

有向传感器网络最大覆盖调度算法*

程卫芳¹⁺, 廖湘科¹, 沈昌祥²

¹(国防科学技术大学 计算机学院,湖南 长沙 410073)

²(海军计算技术研究所,北京 100841)

Maximal Coverage Scheduling in Wireless Directional Sensor Networks

CHENG Wei-Fang¹⁺, LIAO Xiang-Ke¹, SHEN Chang-Xiang²

¹(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

²(Institute of Naval Computer Technology, Beijing 100841, China)

+ Corresponding author: E-mail: wfangch@nudt.edu.cn, http://www.nudt.edu.cn

Cheng WF, Liao XK, Shen CX. Maximal coverage scheduling in wireless directional sensor networks. *Journal of Software*, 2009,20(4):975-984. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3240.htm>

Abstract: Unlike the traditional omni-directional sensors that always have an omni-angle of sensing range, directional sensors may be able to switch to several directions and each direction has a limited angle of sensing range. This paper studies a novel “area coverage by directional sensors” problem. It proposes the Maximum Directional Area Coverage (MDAC) to maximize the covered area by scheduling the working directions of the sensors in the network. This paper proves the MDAC to be NP-complete and proposes two distributed scheduling algorithms for the MDAC. The proposed algorithms are proved to terminate in finite time. Simulation results demonstrate the effectiveness of the two algorithms.

Key words: directional sensor network; area coverage; distributed algorithm; scheduling; probability

摘要: 与传统的全向传感器不同,有向传感器可以切换到不同的方向,并且每个方向覆盖有限角度的感应范围.针对有向传感器网络的区域覆盖问题,研究了“最大有向区域覆盖”MDAC(maximum directional area coverage)问题,期望通过调度传感器的工作方向,最大化覆盖区域面积.首先给出了 MDAC 的问题定义,使用整数线性规划描述 MDAC 问题,并且证明其是 NP 完全的.然后提出一种分布式贪心算法 DGreedy(distributed greedy algorithm)解决 MDAC 问题.在此基础上,通过计算可能的覆盖贡献比例来反映网络拓扑信息.还提出了一种增强的算法 PGreedy(distributed probability-enhanced greedy algorithm)使覆盖区域更大.证明了所提算法的收敛性,并通过详细的模拟实验验证了其有效性.

关键词: 有向传感器网络;区域覆盖;分布式算法;调度;概率

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

近几年,无线传感器网络在军事和民用领域得到了广泛应用,如环境监控、战场监视和健康看护等^[1,2].覆盖

* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA01Z213 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2007-03-22; Accepted 2007-12-17

控制作为无线传感器网络中一个最基本的问题,引起了很多学者的极大关注^[3,4].过去的大部分工作基于全方位角度感应的全向传感器假设,但在实际应用中存在多种有向传感器,例如视频传感器^[5,6]、超声传感器^[6]和红外传感器^[5]等.其中,相机传感器是众所周知的有向传感器,并已被广泛应用于无线多媒体传感器网络中^[7].在由大量有向传感器组成的网络中,区域覆盖仍然是一个重要的研究问题.

如相机传感器等有些有向传感器可以转向几个不同的方向,每个方向仅有有限角度的感应范围.本文研究此类传感器,并且假设不同方向的感应范围互不重叠.如果有向传感器面向某个方向工作,该方向就是此传感器的工作方向.传感器工作方向所在的感应范围称作它的覆盖区域.因此,有向传感器的覆盖区域是由其位置和工作方向共同决定的.网络随机部署后,不同传感器的覆盖区域可能相互重叠,所以需要调度传感器工作在不同的方向来满足某些覆盖服务质量,如使整个网络的覆盖区域最大,或者达到某些目标和区域的 k 覆盖等.在传统的覆盖方法中,全向传感器只有两种状态:睡眠或活跃.但有向传感器能够睡眠或工作在几个方向,所以需要针对有向传感器网络研究新的覆盖调度算法.

本文旨在最大化随机部署的有向传感器网络的覆盖区域.本文将证明调度传感器的工作方向,使覆盖区域最大的问题 MDAC(maximum directional area coverage)是 NP 完全问题,并且研究该问题的分布式解决方案.实际上,在网络初始部署后监视的目标区域可能会发生改变,所以满足覆盖要求的传感器的工作方向也需要改变.因此,MDAC 是有向传感器网络的一个非常重要的研究问题.

