

基于节点近似圆的有向强栅栏构建算法

王方红¹ 李 涛² 金英东² 胡朕豪²

(浙江工业大学之江学院 浙江 绍兴 312030)¹ (浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)²

摘 要 栅栏覆盖是有向传感器网络(DSN)覆盖控制的研究热点之一。为了在感知角度大于 π 时高效地构建栅栏,文中设计了有向节点的近似圆模型,提出了集中式栅栏构建 HapC 算法和分布式栅栏构建 INSDBC 算法。HapC 算法把网络分成节点近似圆相连的子群,利用匈牙利算法选择最优节点连通这些子群,形成栅栏。为了进一步减少节点的数量,对基本栅栏的每个子群进行精简。INSDBC 算法根据节点近似圆之间的几何关系,使每个节点具有最大的栅栏贡献,从左到右依次选择能耗最小的节点分布式构建栅栏。结果证明,这两种方法结合能够用较低能耗和较少节点构建有向强栅栏,对提升有向传感器网络的覆盖性能具有一定的理论与实际意义。

关键词 有向栅栏覆盖,近似圆,栅栏贡献,能耗
中图法分类号 TP391 **文献标识码** A

Directional Strong Barrier Constructing Scheme Based on Node Approximate Circle

WANG Fang-hong¹ LI Tao² JIN Ying-dong² HU Zhen-hao²

(Zhijiang College, Zhejiang University of Technology, Shaoxing, Zhejiang 312030, China)¹

(Department of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)²

Abstract Barrier coverage is one of the hot spots in directional wireless sensor network (DSN). In order to effectively form barrier when sensing angle is more than π , this paper designed the approximate circle model of directional nodes and proposed centralized heuristic barrier construction scheme based on approximate circle (HapC) and distributed improved barrier construction scheme based on next node sports (INSDBC) to construct directional strong barrier. In HapC, the whole network is divided into subgroup in which each approximate circle is connected, and the optimal mobile nodes are selected to connect these subgroups by Hungarian algorithm. To further decrease the number of barrier node, it reduces the staff node of sub-barrier. NSDBC maximizs the contribution of each nodes based on geometric relation of approximate circle. Moreover, it selects the node with minimum energy consumption to form barrier in turn from left to right. Simulation results show that this method can effectively constitute strong barrier coverage, and enhance the coverage performance of DSN. This research has a certain theoretical and practical significance for barrier coverage improvement in DSN.

Keywords Directional barrier coverage, Aapproximate circle, Barrier contribution, Energy consumption

1 引言

有向传感器、,如视频传感器、红外传感器等,在诸多领域有着广泛的应用,如可将传感器节点部署在重要管道沿线以监视针对管道的破坏活动,以及在敌营周边布设无线传感器节点来监视敌方的兵力部署和武器配备情况等。在上述列举的应用中,有向传感器节点被部署于宽度小于感知半径的狭长的带状区域内,对监控区域的移动目标进行检测,这种技术被称为栅栏覆盖,如何利用有向节点的移动实现 K -栅栏覆盖是有向传感网络的一个研究热点^[1-2]。

针对栅栏覆盖目前已有一些研究工作。Kumar 等^[3]定义了强栅栏和弱栅栏;罗卿等^[4]提出一种栅栏覆盖控制算法,调度传感器使冗余节点睡眠,达到减少能耗和延长网络寿命的目的;班冬松等^[5]研究了全向移动传感器网络 K -栅栏覆盖问题,提出了一种能量高效的栅栏覆盖构建算法 CBIGB;Tian

等^[6]提出了 2D-MESH 算法构建二维栅栏覆盖;王超等^[7]提出了 PMNSB 算法,用最少的节点形成强栅栏。

Ma 等^[8]研究了视频传感器网络中用最少的有向视频节点组建栅栏的问题;Tao 等^[9]研究如何调整有向节点的感知方向组建有向强栅栏的问题;Zhang 等^[10]转动有向节点来构建强栅栏。Ssu 等^[11]提出了一个分布式栅栏构建算法,初始节点选择最优的中继节点向左右两个方向延伸栅栏,直到边界。Cheng 等^[12]提出 D-TrBR 算法,利用节点的转动能力,分布式构建栅栏。该算法选择具有最大栅栏贡献的转动节点,选择转动能耗最小的转动方向,能有效构建有向栅栏覆盖。该算法充分利用了节点的转动能力来有效构建栅栏。Wang 等^[13]研究了混合有向网络的栅栏覆盖,根据静态节点之间的距离构建权重栅栏图,再运用顶点不相交的路径算法选择 K -栅栏路径,然后用匈牙利算法选择最优节点连接,形成栅栏。此算法利用图论的方法找到移动距离最小的节点构建栅栏,

本文受“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD10B01)资助。
王方红(1981—),女,硕士生,实验师,主要研究方向为传感器网络,E-mail:390425074@qq.com。

但是该算法的复杂度高,耗费时间长。在线性部署下,Chen等^[14]通过调整节点感知方向修补栅栏空隙,形成栅栏。同样在线性部署下,Wu等^[15]则提出了分布式栅栏构建算法,每个节点选择自己的最优工作方向,使子栅栏之间的空隙数量最少,再进一步微调节点感知方向,使整个网络的空隙长度最小。任勇默等^[16]提出了 NSDBC 算法,选择能耗最少的节点分布式构建有向强栅栏,此算法中,单个节点的最大贡献也只是感知半径 r ,没有考虑感知角度较大时,如何利用增大的感知区域构建栅栏。如图 1 所示,黑色实线扇形是有向节点的感知区域,它们可以获得比感知半径更大的栅栏贡献,如红色实线所示。这里栅栏贡献是指单个栅栏节点的感知区域在 x 轴的最大投影。如果经过旋转使红色实线与 x 轴平行,就可以得到最大栅栏贡献为 $2r$ 。

