

## WSANs 中基于实时性约束的 actor 节点优化部署策略\*

车楠<sup>1,2+</sup>, 李治军<sup>1</sup>, 姜守旭<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

<sup>2</sup>(哈尔滨理工大学 软件学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

### Optimal Actor Nodes Deployment Strategy Under Real-Time Constraint in WSANs

CHE Nan<sup>1,2+</sup>, LI Zhi-Jun<sup>1</sup>, JIANG Shou-Xu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

<sup>2</sup>(School of Software, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

+ Corresponding author: E-mail: chen\_nan\_1980@yahoo.cn

**Che N, Li ZJ, Jiang SX. Optimal actor nodes deployment strategy under real-time constraint in WSANs. Journal of Software, 2011, 22(6): 1361-1372. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3826.htm>**

**Abstract:** This paper aims at finding an efficient actor nodes deployment strategy under a real-time constraint. Because of the random distribution of WASNs, WSANs' real-time coverage problem is actually NP-hard. There are no effective distributed algorithms in previous research that can solve the problem. Thus, the Voronoi-Based Maximize Real-Time deployment strategy is proposed to solve this problem, based on Voronoi diagram. Through simulated experiments, the results show that the distributed protocol is more effective than present deployment protocols in terms of real-time performance, convergence time, and energy consumption.

**Key words:** WSNs; WSANs; real time; deployment strategy; actor coverage

**摘要:** 旨在研究基于实时性约束的 actor 节点优化部署策略。由于 WSANs 通常是随机播撒的, 导致基于实时性约束的 actor 节点优化部署问题是 NP 难问题。因此, 提出了基于 Voronoi 图的最大实时覆盖部署策略, 并通过实验, 与现有针对区域覆盖的部署策略进行对比。该部署策略可以使 WSANs 获得更好的实时性, 且在收敛速度、能量消耗方面具有较好的性能。

**关键词:** WSNs; WSANs; 实时性; 部署策略; actor 覆盖

中图分类号: TP393 文献标识码: A

普通的传感器网络主要以收集环境信息为目的, 不具有与环境交互的能力。但是, 许多应用场景要求传感器网络与环境进行交互, 如火灾防控等。带有可执行节点的传感器网络 (WSANs) 通过引入 actor 节点使传感器网络不仅能够感知环境中发生的事件, 而且可以针对事件采取合适的动作来反作用于环境<sup>[1]</sup>。在 WSANs 中, 大量价格低廉的传感器节点负责感知周围环境, 并将感知到的数据通过无线通信报告给 actor 节点。actor 节点负责计算这些感知的信息并进行决策, 然后根据决策结果采取合适的动作<sup>[2]</sup>。WSANs 可以广泛应用于自动灭火、战场监视、生化武器攻击探测、入侵检测等场合<sup>[3,4]</sup>。例如, 在火灾防控应用场景中: 一旦 sensor 节点感知到火灾事件,

\* 基金项目: 国家自然科学基金 (60803148, 60973124)

收稿时间: 2009-05-26; 定稿时间: 2010-02-02

就会把火源和火灾程度等信息传递给具有喷水能力的 actor 节点,actor 节点立即采取喷水动作扑灭火灾。

对大多数应用而言,actor 节点的动作响应速度是决定 WSNs 能否得到有效应用的关键.Akyildiz 等人认为,实时性是 WSNs 区别于传统传感器网络的显著特性.在火灾防控应用中,对事件区域采取的喷水动作能否尽快执行是决定该 WSNs 是否有效的关键因素<sup>[1]</sup>.如何提供实时性保证是 WSNs 中的一个重要研究方向<sup>[5-7]</sup>.

本文旨在研究 WSNs 中基于实时性约束的 actor 节点的优化部署问题,所谓 WSNs 的实时性约束是指存在某个上界  $R_r$ ,只要 sensor 节点  $s$  到 actor 节点  $a$  之间的距离小于  $R_r$ , $a$  就能对  $s$  所发现的事件提供实时响应,此时称  $a$  实时覆盖  $s$ .显然,理想的 WSNs 中所有 sensor 节点都应被某个 actor 节点实时覆盖.但 WSNs 往往是随机播撒的,很难达到这一要求.于是,如何利用 actor 节点普遍具有的移动能力使最多的 sensor 节点被实时覆盖就成了一个关键问题.

目前,已有的研究只是针对 WSNs 中 sensor 节点的感知覆盖最大化进行的.即为了达到感知范围的最大化,如何对 sensor 节点进行部署.这些研究工作主要分为两类:第 1 类研究基于虚拟势场<sup>[8-12]</sup>,其核心思想是用虚拟力将 sensor 节点从密度较高的区域推到密度较低的区域;第 2 类研究利用 Voronoi 图来解决 sensor 节点的部署问题<sup>[13-15]</sup>,即 sensor 节点如何利用 Voronoi 图来发现感知空洞,并计算出填补空洞的合适位置.

这两类研究所解决的都只是感知区域的区域覆盖问题,并不适于解决 WSNs 中 sensor 节点被 actor 节点实时覆盖的节点覆盖问题.这是因为区域覆盖问题和节点覆盖问题之间具有显著的区别,区域覆盖问题追求的是覆盖区域的最大化,但覆盖区域的最大化并不意味着覆盖节点数量的最大化.区域覆盖所能覆盖节点数量的数学期望为  $E(|S_{sensor}^n|) = |S_{sensor}| \cdot \frac{area_{sense}}{area_{covered}}$ ,其中,  $|S_{sensor}^n|$  是被覆盖的 sensor 节点个数,  $|S_{sensor}|$  是所有 sensor 节点的个数,  $area_{sense}$  是感知区域面积,  $area_{covered}$  是被覆盖区域面积.容易看出,只有当各区域分布的节点个数即节点分布密度相同时,区域覆盖问题和节点覆盖问题才是等价的.而事实上, sensor 节点的分布是与播撒有关的,由于很难做到在感知区域内完全均匀地分布,所以区域覆盖问题是不可能等同于节点覆盖问题的.例如,假设 actor 节点覆盖了某一个区域,但如果该区域内没有 sensor 节点,那么即使 actor 节点能够对该区域发生的事件进行响应,但由于没有 sensor 节点能够发现事件,导致 actor 节点不会提供任何响应.部署在这种区域中的 actor 节点无疑是一种对资源的浪费.