本文首先分析有向传感器网络的覆盖特性,给出了 MDAC 的问题定义,使用整数线性规划描述 MDAC 问题,并且证明其是 NP 完全的.然后,提出了一种分布式贪心算法 DGreedy(distributed greedy algorithm)解决 MDAC 问题.在此基础上,利用局部迭代计算的可能覆盖贡献比反映网络拓扑信息,提出了一种增强的算法 PGreedy(distributed probability-enhanced greedy algorithm)使覆盖区域更大.

本文第 1 节形式化定义 MDAC 问题,给出 MDAC 的整数线性规划描述,并且证明其为 NP 完全的.第 2 节详细描述 DGreedy 算法.第 3 节在 DGreedy 算法的基础上提出一种增强算法 PGreedy,并且详细证明其收敛性.第 4 节通过模拟实验研究本文算法的有效性.第 5 节总结并提出今后的研究方向.

1 最大有向区域覆盖问题(MDAC)

本节主要分析和定义最大有向区域覆盖问题 MDAC.首先描述本文使用的一些定义和符号,然后形式化定义 MDAC 问题并证明其为 NP 完全的.最后为进一步明确 MDAC 问题,给出精确的整数线性规划描述.

1.1 定义和符号

为了描述 MDAC 问题并证明其复杂性,下面给出虚拟节点和虚拟域的定义.虚拟域类似于文献[8,9]中的 *subelements* 和 *fields*.

定义 1(虚拟节点). 给定一个有多个可选方向的有向传感器,每个方向可以派生出一个虚拟节点.虚拟节点是一种特殊的传感器,其感应区域即为原始传感器相应方向的扇形区域.某个虚拟节点被激活意味着原始传感器工作在该虚拟节点相应的方向.有 4 个可选方向的传感器的虚拟节点示例如图 1 所示.

定义 2(虚拟域). 给定一个有向传感器集合和指定要被覆盖的区域.虚拟域是一个点集合.两个点属于相同的虚拟域当且仅当它们被相同的虚拟节点集合所覆盖,即虚拟域是相邻虚拟节点感应区域相交形成的最小区域.给每个虚拟域分配一个权重代表其点的数量,实际上,该权重反映了虚拟域的面积.虚拟域示例如图 2 所示.

本文使用的符号定义如下:

- A_0 :给定的监视区域.
- N :有向传感器数目.
- P :每个有向传感器的可选方向个数.
- s_i :第 i 个传感器, $1 \leq i \leq N$.
- $s_{i,j}$:第 i 个传感器第 j 个方向派生的虚拟节点, $1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq P$.
- S :传感器集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$.

- V :虚拟节点集合 $V=\{s_{i,j}|1\leq i\leq N,1\leq j\leq P\}$.
- Q :随机部署的传感器集合 S 在给定区域 A_0 形成的虚拟域个数.
- f_i :第 i 个虚拟域, $1\leq i\leq Q$.
- F :虚拟域集合 $F=\{f_1,f_2,\dots,f_Q\}, A_0 = \bigcup_{i=1}^Q f_i$.
- w_i :第 i 个虚拟域的权重, $1\leq i\leq Q$.
- $R_{i,j}$:属于 $s_{i,j}$ 感应区域的虚拟域集合, $1\leq i\leq N,1\leq j\leq P$.

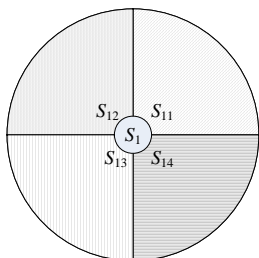


Fig.1 Virtual nodes
图 1 虚拟节点

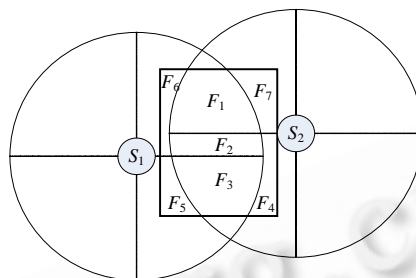


Fig.2 Virtual field
图 2 虚拟域

1.2 MDAC问题

随机部署网络时,监视区域不一定被初始部署的传感器完全覆盖.而且,有时候监视区域可能随应用需求而改变,所以,调度节点工作方向必不可少.本文旨在调度节点工作方向,使得用最少的传感器覆盖最大的区域.

定义 3(最大有向区域覆盖问题 MDAC). 给定区域 A_0 和有向传感器集合 S ,并且每个传感器有 P 个可选方向.求 V 的一个子集 Z ,使得所覆盖的区域 $\bigcup_{s_{i,j}\in Z} R_{i,j}$ 面积最大,同时,对相同的 i ,至多只有一个虚拟节点 $s_{i,j}$ 被选择属于 Z ,即每个传感器只能工作在一个方向上.

