

# 一种基于虚拟力的分布式 Voronoi 控制策略

黄 胜 刘广钟 徐 明

(上海海事大学信息工程学院 上海 201306)

**摘 要** 针对无线移动传感器网络在目标区域的覆盖问题,提出了一种基于移动距离的局部分布式算法,利用 Voronoi 多边形的特征对目标区域进行有效的分割,运用力学的矢量概念,根据 Voronoi 图的边和顶点确定虚拟力的方向和大小即节点的移动方向和距离,提出了基于移动距离的分布式 Voronoi 控制算法,以确定节点移动状态。仿真实验表明,所提算法不仅使得节点在目标区域实现了高覆盖率,同时在时间上也较早地达到了收敛,优化了网络的覆盖控制。

**关键词** 无线移动传感器网络, Voronoi 划分, 虚拟力, 局部覆盖, 覆盖率

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.10.023

## Distributed Voronoi Control Strategy Based on Virtual Force

HUANG Sheng LIU Guang-zhong XU Ming

(School of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract** According to the wireless mobile sensor network coverage problem in the target area, a local distributed algorithm was proposed based on the movable distance. Taking advantage of the characteristics of the Voronoi polygons, we divided the target region. Using the vector concept of mechanics, based on edges and vertices of Voronoi diagram, we determined the direction and magnitude of virtual force of the node, which represent the movable direction and distance of the node. The distributed control of Voronoi algorithm was proposed based on the moving distance to determine the state of node mobility. Simulation results show that the strategy can achieve high coverage in the target area, and can earlier reach optimization and control of the network coverage.

**Keywords** Wireless mobile sensor networks, Voronoi division, Virtual force, Local coverage, Coverage rate

## 1 介绍

无线传感器网络是由大量廉价、微型的传感器节点组成,它被广泛应用于环境监测、生物探测、工农业生产、城市管理和战场监测等领域,特别是在敌对战场上,对敌人活动的探知起到了关键作用。传感器对目标区域的探测不同于网络连接,节点的分布必须要覆盖整个区域才能满足信息采集的要求。合理地布置传感器节点的地理位置,才能更好地完成区域监测和获取有用的信息。然而,最典型的问题是每个传感器的感应半径都是固定且有限的,一般是通过增加传感器的数量来达到目标区域的整体覆盖。但是这种方法的代价比较大,并且节点冗余度非常高,因此通过移动节点的方法来减少网络覆盖的冗余,同时增加网络的覆盖率。

网络中为了提高目标区域覆盖的同时减少与邻居节点之间形成的重叠区域,降低覆盖冗余,保证整个目标区域最大化覆盖,大多数覆盖机制都是通过使用移动节点<sup>[1]</sup>来增加目标区域的覆盖或者通过构造一个浓密的传感器网络然后使用一个合适的调度机制来延长它们的生存时间。文献[2]针对边

界区域节点扩散不均等休眠问题,提出容忍覆盖区域节点的调度算法,延长了网络的生存时间。

目前,关于移动控制,研究者提出了基于最优最大化流的集中式算法,传感器初始部署后,节点形成的网络拓扑会被映射成一个图形结构,然后计算图中最小开销的最大权值流,图中相应的流就会被转换成网络中传感器节点的移动序列<sup>[3]</sup>。此外还有对网络中空洞侦测和修复的研究,即以 Voronoi 多边形为基础,将传感器的感应范围设想为一个圆,依据传感器节点所处的位置信息将所要监测的区域分割成很多个 Voronoi 多边形,文献[4]提出了给予基于 Voronoi 图和 Delaunay 三角网的算法,并且论证了在多项式的时间内使用该算法修复盲点的最坏和最好的情况。Liu 等<sup>[5]</sup>把传感器节点任意分成  $n$  个子集,每个子集中的传感器节点循环执行感知任务,但是每个子集分配的偶然性和随机性导致整个网络覆盖率的好坏不可被预知。

在传感器网络覆盖算法的发展中 Voronoi 图是非常有用的工具,文献[6]提出了一种有效的布置算法,其运用 Voronoi 图通过最小化最大误差变量,扩大预测变量,为移动

到稿日期:2015-08-11 返修日期:2015-11-30 本文受国家自然科学基金项目(61202370),上海市教委科研创新项目(14YZ110),中国博士后科学基金资助项目(2014M561512)资助。