基于上述分析,本文首先分析了 WSNs 的实时覆盖问题,在此基础上,提出了一种基于 Voronoi 图的 actor 节点最大实时覆盖部署策略(the Voronoi-based maximize real-time deployment strategy,简称 MRT-VOR).并将 MRT-VOR 与 MSF-VOR(the Voronoi-based maximize sense field deployment strategy)和 MSF-VEC(the vector-based maximize sense field deployment strategy)这两种典型的覆盖策略就 WSNs 的实时覆盖效果进行了实验对比.结果表明,MRT-VOR 可以使 WSNs 获得更好的实时性,而且在收敛速度、能量消耗方面均具有较好的性能,可以有效应用于 WSNs 中.

## 1 WSNs 实时覆盖问题

### 1.1 WSNs 实时覆盖

Gungor 等人认为<sup>[5]</sup>,WSNs 的实时性是指存在某个上界  $\Delta_{e2a}$ (其中,  $e2a$  是 event-to-action 的简写),使得从 WSNs 中的任何一个事件的发生到所需动作得到实施之间的延迟均应小于  $\Delta_{e2a}$ ,即如下公式(1)成立.

$$I^{tran} + I^{proc} + I^{act} \leq \Delta_{e2a} \quad (1)$$

其中:  $I^{tran}$  是从事件发生到事件感知信息被传输到 actor 节点间的延迟,由 buffering delay, channel access delay, transmission delay 和 propagation delay 这 4 个部分组成;  $I^{proc}$  是 actor 节点从 sensor 节点收集到足够信息,从而可对事件进行正确决策的时间;  $I^{act}$  是 actor 节点从做出决策到对事件区域实施合适动作所需的时间.对于  $I^{tran}$ ,可以假定数据包经过每一跳时 buffering delay, channel access delay, transmission delay 和 propagation delay 是相等的,于是有  $I^{tran} = \left\lceil \frac{D(s,a)}{\lambda} \right\rceil \times \varepsilon$ ,其中,  $s$  为任意 sensor 节点,  $a$  为  $s$  发送数据包的目标 actor 节点,  $D(s,a)$  是  $s$  到  $a$

的欧氏距离,  $\lambda$  为路由的每一跳所导致的从 sensor 节点向 actor 节点前进距离的下界,  $\varepsilon$  是前述 4 项延迟(delay)的

和  $I^{proc}$  近似等于 sensor 节点发包频率  $f_s$  和 actor 节点从 sensor 节点收集到足够信息所需包数  $p$  的乘积,即  $I^{proc} = f_s \times p$ . 根据定义,  $I^{act}$  是  $D(s,a)$  的一个线性函数  $k \times D(s,a) + R$  (其中,  $k \geq 0$ ). 将这些值代入公式(1)有

$$A_{e2a} \geq \left\lceil \frac{D(s,a)}{\lambda} \right\rceil \times \varepsilon + f_s \times p + k \cdot D(s,a) + R \tag{2}$$

公式(2)等价于:存在某个上界  $R_{rt}$ ,使得只要  $D(s,a) \leq R_{rt}$  成立,则 sensor 节点  $s$  发现的事件就能被 actor 节点  $a$  实时响应.所以在 WSANs 中,sensor-actor 通信是一种 *anycast* 类型通信,对于 sensor 节点  $s$ ,只要存在一个 actor 节点  $a$  使得  $D(s,a) \leq R_{rt}$  成立,即可认为  $s$  被  $a$  实时覆盖.图 1 中,阴影区域中的 sensor 节点都是被 actor 节点实时覆盖的 sensor 节点.

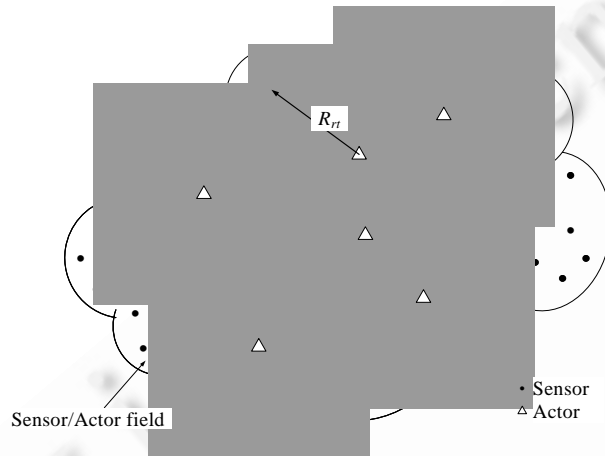


Fig.1 Sensor nodes are real-time covered by actor nodes in WSANs

图 1 WSANs 中的 sensor 节点被 actor 节点实时覆盖

因此,保证 WSANs 中 actor 节点对事件响应的实时性问题,就等价于定义 1 中给出的 WSANs 的实时覆盖问题(WSANs real-time coverage problem,简称 WRCP).

**定义 1.** 假设某个 WSANs 中的 actor 节点集合为  $S_{actor}$ ,sensor 节点集合为  $S_{sensor}$ ,sensor 节点的位置函数为  $loc: S_{sensor} \rightarrow R \times R$ ,则 WSANs 的实时覆盖问题 WRCP 定义为:对于某个上界  $R_{rt}$ ,求 actor 节点的位置函数  $loc': S_{actor} \rightarrow R \times R$ ,使得下面的公式(3)成立:

$$\text{Max } |S_{sensor}^{rt} = \{s \in S_{sensor} \mid (\exists a \in S_{actor}) D(a,s) \leq R_{rt}\}| \tag{3}$$

**定理 1.** WRCP 是 NP-难问题.

证明:假设  $A$  为求解 WRCP 的算法,则利用  $A$  可以构造出求解能否用  $k$  个半径为  $r$  的圆盘完全覆盖平面中点的判定问题<sup>[16]</sup>的算法,该算法如图 2 所示.

