出了集中式、混合式和动态分布式 3 种算法来监测和修复节点。

集中式算法的原理是,设定一个执行机器人为管理者,其他机器人为修复者,节点选择最近的邻居作为自己的监护者。当某个节点发生故障时,它的监护者将通过多跳把信息报告给管理者,管理者调配离故障节点最近的修复者,移动并修复故障节点。由于管理者掌握了全局信息,因此该集中式算法具有检测快、通信量小和修复速度快的优点,但是管理者容易成为通信瓶颈和攻击对象。

混合式方法将任务区域分成多个大小相等的辖区,每个辖区的执行机器人兼顾管理和修复功能,很好地解决了中心

化问题。但是仿真发现,机器人移动的距离均值随着辖区形状的不同而存在差异,这意味着网络维护的代价将依据辖区的划分方法的不同而不同。因此,动态分布式算法中不再有固定不变的辖区划分,所有执行机器人通过广播告知所有节点自己的新位置,节点选择离最近的机器人作为管理者。机器人需要移动来完成修复工作,所以必须更新自己的位置,这将增大网络的通信量,导致更大的节点侦听能耗。

**结束语** 节点的动态部署是传感器部署研究中的新兴技术,它克服了静态部署中节点不能自适应调节自身位置的限制,使得传感器网的构建和维护更满足应用需求。从文中可以看到,尽管无线传感器网络节点的动态部署已经取得了一些成果,但是动态部署方案的设计仍存在挑战和亟待解决的问题:

1)节点自主部署算法的设计主要考虑移动节点在能量存储和移动能力两个方面的局限性,所以提高节点间的分布式协作,在增强覆盖和节约能耗方面找到平衡点,是这类动态部署设计的关键。在环境不可控的动态情况下,双重动态部署的关键是对动态环境的动态性建模,结合模型设计节点间协作,实现覆盖目标。其中,动态环境建模对覆盖效果有很大的影响。目前环境建模仅限于对海洋洋流运动的简单建模,仍有待深入研究。

2)机器人部署的关键是提高执行机器人的空间探测能力,使之能主动避免障碍物和边界放置节点,并且防止因障碍物和边界而造成覆盖空洞。在网络后期维护方面,多个机器人场景中,有必要设计低延迟、低能耗的协同合作策略;在只有一个机器人的场景中,最小移动问题是 NP 完全的,所以如何针对具体的应用需要设计出近似最优的算法,将会是一个很有意义的研究课题。

随着应用的扩展和理论的深入,无线传感器网络的节点动态部署的研究也已从实现覆盖向能量平衡<sup>[40-42]</sup>、数据存储<sup>[43]</sup>和数据收集<sup>[44,45]</sup>、路由<sup>[46]</sup>等问题的综合研究上发展。因此,结合具体的设计目标和应用场景,采用节点的动态部署改进传感器网络其他方面的性能,也会是动态部署今后的主要发展方向。