黄 胜(1990-),男,硕士生,主要研究方向为分布式与传感器网络, E-mail: sumangcao@163.com; 刘广钟(1962-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为分布式数据库、分布式人工智能、计算机网络技术、网格计算、CIMS 技术、物流信息化技术等; 徐 明(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、水声传感器网络、智能信息处理。

传感器找到了一个最合适的位置。文献[7]采用集中算法促使所有节点的移动距离之和最小,计算传感器节点的新位置,当所有节点都重新部署之后,构建一个直线栅栏,最终实现对目标区域的栅栏覆盖。文献[8]提出传感器布置和能量分配算法,利用单目标群问题解决了相应的多目标优化问题。文献[9]提出粒子虚拟力对移动节点覆盖进行有效的优化,将传感器节点当作带电的粒子,通过节点之间距离的远近使节点带有不同的电荷,依据同性相斥、异性相吸的原理,节点均匀分布在目标区域中,达到增大网络覆盖的效果。文献[10]分别把 Voronoi 顶点和 Voronoi 边到节点的距离设计成了矢量来确定节点移动距离和方向,在每个 Voronoi 单元中,通过迭代的方式探测空洞,确定节点移动位置,分别比较当前空洞面积和新位置空洞面积的大小来终止迭代。

文献[10]中节点只能在每个 Voronoi 单元中移动,节点之间没有关联,容易出现冗余覆盖,只能达到局部最优的效果。本文提出了新的部署策略来提高移动传感器网络的覆盖率,通过构造一个局部 Voronoi 区域,利用节点和 Voronoi 图中的边和顶点矢量关系,构造一个整体的虚拟力,以确定节点移动方向和距离;同时提出了一种基于移动距离的局部 Voronoi 区域移动规则,节点与节点之间相互合作循环来确定每个节点是否移动以及移动的位置,不拘束于单个 Voronoi 单元之间。理论证明和实验结果表明该方法能够同步执行移动规则并且达到全局最优。

本文主要工作有:1)在目标区域满足局部覆盖的基本条件下,提出了一种局部 Voronoi 移动规则,其算法复杂度与节点密度无关;2)在此调度规则下,通讯相邻、局部 Voronoi 区域不相邻的节点能够同步执行移动,提高了分布式调度方法的收敛性;3)通过仿真实验,分析了随机布置的节点在网络中的覆盖质量、有效性和不同时间下节点的状态分布。

## 2 问题描述

在给定的目标区域  $\Omega$  中有  $n(n \geq 3)$  个互不重叠的移动传感器节点集  $S$ 。

(1)假设每个节点的感应半径都设置为  $R_s$ ,节点  $u \in S$  的覆盖面积是以节点  $u$  为圆心、 $R_s$  为半径的圆,记为覆盖圆  $C_u$ ;并且当点  $q \in \Omega$  满足  $\|u-q\| \leq R_s$  时,称节点  $u$  覆盖了  $q$ 。这里  $\|\cdot\|$  表示两个点之间的欧氏距离。

(2)假如存在  $q \in \Omega$  与任意节点  $u \in S$  满足前提条件  $\|u-q\| > R_s$ ,则移动传感器节点集  $S$  仅仅覆盖了一部分目标区域,称为部分覆盖网络,在部分覆盖网络中,还存在没有被覆盖的区域,称为盲区。

(3)把目标区域划分成整个平面,在目标区域  $\Omega$  中,所有覆盖圆的并集一起构成了网络原有的覆盖范围  $C$ 。本文主要研究的是当存在部分覆盖时确定节点的移动策略,将目标区域  $\Omega$  内盲区的范围减少,增大感应区域,提高整个网络的性能。

(4)假设节点都具有相同的通信半径  $R_c$ ,且有  $R_c \geq 2R_s$ (本文中设  $R_c = 2R_s$ ),相互位于通信半径范围内的节点称为通信邻居。

**定义 1**(Voronoi 划分<sup>[12]</sup>) 对于平面  $\Omega$  中  $n(n \geq 3)$  个互不重叠的节点集  $S$ :

(1)点  $q \in \Omega$  与节点集  $S$  中的节点  $u$  最近,并且当点  $q$  与任意节点  $x \in S(x \neq u)$  满足  $\|u-q\| \leq \|q-x\|$ 。