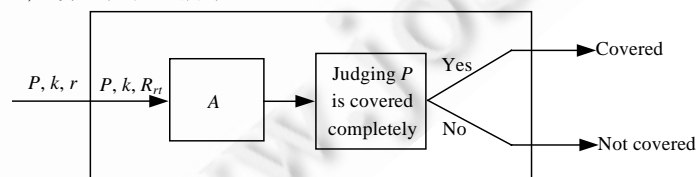


Fig.2 Algorithm for k circles complete cover problem

图 2 求解 k-圆盘完全覆盖问题的算法

其中,平面点集  $P$ 、圆盘半径  $r$  和圆盘个数  $k$  是  $k$ -圆盘完全覆盖问题的实例.在图 2 给出的算法中,判断  $P$  上的点是否被完全覆盖显然可在多项式时间内完成.因此, $k$ -圆盘完全覆盖问题可以在多项式时间内归约到

WRCP.由于  $k$ -圆盘完全覆盖平面中点的问题已被证明为 NP-完全问题,所以 WRCP 是 NP-难的.证毕. □

### 1.2 WRCP的Voronoi图分析

如前所述,WSANs的最大实时覆盖问题是一个 NP-难问题,从而无法直接求解整个感知区域中 actor 节点对 sensor 节点的最大覆盖.因此,本文利用 Voronoi 图根据 actor 节点的分布将感知区域分割为若干个凸多边形(称为 Voronoi 多边形),如图 3(a)所示;单个 actor 节点所代表的 Voronoi 多边形如图 3(b)所示.

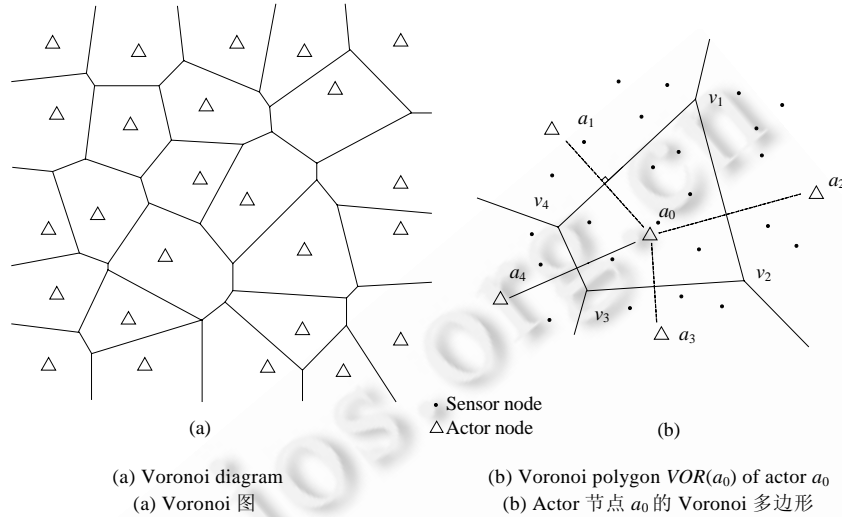


Fig.3 Voronoi diagram and voronoi polygon

图3 Voronoi 图与 Voronoi 多边形

根据 Voronoi 图的性质,所有 actor 节点代表的 Voronoi 多边形的总和可以完全覆盖感知区域内的所有 sensor 节点.于是,整个感知区域内 actor 节点对 sensor 节点实时覆盖的最大化问题就可以转化为 Voronoi 多边形内未被实时覆盖的 sensor 节点数量之和的最小化问题,具体分析如下.

根据 Voronoi 图的属性,在 actor 所代表的 Voronoi 多边形中,任意 sensor 节点到该 actor 节点的距离小于到其他 actor 节点的距离.也就是说,如果一个 actor 节点  $a$  无法对其 Voronoi 多边形中的某 sensor 节点  $s$  提供实时响应,那么其他 actor 节点也不可能给  $s$  提供实时响应.假设某个 WSANs 中的 sensor 节点集合为  $S_{sensor}$ ,  $a_i$  为任意的 actor 节点,令  $S_{vor}^{\bar{r}}(a_i)$  表示 actor 节点  $a_i$  所在 Voronoi 多边形中未被  $a_i$  实时覆盖的 sensor 节点集合,则 WSANs 中被 actor 节点实时覆盖的节点集合为

$$S_{sensor}^r = S_{sensor} - \bigcup_{a_i \in S_{actor}} S_{vor}^{\bar{r}}(a_i) \tag{4}$$

由于对  $\forall i, j (i \neq j)$  均有  $S_{vor}^{\bar{r}}(a_i) \cap S_{vor}^{\bar{r}}(a_j) = \emptyset$ , 所以根据公式(4)可知下面的公式(5)成立:

$$|S_{sensor}^r| = |S_{sensor}| - \sum_{a_i \in S_{actor}} |S_{vor}^{\bar{r}}(a_i)| \tag{5}$$

根据公式(5),WRCP 等价于使所有 actor 节点的 Voronoi 多边形内未被实时覆盖的 sensor 节点数量之和最小化的问题.本文正是基于这一事实设计了针对 actor 实时覆盖的 actor 节点部署策略.

## 2 MRT-VOR 节点部署策略

### 2.1 MRT-VOR策略的思想

根据公式(5),要想让 Voronoi 多边形中的 sensor 节点被相应 actor 节点实时覆盖的数量达到最大,只要令未

被 actor 实时覆盖的 sensor 节点数量达到最小即可,即令公式(5)中的  $\sum_{a_i \in S_{actor}} |S_{vor}^n(a_i)|$  取最小值.综合所有

Voronoi 多边形中 actor 节点的布置,即可近似获得 WSANs 中 actor 节点对 sensor 节点的最大覆盖.如图 4 所示,令  $S_{vor}(a_0)$  表示位于 actor 节点  $a_0$  所对应的 Voronoi 多边形中的 sensor 节点集,假设  $a_0$  能够实时覆盖的最大 sensor 节点集为  $S_{max}(a_0)$ , $S_{max}(a_0)$  的圆心为  $a'_0$ ,显然,当  $a_0$  移动到位置  $a'_0$  以后将使  $S_{vor}(a_0)$  中更多的 sensor 节点被  $a_0$  实时覆盖.MRT-VOR 节点部署策略的基本思想就是在  $S_{vor}(a_0)$  中求  $S_{max}(a_0)$ ,并将其作为  $a_0$  需要移动到的位置.

在  $S_{vor}(a_0)$  中求  $S_{max}(a_0)$ ,等价于圆盘覆盖平面中最多点的问题.该问题是一个 P 问题,求解方法如图 5 所示,对于平面中点集 P 的任意两个点  $p_i, p_j$ ,分别以  $p_i$  和  $p_j$  为圆心、 $R_r$  为半径画圆,如果两圆相交于两点  $p_{ij}$  和  $p_{ji}$ ,则令  $S_{i,j} = \{s | D(p_{ij}, s) \leq R_r, s \in P\}$ ,于是一定有  $S_{max}(a_0) \in \{S_{12}, S_{13}, \dots, S_{|P||P-2|}, S_{|P||P-1|}\}$ ,因此,可以在  $O(|P|^2)$  时间内求解  $S_{max}(a_0)$ ,证明见文献[19].