定义 4(MDAC 判定形式). 给定区域 A_0 和有向传感器集合 S ,并且每个传感器有 P 个可选方向, u_0 是 1 到 N 之间的整数, γ_0 是小于 A_0 面积的正数.判定是否存在 V 的一个有 u_0 个元素的子集 Z ,使得所覆盖的区域面积不小于 γ_0 ,即 $\sum_{s_{i,j}\in Z} w_k \geq \gamma_0$,同时,对相同的 i ,至多只有一个 $s_{i,j}$ 被选择属于 Z .

MDAC 问题的复杂性由下面的定理来证明.

定理 1. MDAC 问题是 NP 完全的.

证明:首先定义一个布尔变量 $\chi_k, 1\leq k\leq Q, \chi_k$ 代表虚拟域 f_k 是否被子集 Z 覆盖.

$$\chi_k = \begin{cases} 1, & f_k \in \bigcup_{s_{i,j}\in Z} R_{i,j} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

通过证明 MDAC 问题的一个全向传感器网络特例是 NP 完全问题来证明此定理.该特例中,所有虚拟域权重相同($w_1=w_2=\dots=w_Q$),且 $P=1$.因此有

$$\bigcup_{s_{i,j}\in Z} R_{i,j} = \sum_{i=1}^Q \chi_i w_i = w_1 \sum_{i=1}^Q \chi_i \quad (2)$$

使覆盖区域 $\bigcup_{s_{i,j}\in Z} R_{i,j}$ 最大,即 $w_1 \sum_{i=1}^Q \chi_i$ 最大,等同于使 $\sum_{i=1}^Q \chi_i$ 最大.于是,可以将每个虚拟域看作是一个目标点,使 $\sum_{i=1}^Q \chi_i$ 最大也就是使所覆盖的目标数目最多.最大化所覆盖的目标数等同于熟知的 NP 完全问题——最大覆

盖问题,由此得证 MDAC 是 NP 完全的. □

1.3 整数线性规划形式

为进一步明确 MDAC 问题,本节给出精确的整数线性规划形式(integer linear programming,简称 ILP)描述.

考虑一个随机部署的有向传感器网络,要监视指定的区域 A_0 ,有 N 个有向传感器集合 S ,每个传感器有 P 个可选方向.

ILP 中的变量描述如下:二进制变量 y_k 取 1,当且仅当虚拟域 f_k 被任意激活的传感器所覆盖,否则取 0;二进制变量 $x_{i,j}$ 取值 1,当且仅当第 i 个传感器工作在第 j 个方向(即虚拟节点 $s_{i,j}$ 被激活),否则取 0.

网络一经部署,虚拟节点形成的虚拟域就被确定.对每个有向传感器,定义一个矩阵,其元素 $a_{j,k}^i$ 表示虚拟域 f_k 是否属于 $s_{i,j}$ 感应区域:

$$a_{j,k}^i = \begin{cases} 1, & f_k \in R_{i,j} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \forall j = 1, \dots, P, \forall k = 1, \dots, Q \quad (3)$$

如果定义 δ_k 为覆盖虚拟域 f_k 的传感器数目的非负整数,那么, δ_k 可以表示如下:

$$\delta_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P a_{j,k}^i x_{i,j}, \forall k = 1, \dots, Q \quad (4)$$

因此,MDAC 的 ILP 形式为

$$\max \sum_{k=1}^Q y_k w_k \quad (5)$$

约束

$$\delta_k / N \leq y_k \leq \delta_k, \forall k = 1, \dots, Q \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^P x_{i,j} \leq 1, \forall i = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$y_k = 0 \text{ or } 1, \forall k = 1, \dots, Q \quad (8)$$

$$x_{i,j} = 0 \text{ or } 1, \forall i = 1, \dots, N, \forall j = 1, \dots, P \quad (9)$$

目标函数(5)使得所覆盖的区域最大.约束(6)表示虚拟域 f_k 是否被覆盖.约束(7)表示一个传感器不同方向之间的互斥性,即只能同时工作在一个方向上.

2 分布式贪心算法(DGreedy)

MDAC 是 NP 完全问题,所以上述的整数线性规划问题不能在多项时间内解决.而且大规模网络中没有集中的全局信息,每个有向传感器只能从邻居节点收集局部信息,并独立地决策.尽管分布式的解决方案不能得到最优解,但可扩展性更好,通信开销较小,因此更加实用和有价值.本节提出 MDAC 问题的一个分布式贪心算法 DGreedy.