(2)平面  $\Omega$  中距离节点  $u \in S$  最近的集合构成节点  $u$  的 Voronoi 区域  $V(\Omega, S, u)$ 。

$$V(\Omega, S, u) = \{q \in \Omega \mid \|u-q\| \leq \|q-x\|, \forall x \in (S - \{u\})\} \quad (1)$$

(3)节点  $u, x(u, x \in S)$  之间的垂直平分线为  $L(x, u)$ ,以它们的垂直平分线为界限、包含节点  $u$  的半平面记为  $H(u, x)$ ;对于任意点  $q \in \Omega$ ,当且仅当  $\|u-q\| \leq \|q-x\|$  与  $u \neq x$  时有  $q \in H(u, x)$ ,则

$$V(\Omega, S, u) = \bigcap_{x \in (S-u)} H(u, x) \quad (2)$$

(4)将平面  $\Omega$  中每个点都划分到距离节点集  $S$  中最近的节点,即所有 Voronoi 区域构成的并集组成节点集  $S$  在平面中唯一的 Voronoi 划分  $V(\Omega, S)$ ,如图 1 所示。

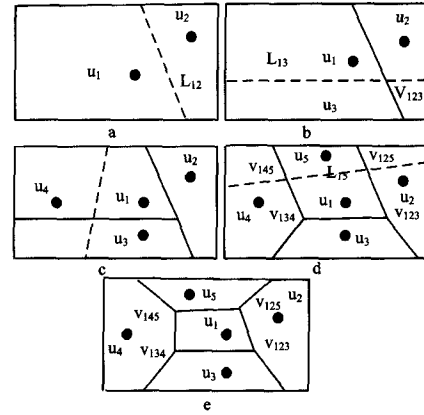


图 1 目标区域的 Voronoi 划分

**定义 2**(局部 Voronoi 覆盖) 给定目标区域  $\Omega$  内的移动传感器节点集为  $S$ ,传感半径为  $R_s$ :

(1)假设节点  $u \in S$  与其  $2R_s$  范围内的邻居为  $N(u)$ ,则  $V(\Omega, N(u), u)$  表示节点  $u$  的局部 Voronoi 区域。

(2)当且仅当任意点  $q \in V(\Omega, N(u), u)$ ,满足  $\|u-q\| \leq R_s$ (即  $V(\Omega, N(u), u)$  位于覆盖圆  $C_u$  内)时,节点  $u$  满足局部 Voronoi 覆盖。

**定义 3**(Voronoi 性质<sup>[11]</sup>) 给定 Voronoi 划分  $V(\Omega, S)$ :

(1)Voronoi 区域的边界称为 Voronoi 边。若  $V(\Omega, S, u)$  与  $V(\Omega, S, k)$  存在一条公共边,则节点  $u, k \in S(k \neq u)$  共享 Voronoi 边或称  $u, k$  互为邻居。

(2)如若点  $q \in V(\Omega, S, u)$  不在 Voronoi 边上,则任意节点  $k \in S(k \neq u)$  满足  $\|q-k\| > \|q-u\|$ 。

(3)节点  $u \in S$  满足  $u \in V(\Omega, S, u)$  且不在 Voronoi 边上时,任意节点  $k \in S(k \neq u)$  满足  $k \notin V(\Omega, S, u)$ 。

(4)当  $V(\Omega, S, u) \cap L(u, k) \neq \emptyset$  时,节点  $u, k \in S(k \neq u)$  共享 Voronoi 边  $(V(\Omega, S, u) \cap L(u, k))$ 。

(5)假如节点  $u$  的所有 Voronoi 邻居为  $V_n(\Omega, S, u)$ ,当且仅当  $k \in V_n(\Omega, S, u)$  时有  $u \in V_n(\Omega, S, k)$ 。

## 3 局部覆盖网络下的分布式 Voronoi 覆盖控制

### 3.1 基于虚拟力的 Voronoi 区域移动规则

当传感器节点布置在目标区域时,在  $2R_s$  范围内满足局部 Voronoi 覆盖,必定存在冗余的部分,因此通过设定相应的移动规则来减少覆盖冗余,增加网络覆盖率。