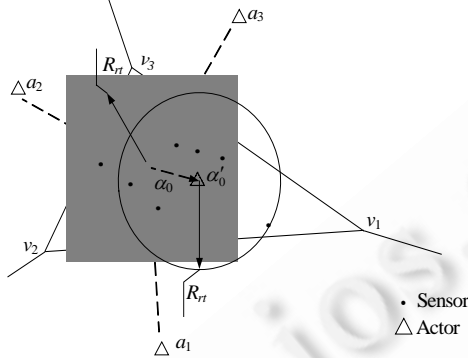


Fig.4  $a_0$  deployment strategy of maximizing the coverage of  $S_{vor}(a_0)$

图 4 使  $S_{vor}(a_0)$  中的节点获得最大覆盖的  $a_0$  部署策略

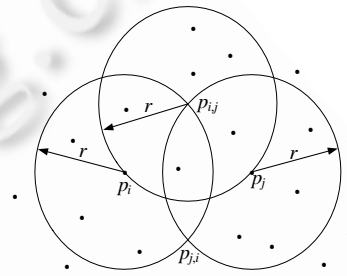


Fig.5 Solution of a round covering points problem

图 5 一个圆盘覆盖最多节点问题的求解方法

对于找到的最大覆盖节点子集  $S_{max}$ ,往往存在多个半径为  $r$  的圆可以完全覆盖它.如果直接选取图 5 中计算  $S_{max}$  时所使用的  $p_{ij}$  作为覆盖  $S_{max}$  的圆心,则可能会使 actor 节点移动到自己所代表的 Voronoi 多边形之外,从而会产生不良后果:由于某些 actor 节点可能会移动到感知区域之外,所以需要增加移动边界控制,文献[2]就是通过求  $S_{sensor}$  的凸壳  $CH(S_{sensor})$  来限定 actor 节点的移动范围的.某些 actor 节点还可能会移动到其他 actor 节点所代表的 Voronoi 多边形中,使整个 Voronoi 图产生大幅变化,甚至产生振荡,导致部署策略收敛速度过慢.

为保证 actor 节点不会移动到其所代表的 Voronoi 多边形之外,MRT-VOR 选择  $S_{max}$  的中心作为 actor 移动后的覆盖  $S_{max}$  的圆心  $O$ ,即选取使  $\max_{s \in P} \{D(s, O)\}$  最小的点  $O$ .该问题是一个 P 问题:即先利用 Graham RL 在文献[20]中给出的方法计算出点集  $S_{max}$  的凸壳  $CH(S_{max})$ ,根据凸壳的性质,只要某个圆能够覆盖凸壳  $CH(S_{max})$  就能完全覆盖节点集合  $S_{max}$ ;然后利用文献[14]采用的最小-最大优化覆盖算法以凸壳  $CH(S_{max})$  作为输入计算出圆心  $O$ ,这就是 MRT-VOR 策略中 actor 节点需要移动到的位置.

**定理 2.** 利用 MRT-VOR 节点部署策略将 actor 节点移动到的位置必在凸壳  $CH(S_{sensor})$  内.

**证明:**利用 MRT-VOR 策略,actor 节点只会选择  $S_{sensor}$  的一个子集  $S'_{sensor}$  的中心作为移动目标.根据点集中中心的性质,  $S'_{sensor}$  的中心必然在  $CH(S'_{sensor})$  之内.根据凸壳的性质,由于  $S'_{sensor} \subseteq S_{sensor}$ ,  $CH(S'_{sensor})$  必然被  $CH(S_{sensor})$  所包围.由此,  $S'_{sensor}$  的中心也在  $CH(S_{sensor})$  之中.所以,actor 节点所移动到的位置必然在凸壳  $CH(S_{sensor})$  内.证毕. □

**定理 3.** MRT-VOR 策略选取  $S_{max}$  的中心作为 actor 节点移动目标的方案,可以减小 actor 节点的移动距离.

**证明:**如图 6 所示,设  $O$  为一个 actor 所代表 Voronoi 多边形内最大覆盖节点子集  $S_{max}$  的中心,  $CH_1, CH_2, \dots, CH_6$  是形成凸壳  $CH(S_{max})$  的节点,  $R_{min} = \max_{s \in P} \{D(s, O)\}$ .如果周围 actor 节点的移动使得 actor 节点  $a_0$  所代表 Voronoi

多边形发生变化,则将导致最大覆盖节点子集  $S_{\max}(a_0)$  也会发生变化;如果  $a_0$  周围 actor 节点的移动导致  $|S_{\max}(a_0)|$  变小,只要  $CH_1$  和  $CH_4$  仍属于  $S_{\max}(a_0)$ ,则  $S_{\max}(a_0)$  的中心不会发生变化;如果  $a_0$  周围 actor 节点的移动导致  $|S_{\max}(a_0)|$  变大,只要新加入的 sensor 节点(如图 6 中的  $s_0$ )在圆心为  $O$ 、半径为  $R_{\min}$  的圆内,则  $S_{\max}(a_0)$  的中心也不会发生变化.所以,选择  $S_{\max}$  的中心可以降低 actor 节点的移动可能性,减少 actor 节点的移动距离,从而加快部署策略的收敛速度.  $\square$

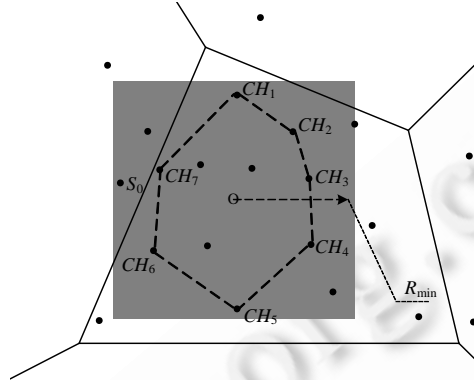


Fig.6 Selecting the center of  $S_{\max}$  may decrease actor node moving distance  
图 6 选取  $S_{\max}$  的中心可能减小 actor 节点的移动距离

图 7 表明选取最大覆盖子集  $S_{\max}$  的中心比直接选取图 5 中的  $p_{ij}$  作为移动目标产生更好的效果.图 7 是在  $200m \times 200m$  范围布撒 30 个 sensor 节点、2 个 actor 节点( $R_r$  设为 100m)时分别对这两种方式进行实验时的结果.说明选取  $S_{\max}$  的中心作为移动目标较选  $p_{ij}$  作为移动目标而言,在获得基本相同覆盖效果的同时却显著减少了移动距离和移动次数.