2.1 定义和假设

为方便讨论,先给出如下定义.

定义 5(感应邻居). 两个有向传感器是感应邻居,当且仅当一个传感器任意方向的感应区域与另一个传感器任意方向的感应区域重叠.定义感应邻居是为了区别于传统的通信邻居.在图 2 中, S_1 和 S_2 是感应邻居.

不失一般性,本文做出如下假设:

- 所有传感器同构.
- 传感器的每个方向有相同大小的感应区域,并且不同方向的感应区域互不重叠,如图 1 所示.
- 每个传感器已知它的地理位置.
- 感应邻居之间能够可靠通信.

2.2 DGreedy算法

DGreedy 的主要思想是:每个传感器都选择与其他传感器重叠最少的方向,即工作在能够额外覆盖最大区域的方向上.为了简化不规则区域面积的计算,本文采用类似于文献[10]的方法,基于网格的样本点进行计算.其基本思想是,通过建立网格,并利用网格的交叉点来代表传感器的覆盖区域.因此,区域的面积近似于该区域内的样本点数.通过观察我们发现,只有感应邻居间的决策才会相互影响,因此,为了进行本地决策,每个传感器需要获取感应邻居的位置和工作方向信息.在本文的假设下,感应邻居间距离小于 $2R_0$,所以,每个传感器只需在 $2R_0$ 的范围内广播决策信息即可.

类似于文献[11],本文给传感器分配一个彼此不同的“优先级”标签值,优先级高的感应邻居比优先级低的感应邻居先作决策.实际上,只需要感应邻居间的优先级互不相同.具体应用中,可以利用传感器标识符或者其他有用信息作为优先级.网络初始化时,每个传感器启动邻居发现过程获取感应邻居的位置和优先级信息,并计算虚拟域及其权重信息.

为了简化算法的描述,如果某个虚拟域没有被更高优先级的感应邻居所覆盖,且位于 $s_{i,j}$ 感应区域内,则称该虚拟域被 $s_{i,j}$ “触及”.符号 $G_{i,j}$ 用来表示 $s_{i,j}$ 所有触及虚拟域的面积之和.

基于上述分析,本文提出了 DGreedy,该算法是一种分布式算法,在每个传感器节点上并发执行.

DGreedy 算法.

```

1.  if 传感器  $s_i$  在所有感应邻居中优先级最高 then
2.       $j_0 = \text{index}(\max_{1 \leq j \leq P} G_{i,j})$       /*选择触及虚拟域面积最大的方向*/
3.      广播包含工作方向的覆盖消息给所有感应邻居
4.      return      /*算法终止*/
5.  end if
6.  while 收到优先级比自己高的感应邻居的覆盖消息
    do
7.      记录相应的工作方向信息和已被覆盖的虚拟域
8.      更新传感器  $i$  每个方向的触及虚拟域面积
9.      if 传感器  $i$  收到了所有优先级比它高的感应邻居的覆盖消息 then
10.          $j_0 = \text{index}(\max_{1 \leq j \leq P} G_{i,j})$       /*选择触及虚拟域面积最大的方向*/
11.         if  $G_{i,j_0} = 0$  then
12.             关闭感应模块
13.             退出 while 循环
14.         end if
15.         调整工作方向为  $j_0$ 
16.         广播包含工作方向的覆盖消息给优先级比自己低的感应邻居
17.         return
18.     end if
19.  end while

```

很显然,只要感应邻居间覆盖消息能够可靠地传递,算法 DGreedy 就能在有限时间内终止.但是,传感器优先级的设置对算法性能影响很大,下面,我们在 DGreedy 的基础上,利用反映网络拓扑信息的可能覆盖贡献比例设置优先级,提出分布式概率增强的贪心算法.

3 分布式概率增强的贪心算法(PGreedy)

如前所述,本文旨在调度有向传感器的工作方向覆盖尽可能大的区域.在 DGreedy 算法中,每个传感器基于局部贪心的原则选择工作方向,但是传感器决策的顺序对最终的覆盖性能有极大的影响.因此,合理设置传感器

决策的优先级至关重要.

本节提出分布式概率增强的贪心算法 **PGreedy**,结合网络拓扑信息设置传感器的决策优先级.传感器每个方向(即每个虚拟节点)被分配一个概率值,表示其可能的覆盖贡献比例,计算方法为此虚拟节点额外增加的覆盖区域与整个传感器半径所在的圆形区域面积之比.**PGreedy** 算法分为两部分:首先是概率迭代过程,为每个虚拟节点计算可能的覆盖贡献比例,然后是设置优先级,并且依此进行局部贪心决策.