#### 3.1.1 以顶点为虚拟力的策略

**定义 4** 节点只与一个顶点的距离小于  $R_s$  时用顶点移动规则。

每个节点的移动策略都是依据 Voronoi 图中所有基于顶点的虚拟力,定义  $V_i = \{V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{ij}\}$  为第  $i$  个 Voronoi 图中的各个顶点。 $d_{V_j}^u$  为节点  $u (u \in S)$  与 Voronoi 中的第  $j$  个顶点之间的距离。所有节点的感应半径都是  $r$ , 假若  $u$  与  $V_{ij}$  的距离小于  $r$ , 虚拟力推着  $u$  远离  $V_{ij}$ , 此时移动的距离为  $r - d_{V_j}^u$ 。另一方面, 若  $d_{V_j}^u > r$ , 则来自  $V_{ij}$  的虚拟力将拉着  $u$  向自己的方向移动, 移动距离为  $d_{V_j}^u - r$ 。最终每个节点的移动方向是所有顶点的虚拟力的矢量和  $\bar{V}_i^u$ , 节点  $u$  的最终位置为  $\bar{P}_i = P_i + \alpha \bar{V}_i^u$ 。其中,  $\alpha$  是被选择的参数, 为了使得第  $i$  个本地覆盖的区域达到最大化, 可以用线性搜索过程来最优化  $\alpha$  的值, 本文通过模拟得出当  $\alpha = 1/4$  时计算的复杂性降低了。基于顶点的虚拟力实例如图 2 所示, 合力  $1/4 \bar{V}_i^u$  用实线箭头来显示。

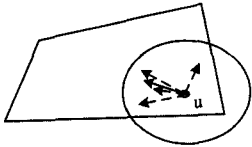


图 2 基于顶点的虚拟力实例

### 3.1.2 以边为虚拟力的策略

**定义 5** 节点只与一个条边的距离小于  $R_c$  时用边移动规则。

相对于顶点规则而言, 每个节点的移动策略都是依据 Voronoi 图中边的虚拟力的矢量和, 定义  $E_i = \{E_{i1}, E_{i2}, \dots, E_{ij}\}$  为 Voronoi 图中的各个 Voronoi 边,  $d_{E_{ij}}^u$  为节点  $u$  到边的距离, 节点到每条边的距离即为一个分力(如图 3 中虚线所示), 与顶点的移动规则相似得到基于边的策略, 节点移动位置为  $\bar{P}_i = P_i + \alpha \bar{V}_i^u$ , 如图 3 中实线所示。

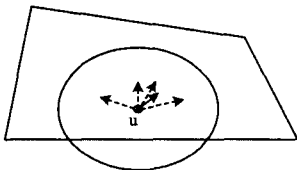


图 3 基于边的虚拟力实例

除了以上两种情况外, 其余情况下节点的合力为 0, 即不具有移动性, 最简单的模式为整个覆盖圆都在 Voronoi 单元中, 在这种理想状态下, 对于被监控区域来说, 传感器处于最大化的覆盖状态, 而且不存在冗余, 如图 4 所示。

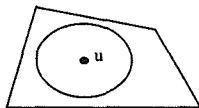


图 4 理想状态

**定理 1** 如果点  $v \in V(\Omega, N(u), u)$  但是  $v \notin C_u$ , 则肯定存在点  $h \in V(\Omega, N(u), u)$  不被任何节点覆盖, 则需要移动节点来达到高覆盖率。

**证明:** 假设距离  $u$  最近且在传输半径  $R_c$  之外的点为  $s_m$ , 并且  $\|us_m\| = R_c + \delta, \delta > 0$ 。在直线  $\overline{uv}$  上存在点  $s_m'$  满足  $\|us_m'\| = \|us_m\|$ , 并且存在另一个点  $h$  满足  $\|h-u\| = R_c + \delta/2$  (如图 5 所示), 根据三角不等式有  $\|hs_m\| + \|uh\| \geq \|us_m\| = \|us_m'\| = \|uh\| + \|hs_m'\|$ , 因此  $\|hs_m\| \geq \|s_m'h\| = \|us_m'\| - \|uh\| = R_c + \delta/2$ , 因此节点  $u$  不能覆

盖  $s_m$  也不能被其他的节点覆盖。这是因为  $\|s_i u\| > \|us_m\|$ , 所以有  $\|s_i'h\| > \|hs_m'\|$ , 点  $s_i'$  在直线  $\overline{uv}$  上并且  $\|us_i'\| = \|us_i\|$ , 所以  $\|s_i'h\| \geq \|s_i'h\| > \|s_m'h\| = R_c + \delta$ , 同时有  $u'$  在以  $u$  为圆心、以  $R_c$  为半径的圆内, 并且  $u \neq u'$ , 有  $\|uu'\| > \|uh\| > R_c$ 。综上所述, 问题得证。