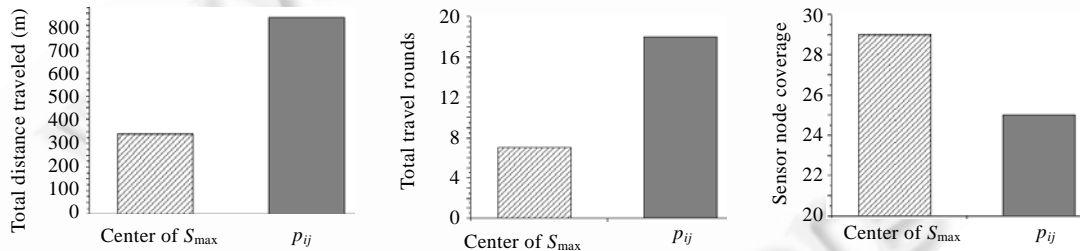


Fig.7 Optimization effect of selecting  $S_{\max}$  center as moving target  
图 7 采用  $S_{\max}$  中心作为移动目标的优化效果

2.2 MRT-VOR的收敛优化

如前所述,在 MRT-VOR 节点部署策略中,actor 节点的 Voronoi 多边形会随其周围 actor 节点位置的变化而发生变化.该特点可能导致 actor 节点的移动产生振荡:某 actor 节点  $a_0$  在  $t$  时刻从位置  $L$  移动到位置  $L'$ ,在  $t'(t' > t)$  时刻又移动到  $L$  附近的位置.这种振荡将会降低 actor 节点部署策略的收敛速度.

为此,本文提出一种减少振荡的方法,即限制 actor 节点移动的方向,并选择最大的移动距离.actor 节点  $a_0$  会选择移动到使公式(6)值最大的圆心  $O_i \in O^*$  (存在多个候选的圆心),如果所有的  $O_i$  均满足  $Effect(O_i) < 0$ ,即  $a_0$  需要向夹角大于  $90^\circ$  的矢量方向移动时, $a_0$  不发生移动.

$$Effect(O_i) = \frac{\overline{L_{r-1}L_r}}{\|L_{r-1}L_r\|} \cdot \overline{L_rO_i} \tag{6}$$

公式(6)中的  $L_r$  是第  $r$  个移动周期节点  $a_0$  所处的位置, $O^* = \{O_1, O_2, O_3, \dots, O_k\}$  是求解最大覆盖节点子集时返

回的多结果节点集  $S^*=\{S_{\max 1}, S_{\max 2}, S_{\max 3}, \dots, S_{\max k}\}$  的中心.

### 2.3 MRT-VOR的并行优化

**定义 2.** actor 节点  $a_i$  和  $a_j$  称为邻居节点,当且仅当在  $a_i$  和  $a_j$  所代表的 Voronoi 多边形  $G_i=(V_i, E_i)$  和  $G_j=(V_j, E_j)$  中,  $E_i \cap E_j \neq \emptyset$  成立.

由于每个 actor 节点的 Voronoi 多边形受其邻居 actor 节点的位置影响,因此,为有效地避免 actor 节点在部署时发生振荡,可以要求 actor 节点  $a_i$  移动时让  $a_i$  的邻居节点保持静止.MRT-VOR 采用本地邻居节点间的竞争移动机制来实现这一要求.本地邻居节点间的竞争移动是指一个 actor 节点(设其为  $a_0$ )在移动前必须赢得  $a_0$  和  $a_0$  的邻居节点间的竞争,如果  $a_0$  输掉竞争则  $a_0$  保持静止.在 MRT-VOR 的竞争机制中,actor 节点间以使公式(6)的值达到最大为目标来竞争移动权限.

### 2.4 MRT-VOR的算法实现

作为一个分布式节点部署协议,MRT-VOR 的实现如图 8 所示.每个 actor 节点在初始部署阶段设置移动轮次  $round(a_i)$  为 0,并将其位置、轮次等信息广播到所有其他节点,每个节点在收到这些信息后会计算它所代表的 Voronoi 多边形及其邻居集合  $Neighbors(a_i)$ (图 8 的第 1 行、第 2 行).引入移动轮次的意义在于保证所有 actor 节点在每个轮次中只发生一次移动,从而避免当某 actor 节点  $a_0$  在移动到新位置后,由于 Voronoi 多边形的实时变化,节点  $a_0$  可能依然会赢得竞争,从而导致其他 actor 节点失去移动的机会(图 8 的第 4 行、第 5 行).在每个新的轮次,actor 节点更新它所代表的 Voronoi 多边形及其邻居集合  $Neighbors(a_i)$ ,并据此计算出移动权限  $\gamma(a_i)$ (应用公式(6)),然后再在邻居节点中对  $\gamma(a_i)$  进行广播(图 8 的第 7 行~第 9 行).每次移动之前,actor 节点  $a_i$  必须确认其移动权限  $\gamma(a_i)$  在邻居节点中是最大的(图 8 的第 10 行).此外,它还必须保证  $\gamma(a_i) > 0$ ,这样可以有效避免振荡的发生(图 8 的第 12 行).如果  $\gamma(a_i)$  在邻居节点中最大但  $\gamma(a_i) \leq 0$ ,则放弃本轮次的移动.在所有节点完成第  $r$  轮移动(某些节点可能未发生移动)后,Voronoi 图将会发生变化,并开始下一轮次的部署移动.