3.1 概率迭代过程

为简化算法的实现和描述,用来统计区域面积的样本点组织成如第 1.1 节所示的虚拟域.虚拟节点 $s_{i,j}$ 的概率 $p_{i,j}$ 定义如下:

$$p_{i,j}=(c_0-c_{i,j})/(P \times c_0), \forall i=1, \dots, N, \forall j=1, \dots, P \quad (10)$$

其中,常量 c_0 是虚拟节点整个感应区域的面积, $c_{i,j}$ 是虚拟节点 $s_{i,j}$ 的感应区域中可能被其他虚拟节点冗余覆盖部分的平均面积之和,定义如下:

$$c_{i,j} = \sum_{f_k \in (R_{i,j} \cap R_{i',j'}) \wedge i \neq i'} \frac{w_k \times p_{i',j'}}{(N(f_k)-1)}, \forall i=1, \dots, N, \forall j=1, \dots, P \quad (11)$$

这里, $N(f_k)$ 记录虚拟域 f_k 所属的虚拟节点数,即能够覆盖 f_k 的虚拟节点数.

可以看出,一个传感器所有方向的概率之和小于 1,这是有效的、可行的,因为此概率值仅仅反映了可能的覆盖贡献比的大小,而且算法 **PGreedy** 最终仅仅利用这些概率值来设置优先级,没有使用概率真正的物理含义和用法,如后文第 3.2 节所述.

为了获取感应邻居的虚拟节点概率值,用时间常量 Δt 同步接收迭代更新消息.**PGreedy** 调用的概率迭代过程描述如下:

概率迭代过程.

```

1: for  $j=1, \dots, P$ 
2:    $p_{i,j}(0)=1/P$  /*每个方向的初始概率相等*/
3: end
4:  $t=0$  /*迭代步长计数器*/
5:  $\varepsilon=10^{-4}$  /*迭代误差界限*/
6:  $e=1$  /*迭代误差*/
7: while 从感应邻居收到迭代更新消息
8:    $t=t+1$ 
9:   如果没有收到某个感应邻居的迭代更新消息,利用其最近的消息
10:  for  $j=1, \dots, P$ 
11:    $c_{i,j} = \sum_{f_k \in (R_{i,j} \cap R_{i',j'}) \wedge i \neq i'} (w_k \times p_{i',j'}(t-1))/(N(f_k)-1)$  /*可能被其他虚拟节点冗余覆盖部分的
   平均面积和*/
12:    $p_{i,j}(t) = \frac{(c_0 - c_{i,j})}{P \times c_0}$  /*计算新的概率值*/
13: end
14:  $e = \max_{1 \leq j \leq P} |(p_{i,j}(t) - p_{i,j}(t-1))|$  /*计算与上次迭代概率值的误差*/
15: if  $e \geq \varepsilon$ 
16:   广播包含  $\{p_{i,j}(t) | j=1, \dots, P\}$  的迭代更新消息给所有感应邻居
17: end
18: sleep( $\Delta t$ ); /*等待感应邻居的迭代更新消息*/
19: end

```

任何算法必须保证其收敛性,为了描述上述概率迭代过程的收敛性,给出如下定理:

定理 2. 概率迭代过程可在有限时间内终止.

证明:首先证明计算 $\{p_{i,j}|i=1,\dots,N,j=1,\dots,P\}$ 的 Jacobi 迭代收敛.由公式(10)和公式(11)可得如下 Jacobi 迭代等式:

$$p_{i,j} = \frac{1}{P} - \frac{1}{P \times c_0} \times \sum_{f_k \in (R_{i,j} \cap R_{i,j'}) \setminus \{i\}} \frac{w_k \times p_{i,j'}}{(N(f_k) - 1)} \quad \forall i = 1, \dots, N, \forall j = 1, \dots, P \quad (12)$$

设 $X = [p_{11}, \dots, p_{1P}, \dots, p_{N1}, \dots, p_{NP}]^T$, $A = [a_{ij}]_{(N \times P) \times (N \times P)}$, 公式(12)的标准矩阵形式为 $X = AX + 1/P$. 记为

$$R(i) \triangleq R_{\text{ceil}(i/P), \text{mod}(i/P)}, \quad \forall i = 1, \dots, (N \times P).$$

那么, $\forall i = 1, \dots, N, \forall j = 1, \dots, P$, 可得

$$a_{ij} = \begin{cases} \sum_{f_k \in (R(i) \cap R(j))} \frac{-w_k}{P \times c_0 \times (N(f_k) - 1)}, & i \neq j \wedge R(i) \cap R(j) \neq \emptyset \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