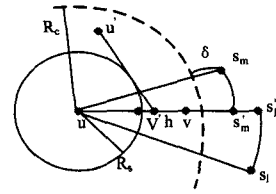


图 5 定理 1 的证明图例

**定理 2** 节点  $u$  在移动后, 原有的覆盖仍然不变, 增加未被覆盖的部分。

**证明:** 假设有  $q \in V(\Omega, N(u), u)$  和  $q \in C_u$ , 则有  $\|u-q\| \leq R_c$  与  $q \in \Omega$ , 根据式(1), 存在一个节点  $m \in S$  满足  $q \in V(\Omega, S, m)$ , 又有  $m \neq u; q \in V(\Omega, S, m)$ , 依据式(1)有  $\|m-q\| \leq \|u-q\|$ , 进而有  $\|m-q\| \leq R_c$ , 进而有  $q \in V(\Omega, N(m), m)$ 。证毕。

### 3.2 距离优先的 Voronoi 调度规则 (VFDF)

任意节点根据  $2R_c$  范围的邻居判断节点与 Voronoi 单元顶点之间的距离是否符合节点移动规则。为了维持网络原有的覆盖范围, 不满足条件的节点则不需要移动保持原来的状态; 同时节点是否能够移动要取决于邻居节点的状态。为此, 本文提出了一种基于虚拟力的移动距离优先的 Voronoi 调度策略。

#### 3.2.1 调度算法描述

假设节点通过消息的交互来维护  $2R_c$  范围内的邻居位置、自身节点与顶点的距离和状态等信息。首先, 把  $N(u)$  中所有的节点都标记为 Unset 状态; 然后, 节点  $u$  通过 Voronoi 调度策略确定最终节点的状态 (Movable 或 Unmovable) 后, 向  $N(u)$  中所有邻居广播自己的状态信息; 最后, 如果节点  $u$  的状态为 Movable 状态, 则继续接收邻居的信息, 直到  $N(u)$  中所有的邻居都确定了最终的状态, 利用邻居的状态信息确定自己的移动状态。

VFDF 算法的步骤如下所示 (为了使问题简化, 下面假设任意两个节点的移动距离不同)。

符号描述:

- u. State: 节点  $u$  的状态, 其值为 Unset, Movable, Unmovable
- u. D: 节点  $u$  的移动距离值
- u. Broadcast(State): 节点的广播状态信息
- u. Receive(MV, UM): 接收状态信息, 其中 MV 为 Movable 节点, UM 为 Unmovable 节点。

#### 1. Initialize

```

维护邻居信息 N(u), 求解 V(Ω, N(u), u)
for (∀ k ∈ N(u)) k. State ← Unset
    if (u 不满足移动规则的) {
        u. State ← Unmovable u. Broadcast(Unmovable)
    }
    Go To Finalize

```

End Initialize

#### 2. while (∃ h ∈ V<sub>n</sub>(Ω, N(u), u) ∧ (h. State ← Unset) ∧ (h. D < u. D))

```

u. Receive(MV, UM); N(u) ← N(u) - MV
for (∀ k ∈ (UM ∩ N(u))) k. State ← UM
if (Vn(Ω, N(u), u) ∩ MV ≠ ∅) 重新构建 V(Ω, N(u), u)

```

End While

### 3. Finalize

```

if(u.State=Unset){
    if(u满足移动规则)
    u.State←MV;Else u.State←UM;
    u.Broadcast(u.State);
if(u.State=MV)return;}
While(∃h∈N(u)∧h.State=Unset)
{
    u.Receive(MV,UM) N(u)←N(u)-MV;
    for(∀k∈(UM∩N(u)))
    k.State←UM
}
End Finalize

```

算法调度策略如下:1) $V(\Omega, N(u), u)$ 中所有节点都不满足边或顶点移动规则时,设置节点为 Unmovable 状态。2) $V(\Omega, N(u), u)$ 满足局部 Voronoi 覆盖;节点  $u$  先接收  $N(u)$  中邻居的状态信息,首先记录 Unmovable 节点,剔除  $N(u)$  中标记为 Movable(已经经过边或顶点规则移动过)的节点,当  $V_n(\Omega, N(u), u)$  中包含 Movable 节点(首选移动距离较大的)时,重构剔除 Movable 节点后的  $V(\Omega, N(u), u)$ ;当  $V_n(\Omega, N(u), u)$  中所有移动距离较小或不需要移动(移动距离为 0)的节点确定为 Unmovable 状态后,判断节点  $u$  是否符合定理 1 或定理 2,若节点  $u$  满足,则设为 Movable,否则为 Unmovable 状态。算法的状态转换如图 6 所示。