Complete MRT-VOR algorithm pseudo-code for a particular actor  $a_i$ :

```

1  0 → round( $a_i$ ) and Broadcast( $i, pos(a_i), round(a_i)$ )
2  Create vor( $a_i$ ) and Create Neighbors( $a_i$ )
3  repeat
4  if round( $a_i$ ) > round( $a_j$ ),  $\forall a_j \in Neighbors(a_i)$  then
5    Wait until { $\forall a_j | a_j \in S_{actor} \ \& \ round(a_i) > round(a_j)$ } relocation
6  else
7    Create vor( $a_i$ ) and Create Neighbors( $a_i$ )
8    Call MRT-VOR() //or call MSF-VEC() and MSF-VOR()
9    Broadcast( $\gamma(a_i)$ )
10 if  $\gamma(a_i) > \gamma(a_j)$ ,  $\forall a_j \in Neighbors(a_i)$  then
11   round( $a_i$ )++
12   if  $\gamma(a_i) \geq 0$  then
13     Relocate( $a_i$ ) and Broadcast(newpos, round( $a_i$ ))
14   end if
15   else
16     continue
17   end if
18 end if

```

Fig.8 Pseudo-Code of MRT-VOR

图 8 MRT-VOR 算法伪代码

## 3 实验结果与分析

为了验证 MRT-VOR 的有效性,本文通过使用 Glomosim 仿真软件将 MRT-VOR 与现有针对区域覆盖的部署策略 MSF-VOR 和 MSF-VEC 进行了对比.MSF-VOR 是一种利用 Voronoi 图实现最大区域覆盖的部署策略,其基本思想是,选择每个 actor 节点  $a_i$  所代表的 Voronoi 多边形  $G_i=(V_i, E_i)$  的中心  $O'$  作为移动的目标,  $O'$  是集合  $V_i$  中所有点的中心,即选取  $O'$  使得  $\max(D(O', j))$  最小,其中  $j \in V_i$ .基于虚拟力的 actor 节点部署策略 MSF-VEC 利

用带电粒子之间的相互作用:如果两个相同属性带电粒子的距离过近,就会产生斥力使两个粒子相互离开.如果任何两个 actor 节点  $a_i$  和  $a_j$  之间的距离小于  $2R_r$ ,那么可定义  $a_i$  和  $a_j$  间的斥力使这两节点排斥  $2R_r-D(a_j,a_i)$  的距离.另外,为确保 actor 节点不移动到感知区域外,actor 节点  $a_i$  距边界  $B$  的距离小于  $R_r$  时,也会产生斥力使 actor 节点  $a_i$  被排斥  $R_r-D(B,a_i)$  的距离.

本文构建了与文献[2]相同的实验场景来模拟 WSNs 在森林火灾监测中的应用,并在该实验场景中对 MRT-VOR,MSF-VOR 和 MSF-VEC 进行对比.在实验设置中:sensor 节点带有温度传感器以监测可能发生的火灾,并将监测信息以存储转发的方式传送到 actor 节点;actor 节点装备具有灭火能力的部件,如洒水装置.模拟实验场景是一个  $1200m \times 600m$  的矩形区域,300 个 sensor 节点随机布撒在该区域内,actor 节点的数量和初始位置是模拟实验的可调参数,actor 节点的实时响应半径  $R_r$  设为 100m.

### 3.1 MRT-VOR的实时覆盖有效性

首先通过在矩形区域内随机布撒 20 个 actor 节点来观察 MRT-VOR 策略下被实时覆盖的 sensor 节点情况.图 9(a)为区域中随机布撒 20 个 actor 节点的初始状况,此时,sensor 节点被实时覆盖的数量为 96.图 9(b)为 actor 节点在应用 MRT-VOR 策略时的中间过程,当所有 actor 节点总共移动了 1105m 后,被实时覆盖的 sensor 节点数量达到了 220.图 9(c)为所有 actor 节点总共移动了 2106m 后所完成的 MRT-VOR 部署,此时,被实时覆盖的 sensor 节点数量达到了 265.这说明,随着 actor 节点的不断移动,被实时覆盖的 sensor 节点数量将会迅速增加,从而验证了 MRT-VOR 在实时覆盖部署时的有效性.图 9(d)、图 9(e)和图 9(f)分别是在 actor 节点数量为 10,30,40 的情况下运行 MRT-VOR 所完成的 actor 节点部署结果,当 actor 节点为 40 时,WASNs 中所有的 sensor 节点全部被 actor 节点实时覆盖.

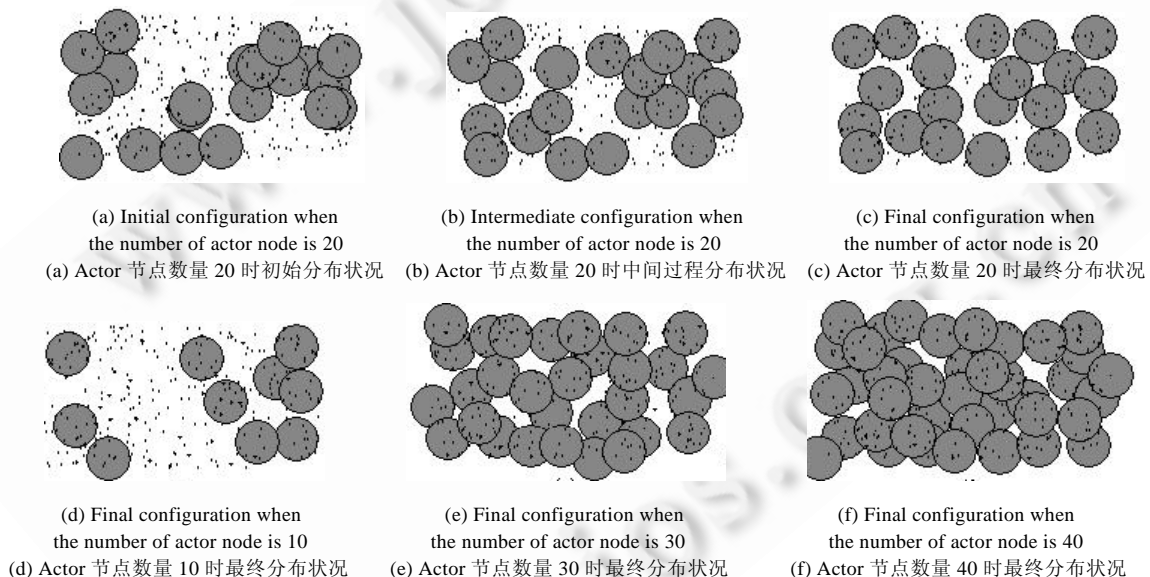


Fig.9 The effect of MRT-VOR

图 9 MRT-VOR 应用效果

图 10 给出了 MRT-VOR 和区域覆盖策略 MSF-VOR,MSF-VEC 的实时覆盖效果对比.另外,由于求解区域覆盖最大化的问题是 P 问题,因此,采用文献[19]的方法可以得出区域覆盖的最优解.所以,本文也比較了 MRT-VOR 和获得区域覆盖最大化情况下被实时覆盖的 sensor 节点数量(图 10 中的 Optimal).图 10 表明,采用 MRT-VOR 策略时,实时覆盖的 sensor 节点数量大于其他部署策略,包括区域覆盖的最优解,尤其是在 actor 节点数量较少的情况下.