因此,很容易看出如下不等式成立:

$$\sum_{j=1}^{N \times P} |a_{i,j}| \leq \sum_{f_k \in R(i)} \left(\frac{w_k}{P \times c_0 \times (N(f_k) - 1)} \times (N(f_k) - 1) \right) = \frac{1}{P} \quad (14)$$

由于 $P > 1$, 由公式(14)有 $\|A\|_{\infty} = \max_{1 \leq i \leq N \times P} \sum_{j=1}^{N \times P} |a_{i,j}| \leq \frac{1}{P} < 1$, 即迭代矩阵的 ∞ 范数小于 1, 所以上述 Jacobi 迭代收敛.

其次, Jacobi 迭代收敛意味着在若干次迭代后, 所有传感器虚拟节点概率值的迭代误差 e 总会小于 ϵ , 这时, 每个传感器将停止发送迭代更新消息. 如果一个传感器从所有感应邻居都收不到迭代更新消息, 它就退出 while 循环, 归纳可得上述概率迭代过程可在有限时间内终止. 同时通过实验观察可知, 该迭代过程收敛速度非常快, 仅需要几个步长, 详见第 4.1 节. \square

3.2 PGreedy 算法

PGreedy 算法的关键思想是: 有较少重叠区域的传感器先作决策, 并且每个传感器依据局部最大覆盖选择工作方向, 通过局部贪心最终达到全局次优的解决方案. 该算法由于在作局部决策时结合了概率反映的全局拓扑信息, 因此, 比 DGreedy 算法能够覆盖更大的区域.

对每个传感器而言, 概率值较大的方向更有可能覆盖较大的区域, 所以让有较大概率值方向的传感器先作决策, 对全局结果更有利. 而且传感器的方向有较高的概率意味着重叠区域较少, 因此, 将传感器所有方向概率的最大值设为其优先级. 在感应邻居中, 优先级最高的传感器最先作决策, 由于其所有感应区域都没有被其他感应邻居所覆盖, 因此, 它依据可能的覆盖贡献比作决策, 选择有最大概率值的方向工作. 然后, 它广播工作方向信息给所有的感应邻居, 邻居传感器依次像 DGreedy 算法那样进行本地贪心决策.

基于上述分析, 本文提出了 Pgreedy 算法, 该算法是一种分布式算法, 在每个传感器节点上并发执行. Pgreedy 算法描述如下, 所有符号标识的含义同前文.

PGreedy 算法.

- 1: 与感应邻居交换位置信息和虚拟域的划分信息
- 2: 调用概率迭代过程
- 3: $priority(i) = \max_{1 \leq j \leq P} p_{i,j}$ /*设置优先级*/
- 4: 与感应邻居交换优先级信息
- 5: **if** 传感器 s_i 在感应邻居中优先级最高 **then**
- 6: $j_0 = \text{index}(\max_{1 \leq j \leq P} p_{i,j})$ /*选择概率最大的方向*/
- 7: 广播包含工作方向信息的覆盖消息给所有感应邻居

```

8:      return                               /*算法终止*/
9:  end if
10: while 收到感应邻居的覆盖消息
    Do
11:     记录相应的工作方向和已经覆盖的虚拟域
12:     更新传感器  $i$  每个方向的触及虚拟域面积
13:     if 传感器  $i$  收到了所有优先级比它高的感应邻居的覆盖消息 then
14:          $j_0 = \text{index}(\max_{1 \leq j \leq P} G_{i,j})$  /*选择触及虚拟域面积最大的方向*/
15:         if  $G_{i,j_0} = 0$  then
16:             关闭感应模块
17:             退出 while 循环
18:         end if
19:         调整工作方向为  $j_0$ 
20:         广播包含工作方向的覆盖消息给低优先级的感应邻居
21:         return
22:     end if
23: end while

```

由定理 2 可知概率迭代过程可收敛,因此很容易证明 PGreedy 算法也可在有限时间内终止.

4 性能评估

本节通过模拟实验评估 DGreedy 和 PGreedy 两种算法的性能,所有实验在 MATLAB 7.0 中实现,运行在 1.6 GHz CPU 和 512M 内存的 PC 机上.模拟中,不同数目的有向传感器随机部署在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的区域,网格密度 $d=0.1\text{m}^{[10]}$.首先测试了概率迭代过程的收敛性和收敛速度,然后比较了本文算法和传感器随机选择工作方向的随机算法 Random 的性能.