## 参 考 文 献

- [1] 崔莉,鞠海玲,苗勇. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174
- [2] 任彦,张思东,张宏科. 无线传感器网络中覆盖控制理论与算法[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 422-433
- [3] Zhang Hong-hai, Hou J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. Wireless Ad-hoc and Sensor Networks, 2005, 1(1/2): 89-123
- [4] Bai Xiao-le, Yun Zi-qiu, Xuan Dong, et al. Deploying Four-connectivity and Full-coverage Wireless Sensor Networks[C] // Proceedings of IEEE INFOCOM. 2008: 296-300
- [5] Wang You-chiun, Hu Chun-chi, Tseng Y C. Efficient Placement and Dispatch of Sensors in a Wireless Sensor Network[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(2): 262-274
- [6] Liao Zhuo-fan, Wang Jian-xin, Wang Xie, et al. GRLD: A Seamless Growth Rings like Deployment of Sensors Avoiding Boundary Effects in WSNs[C] // Proceedings of IEEE WCNC. Australia, 2010: 1-6
- [7] La M A, Brunette W, Koizumi D, et al. Making Sensor Networks Practical with Robots[M]. Mattern F, Naghshineh M. Pervasive Computing. Berlin Heidelberg: Springer, 2002: 615-622
- [8] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges[J]. Ad-hoc Networks(Elsevier), 2005, 3(3): 257-279
- [9] Cayirci E, Tezcan H, Dogan Y, et al. Wireless sensor networks for underwater surveillance systems [J]. Ad-hoc Networks (Elsevier), 2006, 4(4): 431-446
- [10] Jun Hong-cui, Kong Jie-jun, Gerla M, et al. The challenges of building mobile underwater wireless networks for aquatic applications[J]. Network, 2006, 20(3): 12-18
- [11] Luo Ji, Wang Dan, Zang Qian. Double mobility: Coverage of the sea Surface with mobile sensor networks[C] // Proceedings of IEEE INFOCOM. Los Alamitos, CA, 2009: 118-126
- [12] Chellappan S, Bai Xiao-le, Ma Bin, et al. Sensor Networks Deployment Using Flip-based Sensors[C] // Proceedings of IEEE Mobile Ad-hoc and Sensor Systems Conference (MASS). Washington DC, 2005
- [13] Chellappan S, Bai Xiao-le, et al. Mobility Limited Flip-Based Sensor Networks Deployment [J]. Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(2): 199-211
- [14] Chellappan S, Wang Wen-jun, Bai Xiao-le, et al. Deploying Wireless Sensor Networks Under Limited Mobility Constraints[J]. Mobile Computing, 2007, 6(10): 1142-1157
- [15] Cortes J, Martinez S, Karatas T, et al. Coverage Control for Mobile Sensing Networks[J]. IEEE Trans. Robot. Automat, 2004, 20(2): 243-255
- [16] Batalin M A, Sukhatme G S. Coverage, Exploration and Deployment by a Mobile Robot and Communication Network[J]. Telecommunication Systems, 2004, 26(2): 181-196
- [17] Shorey R, Ananda A L, Chan M C, et al. Mobile, wireless, and sensor networks: technology, applications, and future directions [M]. Hoboken, N J. Wiley-Interscience: IEEE Press, 2006: 173-196
- [18] Dantu K, Rahimi M, Shah H, et al. Robomote: enabling mobility in sensor networks[C] // Proceedings of Information Processing in Sensor Networks(IPSIN). 2005: 404-409
- [19] Younis M, Akkaya K. Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey[J]. Ad-hoc Networks, 2008, 6(4): 621-655
- [20] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98
- [21] Howard A, Mataric M J, Sukhatme G S. Mobile sensor network deployment using potential fields: A distributed scalable solution to the area coverage problem[C] // Proceedings of Int. Conf. Distributed Autonomous Robotic Systems. Fukuoka, 2002: 299-308
- [22] Sameera P, Gaurav S. Constrained coverage for mobile sensor networks[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2004: 165-171
- [23] Heo N, Varshney P K. A distributed self spreading algorithm for mobile wireless sensor networks[C] // Proceedings of the Wireless Communications and Networking (WCNC). 2003: 1597-