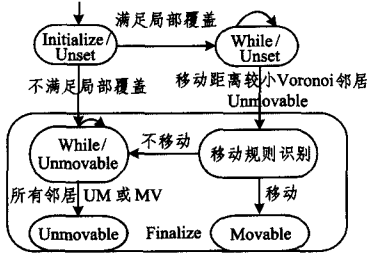


图 6 算法调度状态转换图

#### 3.2.2 算法可实施性

**结论 1** 当  $R_c \geq 2R_s$  (这里  $R_c = 2R_s$ ) 并且  $V_n(\Omega, N(u), u)$  所覆盖区域均满足移动规则,则节点集  $S$  构成的网络覆盖在目标区域内仍然保持连通性。

证明: $V(\Omega, N(u), u)$ 的直线对偶图  $D(S)$ 是连通图, $D(S)$ 中的任意边和其关联的节点  $k, u$  共享 Voronoi 边  $e^{[12]}$ ;根据定义 3 中的性质 4 有  $e = V(\Omega, S, u) \cap L(u, k)$ ,点  $q \in e$  则可以推出  $q \in V(\Omega, S, u), q \in L(u, k)$ ;对于  $V(\Omega, S, u)$  满足局部 Voronoi 覆盖,节点在执行移动规则之后仍然可以得到  $\|u - q\| \leq R_s$ ;则  $L(u, k)$  上的点  $q$  满足  $\|u - k\| \leq \|u - q\|$ ,有  $\|u - k\| \leq R_c$ ,所以连通图  $D(S)$  的任意一条边即为该网络的一条连通链路,节点集  $S$  仍然构成整个网络的连通性。

**结论 2** 通信相邻、局部不相邻的节点可以同步执行移动规则识别。

证明:当节点不满足移动规则时,节点  $k$  在初始化时就已经设置为 UM 状态;当节点满足移动规则时,若  $k.D > u.D$ ,节点  $k$  至少要收到节点  $u$  的状态信息后才执行移动规则,即节点  $k$  处于 while/Unset 循环,否则节点  $u$  至少要收到节点  $k$  的状态信息后执行移动规则,即节点  $k$  为 Unmovable 状态(若为 Movable 状态,则已经从  $N(u)$  中剔除了节点  $k$ )。

综上所述,节点  $u$  执行移动规则识别时,其任意局部

Voronoi 邻居  $k$  或处于 while/Unset 循环或为 Unmovable 状态,即通信相邻、局部 Voronoi 不相邻的节点可以同步执行移动规则识别。证毕。

**引理** 给定  $n$  个节点,求解任意 Voronoi 区域的计算复杂度为  $O(n)^{[13]}$ 。

**结论 3** 节点在执行移动规则识别时,节点的计算复杂度为  $O(1)$ ,与节点的密度不相关。

证明:Voronoi 的边的交点简称为 Voronoi 顶点, $V(\Omega, N(u), u)$ 的局部 Voronoi 邻居与局部 Voronoi 顶点的平均值为 6,与节点数量无关<sup>[12]</sup>,分别求得节点到边的距离和到顶点的距离的计算复杂度均为  $O(1)$ 。证毕。

**结论 4** 该算法的计算复杂度为  $O(n^2)$ ;其中  $n$  为  $2R_s$  范围内的邻居数。

证明:根据引理,初始化求解  $V_n(\Omega, N(u), u)$  及 while/Unset 循环重新构建  $V(\Omega, N(u), u)$  的计算复杂度均为  $O(n)$ ;  $V_n(\Omega, N(u), u)$  中移动距离较低节点确认为 Unmovable 状态后退出了 while/Unset 循环。 $V_n(\Omega, N(u), u)$  为  $N(u)$  的子集,循环次数不会超过  $n$ ,即 While/Unset 的计算复杂度为  $O(n^2)$ ;Finalize 过程中移动规则识别的计算复杂度为  $O(1)$ 。综上所述,该算法的计算复杂度为  $O(n^2)$ 。证毕。