4.1 概率迭代过程的收敛

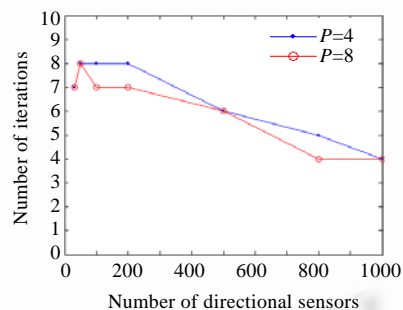


Fig.3 Relationship between the number of sensors and iterations

图3 传感器数目对迭代收敛步长的影响

该实验在指定区域产生不同大小的随机部署的传感器网络.每个传感器所有方向的初始值都为 $1/P$,然后通过概率迭代过程计算更新.当两次迭代产生的概率值之差小于 0.000 1 时,迭代过程终止.值得注意的是,由于用样本点近似区域的面积,实验中所能计算的概率值的精度为 $1/(P \times c_0)$,因此迭代误差 ε 不能小于 $1/(P \times c_0)$.

图 3 显示了概率迭代过程的收敛特性, $R_0=10\text{m}$.如定理 2 所述迭代过程收敛,并且收敛速度很快;整个网络收敛所需要的迭代步长不超过 10,而且还随着网络规模的增大而减少,这是因为当传感器密度更大时,传感器受其每个感应邻居的影响更小.同时,可选方向个数 P 的取值对收敛速度没有影响,因此可知,PGreedy 算法的额外开销也很小.

4.2 性能比较

本节实验比较 3 种分布式算法 Random, DGreedy 和 PGreedy 的覆盖比例(所有传感器覆盖的区域面积之和与整个监视区域面积之比).对于 Random 算法,运行 100 次取覆盖比例平均值. DGreedy 算法中设置传感器剩余能量为优先级.

首先设定 $P=4$,图 4 给出了不同算法、不同网络规模的性能比较($P=4, R_0=10\text{m}$).随着传感器数目的增加,覆盖比例几乎呈线性增长.很显然,Random 算法的覆盖比例最差.图中 DGreedy 算法比 Random 算法结果好得多.如我们所期望的,PGreedy 算法性能最好,这是因为感应邻居中可能重叠区域较少的传感器先作决策,使得邻居传感器选择的工作方向重叠区域较小,当传感器数目增加时,性能提高尤其显著.例如,当传感器数目是 200 时,算法 PGreedy 和 DGreedy 的覆盖比例分别为 90.90%和 78.39%,而 Random 算法只有 65.30%.这是因为节点密集的网络中有更多的传感器感应区域相互交叠,从而方向调度算法更加必不可少.随机部署的传感器越密集,就导致更多的区域被冗余重叠所覆盖,所以 3 种算法都随着网络规模的增大,其覆盖比例增加则越来越慢.图 5 显示了传感器数目为 200 时覆盖比例和感应半径的关系($P=4, N=200$).覆盖比例随着感应半径的增加几乎呈线性增加.同样,PGreedy 算法性能最好,DGreedy 次之.

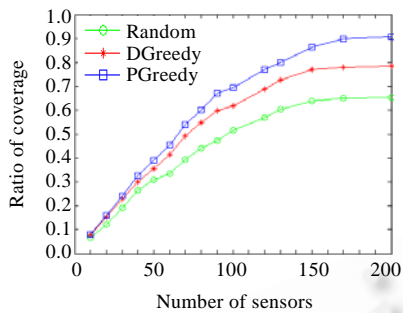


Fig.4 Ratio of coverage vs. number of sensors

图 4 传感器数目对覆盖比例的影响

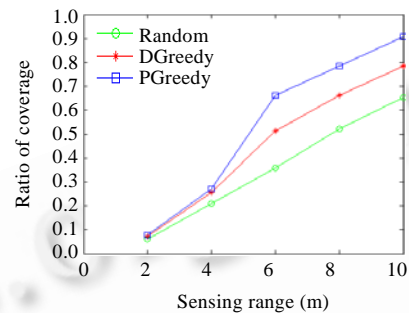


Fig.5 Ratio of coverage vs. sensing range

图 5 感应范围对覆盖比例的影响

图 6 显示了当 $N=20, R_0=10\text{m}$ 时,传感器方向个数对覆盖比例的影响.可以看出,覆盖比例随着方向个数的增加而减少.但很明显,算法 DGreedy 比 Random 减少的速度慢得多.同样,算法 PGreedy 比 DGreedy 减少的速度慢得多.对传感器不同的方向个数,算法 PGreedy 和 DGreedy 覆盖比例的增加都很大.当传感器方向个数较多时,覆盖比例的增加尤为显著.