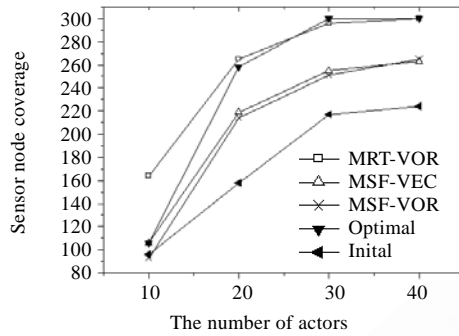


Fig.10 Numerical comparison of sensor node coverage with varying actors

图 10 不同 actor 节点数量下被实时覆盖 sensor 节点数量比较

### 3.2 MRT-VOR的效率

考虑到 actor 节点也可能是一种依靠电池提供能量的设备,此时,actor 节点的移动将是能量消耗的主要原因.因此,本文还将各种 actor 节点部署策略下所有 actor 节点移动距离之和进行了对比,其结果如图 11 所示.图 12 则给出了 3 种策略下 actor 节点的平均移动距离.可以看出,当 actor 节点在数量较多时,应用 MRT-VOR 策略时 actor 节点的平均移动距离变化不大.

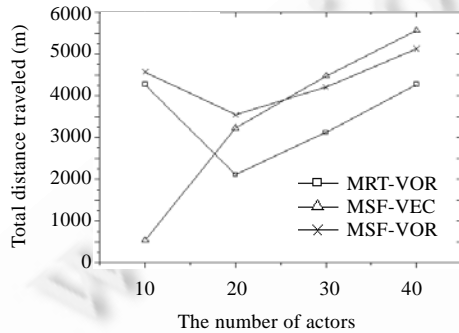


Fig.11 Numerical comparison of total distance traveled with varying actors

图 11 不同 actor 节点数量下移动距离总和的对比

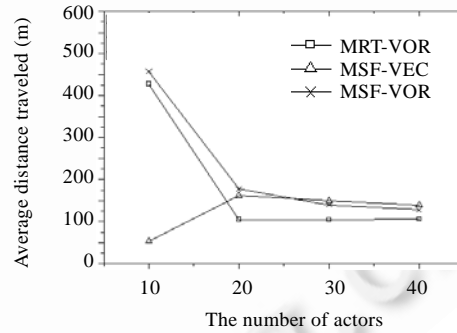


Fig.12 Numerical comparison of average distance traveled with varying actors

图 12 不同 actor 节点数量下平均移动距离的对比

除了节点移动距离这一部署策略的额外负载之外,节点移动的轮次也是影响部署效率的另一个重要参数,因为节点的每次移动都要发送和收集大量的广播信息,如图 8 中的第 1 行、第 9 行和第 13 行.图 13 给出了 actor 节点数量不同的情况下 3 种部署策略收敛时,actor 节点所需移动的总次数.实验结果与第 2.1 节中的分析相符,即 MRT-VOR 收敛时,actor 节点所需移动的总次数和要少于 MSF-VOR.随着 actor 节点数量的增加,MRT-VOR 和 MSF-VOR 均优于 MSF-VEC.

为了验证 MRT-VOR 的收敛性,图 14 给出了当 actor 节点数量为 20 时,采用 MRT-VOR 策略时实时覆盖的 sensor 节点数量随 actor 节点轮次最大值变化的收敛情况.

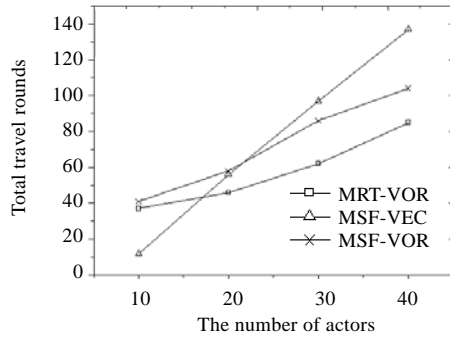


Fig.13 Numerical comparison of the total travel rounds in final configuration with varying actors

图 13 不同 actor 节点数量下 actor 节点移动结束时移动次数总和比较

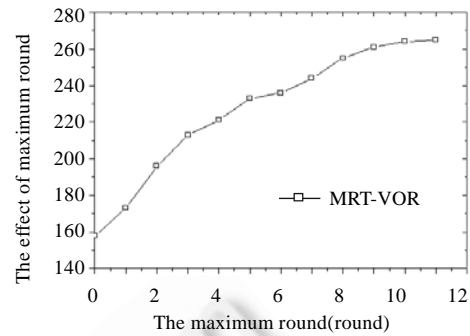


Fig.14 The effect of increased maximum round among actor nodes

图 14 随着 actor 节点中最大 round 增加所产生的效果

整个部署的完成时间取决于需要移动轮次最多的 actor 节点,图 15 给出了不同 actor 节点数量下部署完成时,3 种部署策略所需要的最大移动轮次(round),该参数反映了节点部署的收敛速度。

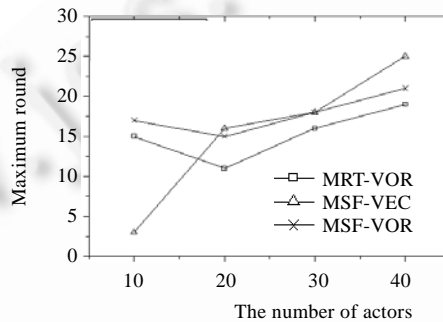


Fig.15 Numerical comparison of the maximum round with varying actors in final configuration

图 15 不同 actor 节点数量下 actor 节点移动结束时最大 round 比较

从图 10~图 15 可以看出:MSF-VEC 在 actor 节点数量较小情况下的移动距离总和较小,收敛速度较快;但当 actor 节点数量较大时,移动距离总和迅速变大,收敛速度亦迅速变慢.这是因为只有当两个 actor 节点之间的距离小于  $2R_r$  时才会产生使 actor 节点移动的虚拟力.因此,当 actor 节点数量相对于感知区域较小时,发生相互作用的可能性较低,移动距离显然就会减小.当然,此时 MSF-VEC 的部署效果也会差很多(这一点从图 10 可以看出).比较 MRT-VOR 和 MSF-VOR 这两种基于 Voronoi 图的部署策略可以发现,MSF-VOR 的移动距离总是大于 MRT-VOR,但其收敛速度也总是小于 MRT-VOR.这是由于在 MRT-VOR 中,actor 节点选取 Voronoi 多边形内最大覆盖节点子集的中心作为移动目标,而 MSF-VOR 总是选取 Voronoi 多边形的中心作为移动目标.由于某 actor 节点或其邻居节点发生移动时都会导致该 actor 节点的 Voronoi 多边形发生变化,而 Voronoi 多边形的变化又必然导致 Voronoi 多边形中心的变化,但 Voronoi 多边形的变化未必导致 Voronoi 多边形内最大覆盖节点子集的中心发生变化,所以采用 MSF-VOR 对 actor 节点进行部署时较采用 MRT-VOR 更容易出现往复运动.另外,本文给出的振荡优化和并行优化使得 MRT-VOR 在移动距离和收敛速度方面进一步优于 MSF-VOR.