**结论 5** 该算法的广播消息的复杂度为  $O(1)$ ,整个网络中的消息复杂度为  $O(n)$ ,其中  $n$  为网络的节点数。

证明:每个节点的初始化状态是通过 1 个消息来维护  $2R_s$  范围内的邻居消息,确定最终的状态后向  $2R_s$  范围内的邻居广播 1 个状态消息,因此该算法的消息复杂度为  $O(1)$ ,整个网络的消息复杂度为  $O(n)$ 。证毕。

### 3.3 有障碍物的处理方法

对于一般的算法,当目标区域内存在障碍物时,必定对传感器节点的移动造成干扰,影响节点的覆盖情况。本文中,1)在目标区域中把障碍物设置成一个不具有移动性的特殊传感器节点,该特殊的节点参加构建 Voronoi 图,并被标记为特殊节点,不需要执行基于虚拟力的移动规则。2)在算法调度过程中,当节点执行调度规则,探测邻居节点有特殊的障碍物节点时,直接把该特殊节点标记为 Unmovable 节点,从而完全可以等价于无障碍物节点时算法的调度情况。

由定理 1 和定理 2 的证明过程可知,节点在移动时可以尽可能地靠近障碍物,但是不可能经过障碍物,从而可以完全避免障碍物对移动节点的影响。

## 4 仿真实验分析

我们通过实验分析该算法的性能,由 Matlab 仿真工具提供实验平台,通过量化真实环境中传感器性能来实现仿真。设置的实验场景如下:在目标区域为  $10\text{m} \times 10\text{m}$  的环境中随机布置节点,每个节点的感应半径  $R_s = 1\text{m}$ ,通信半径  $R_c = 2\text{m}$ 。

通过与文献[10]中提出的 VEVF 策略作深入比较来评估本文提出的 VFDF 算法的性能,在目标区域随机布置 25 个具有移动功能的传感器节点,初始化节点的覆盖状态如图 7(a)所示,在网络的其他参数一致的情况下,分别运行两种不同的移动方法,一段时间后当网络的节点状态处于稳定并达到收敛时,对网络的覆盖情况进行采样分析,两种算法随着运行时间的变化其覆盖率逐步提高,如图 7(b)和图 7(c)所示,VEVF 算法中的覆盖率比 VFDF 算法的要低,其主要原因是

基于局部状态的调度过程中,传感器的移动的位置估算有重叠。而采用 VFDF 算法的网络节点位置分布比较均匀,有效地减少了感知的重叠区域。

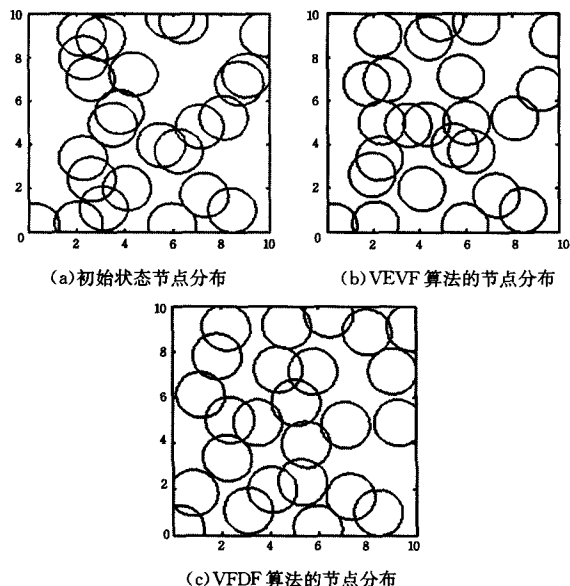


图 7

在网络的运行过程中,节点的覆盖率随着节点的个数和运行的机制不同而有所改变,图 8 给出了不同的节点数和算法对目标区域覆盖的影响。节点数相同的情况下,VFDF 算法的覆盖率明显大于 VEVF 算法的覆盖率,当然随着节点个数的增加,在目标区域不变的情况下,这种差距会逐渐变小。从图 8 可知,VFDF 算法对节点移动具有最优选择性,有效地增加了网络的整体覆盖率,在一定程度上降低了整个无线网络的运行花费。