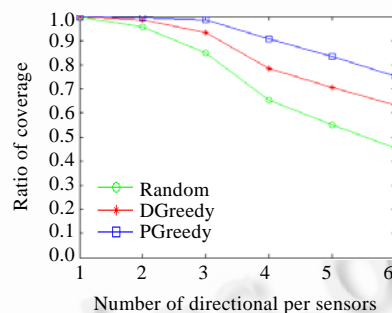


Fig.6 Relationship between the number of directions and coverage ratio

图 6 方向个数对覆盖比例的影响

5 结 论

区域覆盖是传感器网络的重要研究问题.在先期的研究工作中,人们主要为全向传感器网络设计覆盖调度算法,但这些算法不能直接应用于有向传感器网络.本文针对有向传感器网络,深入研究了最大有向区域覆盖问题,通过调度有向传感器的工作方向,使覆盖的区域面积达到最大值.首先形式化定义 MDAC 问题,给出 MDAC 问题的整数线性规划描述,并且证明其是 NP 完全的.然后提出一种分布式贪心算法 DGreedy,通过局部选择覆盖区域最大的方向,来达到 MDAC 问题的一个次优解.在此基础上,本文利用局部迭代计算的可能覆盖贡献比例来反映网络拓扑信息,提出了一种增强的算法 PGreedy 使覆盖区域更大,并且证明了算法可在有限时间内终止.

模拟实验结果表明,算法 DGreedy 比 Random 的覆盖比例提高很多.同样,算法 PGreedy 比 DGreedy 性能也提高很多.因此,PGreedy 算法对最大有向区域覆盖问题更有效.而且,因为算法收敛速度非常快,PGreedy 的额外开销也非常小.在后期工作中,我们将研究能量均衡的更有效的算法.

致谢 在此,我们向对本文提出宝贵建议的审稿专家及参与本文内容讨论的所有同学、老师表示衷心的感谢.

References:

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002,40(8): 102–114.
- [2] Szewczyk R, Mainwaring AM, Polastre J, Anderson J, Culler DE. An analysis of a large scale habitat monitoring application. In: *Proc. of the ACM SenSys*. Baltimore: ACM Press, 2004. 214–226. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1031521>
- [3] Cardei M, Wu J. Energy-Efficient coverage problems in wireless ad hoc sensor networks. *Journal of Computer Communications on Sensor Networks*, 2005,29(4):413–420.
- [4] Ren Y, Zhang S, Zhang H. Theories and algorithms of coverage control for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2006, 17(3):422–433 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm>
- [5] Rahimi M, Baer R, Iroezzi OI, Garcia JC, Warrior J, Estrin D, Srivastava M. Cyclops: In situ image sensing and interpretation in wireless sensor networks. In: *Proc. of the ACM SenSys*. San Diego: ACM Press, 2005. 192–204. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.92.3772>
- [6] Feng W, Kaiser E, Feng WC, Baillif ML. Panoptes: Scalable low-power video sensor networking technologies. *ACM Trans. on Multimedia Computing, Communications and Applications*, 2005,1(2):151–167.
- [7] Ma H, Tao D. Multimedia sensor network and its research progresses. *Journal of Software*, 2006,17(9):2013–2028 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2013.htm>
- [8] Slijepcevic S, Potkonjak M. Power efficient organization of wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications*. Helsinki: IEEE Press, 2001. 472–476. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=936985
- [9] Gupta H, Zhou Z, Das SR, Gu Q. Connected sensor cover: Self-Organization of sensor networks for efficient query execution. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2006,14(1):55–67.
- [10] Chen H, Wu H, Tzeng N. Grid-Based approach for working node selection in wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC)*. Paris: ACM Press, 2004. 20–24. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1313228
- [11] Ai J, Abouzeid AA. Coverage by directional sensors in randomly deployed wireless sensor networks. *Journal of Combinatorial Optimization*, 2006,11(1):21–41.

附中文参考文献:

- [4] 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.软件学报,2006,17(3):422–433. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm>
- [7] 马华东,陶丹.多媒体传感器网络及其研究进展.软件学报,2006,17(9):2013–2028. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2013.htm>



程卫芳(1980—),女,湖北红安人,博士生,主要研究领域为传感器网络,信息安全.



沈昌祥(1940—),男,教授,博士生导师,中国科学院院士,CCF 会士,主要研究领域为操作系统,信息安全.



廖湘科(1963—),男,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为操作系统,信息安全.