#### 4 结 论

本文研究的主要问题是:在 WSANs 初始化时,如何通过改变 actor 节点的位置来使 WSANs 的实时性达到

最优?为此,本文提出了 WRCP 问题,并证明了 WRCP 是 NP 难的.WRCP 的等价问题,其实就是  $k$  个半径为  $r$  的圆盘覆盖平面中最多点的优化问题.本文的贡献在于首次提出了一种能够近似求解 WRCP 问题的分布式算法 MRT-VOR,通过理论分析,与基于传统部署思想的 MSF-VOR 和 MSF-VEC 相比,MRT-VOR 可以使更多 sensor 节点所感知的事件获得实时响应,并且不需要对 actor 节点的移动边界施加额外的限制,就能保证 actor 节点不会移动到感知区域之外.最后,本文通过实验考察了在 actor 节点数量不同的情况下,MRT-VOR,MSF-VOR 和 MSF-VEC 的一些关键指标的对比.结果验证了 MRT-VOR 的有效性,它在收敛速度和能量消耗方面均具有较好的性能.

#### References:

- [1] Akyildiz IF, Kasimoglu IH. Wireless sensor and actor networks: Research challenges. *Ad Hoc Network Journal*, 2004,2(4): 351–367. [doi: 10.1016/j.adhoc.2004.04.003]
- [2] Akkaya K, Janapala S. Maximizing connected coverage via controlled actor relocation in wireless sensor and actor networks. *Computer Networks*, 2008,52(14):2779–2796. [doi: 10.1016/j.comnet.2008.06.009]
- [3] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002,38(4): 393–422. [doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4]
- [4] Petriu EM, Georganas ND, Petriu DC, Makrakis D, Groza VZ. Sensor-Based information appliances. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 2000,3(4):31–35. [doi: 10.1109/5289.887458]
- [5] Gungor VC, Akan OB, Akyildiz IF. A real-time and reliable transport (RT)<sub>2</sub> protocol for wireless sensor and actor networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2008,16(2):359–370. [doi: 10.1109/TNET.2007.900413]
- [6] Melodia T, Pompili D, Gungor VC, Akyildiz IF. Communication and coordination in wireless sensor and actor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2007,6(10):1116–1129. [doi: 10.1109/TMC.2007.1009]
- [7] Li FM, Xu WJ, Liu XH, Hu SQ. A real-time energy-aware cluster-based routing protocol for wireless sensor and actor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2008,45(1):26–33 (in Chinese with English abstract).
- [8] Cortes J, Martinez S, Karatas T, Bullo F. Coverage control for mobile sensing networks. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2004,20(2):243–255. [doi: 10.1109/TRA.2004.824698]
- [9] Howard A, Mataric MJ, Sukhatme GS. An incremental self-deployment algorithm for mobile sensor networks. *Autonomous Robots*, 2002,13(2):113–126. [doi: 10.1023/A:1019625207705]
- [10] Michele G, Marco G, Carla-Fabiana C, Emilio L. Sensor deployment and relocation: A unified scheme. *Journal of Computer Science and Technology*, 2008,23(3):400–412. [doi: 10.1007/s11390-008-9142-y]
- [11] Meguerdichian S, Koushanfar F, Qu G, Potkonjak M. Exposure in wireless ad-hoc sensor networks. In: *Proc. of the ACM MobiCom*. Rome: ACM Press, 2001. 139–150. [doi: 10.1145/381677.381691]
- [12] Tao D, Ma HD, Liu L. A virtual potential field based coverage-enhancing algorithm for directional sensor networks. *Journal of Software*, 2007,18(5):1152–1163 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1152.htm> [doi: 10.1360/jos181152]
- [13] Kwok A, Martinez S. Deployment algorithms for a power-constrained mobile sensor network. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*. Pasadena: IEEE Press, 2008. 140–145.
- [14] Wang G, Cao GH, La Porta TF, Thomas F. Movement-Assisted sensor deployment. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2006,5(6): 640–652. [doi: 10.1109/TMC.2006.80]
- [15] Heo N, Varshney PK. Energy-Efficient deployment of intelligent mobile sensor networks. *IEEE Trans. on Systems*, 2005,35(1): 78–92. [doi: 10.1109/TSMCA.2004.838486]
- [16] Johnson DS. The NP-completeness column: An ongoing guide. *Journal of Algorithms*, 1983,4(4):397–411. [doi: 10.1016/0196-6774(83)90019-6]
- [17] Aurenhammer F. Voronoi diagrams—A survey of a fundamental geometric data structure. *ACM Computing Surveys*, 1991,23(3): 345–405. [doi: 10.1145/116873.116880]
- [18] Fortune S, Du D, Hwang F. *Voronoi Diagrams and Delaunay Triangulations*. World scientific Publishing Co., 1992. 193–233.

- [19] Wang G, Cao GH, La Porta TF. Movement-Assisted sensor deployment. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. Hong Kong: IEEE Press, 2004. 2469–2479. [doi: 10.1109/TMC.2006.80]
- [20] Graham RL. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set. Information Processing Letters, 1972,1(4): 132–133. [doi: 10.1016/0020-0190(72)90045-2]

#### 附中文参考文献:

- [7] 李方敏,徐文君,刘新华,胡四泉.无线传感器/执行器网络中能量有效的实时分簇路由协议.计算机研究与发展,2008,45(1):26–33.
- [12] 陶丹,马华东,刘亮.基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法.软件学报,2007,18(5):1152–1163. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1152.htm> [doi: 10.1360/jos181152]



车楠(1980—),男,黑龙江哈尔滨人,博士生,主要研究领域为传感器网络.



姜守旭(1968—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究领域为对等网络,传感器网络.



李治军(1977—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为 P2P 系统,普适计算,操作系统.