- [24] Heo N, Varshney P K. Energy-efficient deployment of intelligent mobile sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics*, 2005, 35(1): 78-92
- [25] Zou Yi, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks[J]. *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, 2004, 3(1): 61-91
- [26] Zou Yi, Chakrabarty K. Distributed Mobility Management for Target Tracking in Mobile Sensor Networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 6(8): 872-887
- [27] Liu Hai, Chu Xiao-wen, Leung Y-W, et al. Simple movement control algorithm for bi-connectivity in robotic sensor networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(7): 994-1005
- [28] Fortune S, Du D, Hwang F. Voronoi Diagrams and Delaunay Triangulations[M]. World Scientific; Du D-Z, Hwang F K, Euclidean Geometry and Computers, 1992; 193-233
- [29] Wang Gui-lin, Cao Guo-hong, Thomas F. La Porta. Movement-assisted sensor deployment[C]// *Proceedings of IEEE INFOCOM*. Hong Kong, March 2004
- [30] Wang Gui-lin, Cao Guo-hong, Thomas F, et al. Proxy-based sensor deployment for mobile sensor networks[C]// *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems(MASS'04)*. Florida, 2004
- [31] Wu Jie, Yang Shu-hui. SMART: A scan-based movement assisted sensor deployment method in wireless sensor networks[C]// *Proceedings of IEEE INFOCOM*. Miami, FL, March 2005
- [32] Wang Gui-lin, Cao Guo-hong, Thomas F, et al. Sensor relocation in mobile sensor networks[C]// *Proceedings of IEEE INFOCOM*. Miami, FL, March 2005
- [33] Ji Luo, Wang Dan, Zhang Qian. Double Mobility: Coverage of the Sea Surface with Mobile Sensor Networks[C]// *Proceedings of IEEE INFOCOM*. Rio de Janeiro, 2009; 118-126
- [34] Batalin M A, Sukhatme G S. The Analysis of an Efficient Algorithm for Robot Coverage and Exploration Based on Sensor Network Deployment[C]// *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2005; 3478-3485
- [35] Batalin M A, Sukhatme G S. Coverage, Exploration and Deployment by a Mobile Robot and Communication Network[C]// *Proceedings of the International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*. Palo Alto, 2003; 376-391
- [36] Chang C-Y, Chang H-R, Hsieh C-C, et al. OFRD: Obstacle-free Robot Deployment Algorithms for Wireless Sensor Networks [C]// *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. 2007; 4371-4376
- [37] Chang C-Y, Chang C-T, Chen Y-C, et al. Obstacle-Resistant Deployment Algorithms for Wireless Sensor Networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(6): 17
- [38] Xu Li, Nayak A, Simplot-Ryl D, et al. Sensor Placement in Sensor and Robot Networks[M]. Nayak A, Stojmenovic I. *Wireless Sensor and Robot Networks: Algorithms and Protocols for Scalable Coordination and Data Communication*. Wiley, 2009; 263-283
- [39] Mei Yong-guo, Xian Chang-jiu, Das S, et al. Sensor replacement using mobile robots[J]. *Computer Communications*, 2007, 30(13): 2615-2626
- [40] Xu Yan-li, Shen Lian-feng, Yang Qiong, et al. Dynamic deployment of wireless nodes for maximizing network lifetime in WSN [C]// *Proceedings of Int. Conf. on Wireless Communications & Signal Processing(WCSP)*. 2009; 1-5
- [41] Tong Bin, Wang Gui-ling, Zhang Wen-sheng, et al. Node Reclamation and Replacement for Long-lived Sensor Networks[C]// *IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad-hoc Communications and Networks*. Rome, 2009
- [42] Shen Shi-quin, Zhan An-dong, Yang Pan-long, et al. Exploiting Sink Mobility to Maximize Lifetime in 3D Underwater Sensor Networks[C]// *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Cape Town, 2010
- [43] Sheng Bo, Li Qun, Mao Weizhen. Optimize Storage Placement in Sensor Networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(10): 1437-1450
- [44] Almasaeid H M, Kamal A E. Modeling Mobility-assisted Data Collection in Wireless Sensor Networks[C]// *IEEE GLOBE-COM*. New Orleans, LO, 2008
- [45] Li Xu, Nayak A, Stojmenovic I. Exploiting actuator mobility for energy-efficient data collection in delay-tolerant wireless sensor networks[C]// *IEEE International Conference on Networking and Services*. Valencia, 2009; 216-221
- [46] Huguenin K, Kermerrec A, Fleury E. Route in mobile WSN and get self-deployment for free[J]. *Distributed Computing in Sensor Systems, Lecture Notes in Computer Science*, 2009, 5516: 201-215
- (上接第 28 页)
- [45] Kosko B. *Neural networks and fuzzy systems*[M]. N. Jersey: Prent Hall, 1992
- [46] Zhong H, Miao C, Shen Z, et al. Temporal fuzzy cognitive maps [C]// *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. HongKong, China; IEEE Press, 2008; 1831-1840
- [47] Huerga A V. A balanced differential learning algorithm in fuzzy cognitive maps [C]// *Proceedings of the 16th International Workshop on Qualitative Reasoning*, 2002. <http://www.upc.edu/web/qr2002>
- [48] Papageorgiou E, Stylios C D, Groumpos P P. Active hebbian learning algorithm to train fuzzy cognitive maps[J]. *International journal of approximate reasoning*, 2004, 37(3): 219-249
- [49] Papageorgiou E, Stylios C D, Groumpos P P. Fuzzy cognitive map learning based on nonlinear Hebbian rule[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2003; 2903: 256-268
- [50] Froelich W, Wakulicz-Deja A. Mining temporal medical data using adaptive fuzzy cognitive Maps[C]// *Proceedings of the 2nd conference on Human System Interactions*. Catania, Italy; IEEE Press, 2009; 13-20
- [51] 翟云, 杨炳儒, 曲武, 等. 基于新型集成分类器的非平衡数据分类关键问题研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(1): 196-201