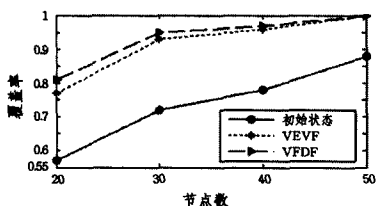


图 8 节点的覆盖情况

从图 8 可以看出,当目标区域中节点数为 50 时,传感器数量基本已经达到了饱和状态,能够实现全覆盖。本实验中以 50 个节点数为例,在网络运行的初期,网络中节点的分布情况一样,覆盖率相同;当网络运行到后期,两种算法的覆盖率发生了显著的变化,如图 9 所示。

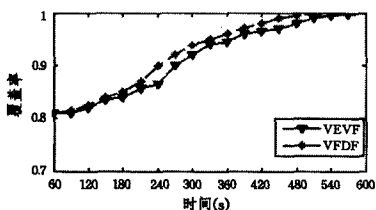


图 9 节点的收敛情况

VFDF 算法在相同的时间内节点的覆盖率总大于 VEVF 算法,并且当 VFDF 算法达到收敛状态时,VEVF 算法还在执行移动规则增加网络的覆盖率,总体来说该算法的网络覆盖质量低于所提算法。

**结束语** 对于无线移动传感器网络具有动态性、随机部

署、拓扑变化等特点,正是由于部署时是随机分布的,所以节点的覆盖产生了较大的冗余,使得整个网络的覆盖性能较差,降低了传感器的覆盖质量且花费代价巨大。本文提出了在目标区域进行 Voronoi 划分,根据 Voronoi 的性质,提出一种在通信相邻和局部 Voronoi 区域不相邻的节点之间执行的分布式算法。在不增加节点的同时,其可以增加网络的覆盖率,较 VEVF 方法,本文实现了对节点的最佳部署,使得移动传感器网络对监测区域的覆盖率达到实际的要求,有效地减少了网络的冗余,大大地降低了成本。接下来将重点考虑是否能在三维空间划分 Voronoi 图以实现覆盖控制。

## 参考文献

- [1] Zou Y, Chakrabar K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces[C]// Proc. IEEE InfoCom, 2003; 1293-1303
- [2] Fan Gao-juan, Wang Ru-chuan, Huang Hai-ping. Based on tolerance coverage area of wireless sensor. Network node scheduling algorithm[J]. Journal of Electronics, 2011, 39(1): 91-96 (in Chinese)  
凡高娟,王汝传,黄海平. 基于容忍覆盖区域的无线传感器. 网络节点调度算法[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 91-96
- [3] Sriram C. On deployment and security in mobile wireless sensor networks: algorithms design, vulnerability assessment and analysis[M]. The USA: VDM Publish House Ltd, 2009; 56-64
- [4] Veltri G, Huang Q, Qu G, et al. Minimal and maximal exposure path algorithms for wireless embedded sensor networks [C]// Proc of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. California, USA, 2003; 40-50
- [5] Liy C, Wu K, Xiao Y, et al. Random coverage with guaranteed connectivity: joint scheduling for wireless sensor networks[J]. IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., 2006, 17: 562-575
- [6] Graham R, Cortes J. Asymptotic optimality of multicenter voronoi configurations for random field estimation [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(1): 153-158
- [7] Cheng Wei-fang, Peng Shao-liang, Liao Xiang-ke. Motion sensor fence covering research[J]. Computer Engineering and Science, 2009, 31(6): 93-95 (in Chinese)  
程卫芳,彭绍亮,廖湘科. 移动传感器栅栏覆盖研究[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(6): 93-95
- [8] Konstantinidis A, Yang K, Zhang Q. An evolutionary algorithm to a multi-objective deployment and power assignment problem in wireless sensor networks [C]// Proceedings of IEEE Global Communications Conference. 2008; 475-480
- [9] Poduri S, Sukhatme G S. Constrained coverage in mobile sensor networks [C]// Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Orleans, 2004; 40-50
- [10] Mahboubi H, Aghdam G. Distributed deployment strategies to increase coverage in a network of wireless mobile sensors [C]// Proceedings of the American Control Conference. 2013; 5887-5892
- [11] Okabe A, Boots B. Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagram [M]. New York: John Wiley & Sons, 1999
- [12] Graham R, Cortes J. Asymptotic optimality of multicenter voronoi configurations for random field estimation [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(1): 153-158
- [13] Zhang C, Zhang Y C. Localized algorithms for coverage boundary detection in wireless sensor networks [J]. Wireless Networks, 2009, 15(1): 3-20