因此,本文构建感知角度大于或等于 π 时的节点近似圆,采用集中式和分布式两种策略,来高效地构建有向栅栏。

本文第 2 节描述相关模型和定义;第 3 节是节点近似圆的理论分析;第 4 节详细介绍基于节点近似圆的集中式栅栏构建算法;第 5 节详细介绍基于节点近似圆的分布式栅栏构建算法;第 6 节通过仿真实验对提出的算法进行性能评估;最后总结全文并介绍下一步工作。

2 相关模型和定义

研究有向栅栏问题之前,有如下假设:

- 1)所有传感器的感知角度均相同,且角度大于或等于 π 。
 - 2)所有传感器的转动功率和平地上的单位距离功耗均相同,参考文献[17],单个传感器节点每转动 180° 耗能为 1.8 J ,每移动 1 m 耗能为 3.6 J 。
 - 3)利用成熟的定位算法,节点可以感知自己的位置。
- 栅栏中只需要考虑相邻两个节点的覆盖情况,由此给出下面的定义。

有向传感器节点方向可调感知模型如图 1 所示, $S(x,y)$ 表示节点的坐标; r 表示节点的感知半径; β 表示节点的感知方向,取值范围为 $0\leq\beta\leq 2\pi$; α 表示节点的感知角度,为相对于 x 正半轴的方向角。

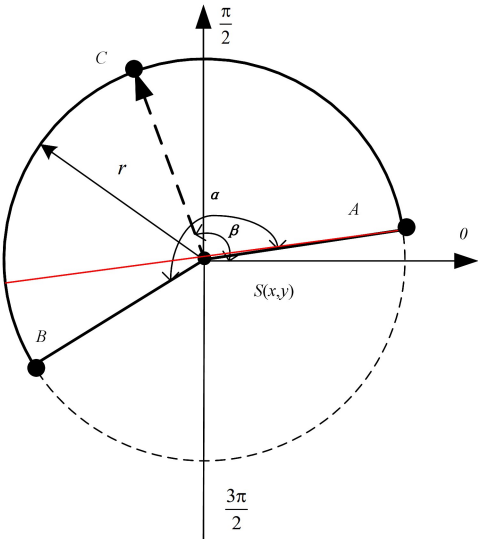


图 1 有向感知模型(电子版为彩色)

定义 1(节点近似圆) 以节点位置为圆心, r 为半径的覆

盖圆称为节点近似圆。如图 1 所示,以点 S 为圆心的虚线圆就是节点的近似圆。在节点近似圆内,实线扇形 ACB 为节点实际感知区域,虚线扇形为节点虚拟感知区域。

定义 2(有向强栅栏) 如果网络中存在满足以下要求的一个节点集合,则这个集合形成一条有向强栅栏。

- 1)集合只有一个起始节点和一个终止节点;
- 2)起始节点与监控区域左边界至少有一个交点,终止节点与监控区域右边界至少一个交点;
- 3)起始节点、终止节点只与一个节点相连;
- 4)除了这两个节点之外,其余的节点都与两个节点相连,一个是它的父节点,一个是它的中继节点(也称子节点)。

这里的节点相连是指,两个节点之间存在共同的实际感知区域。当两个节点近似圆相交或相切于实际感知区域时,两个节点相连。

定义 3(有向节点运动能耗) 有向节点运动能耗是指有向移动节点运动到目标位置的能耗和转动到目标方向的能耗,由移动能耗和转动能耗组成。节点的转动能耗如式(1)所示,运动能耗如式(2)所示,其中 J_r 和 J_m 分别表示单位转动能耗和单位移动能耗; β_t 表示目标方向, $d_{\min}$ 表示节点初始位置与目标位置的欧氏距离。

$$E_r = |\beta_t - \beta| * J_r \tag{1}$$

$$E = d_{\min} * J_m + E_r \tag{2}$$

定义 4(节点密度) 节点的数量与区域面积的比值为节点密度,用 ρ 表示。

本文研究的问题就是:在狭长感兴趣区域(Region Of Interest, ROI)中,随机部署的有向移动节点如何调度移动节点,以尽量少的运动能耗尽可能快地构建有向强栅栏覆盖。

3 理论分析

如果区域中,从左到右依次存在 3 个节点 A, B, C ,且点 B 与父节点 A 的连线与其虚拟圆的交点为 D ,节点 B 与其子节点 C 的连线与其虚拟圆的交点为 E ,如图 2 和图 3 所示。

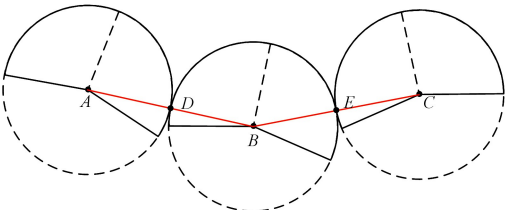


图 2 节点之间的距离等于 $2r$

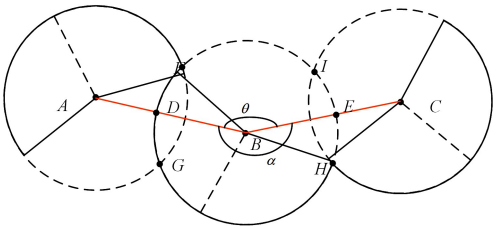


图 3 节点之间的距离小于 $2r$

图 2 中,实扇形为节点 A, B, C 的实际感知区域,虚线圆为它们的虚拟感知圆。且节点 A 和 B 的距离为 $2r$,节点 B 和 C 的距离也为 $2r$ 。节点 B 与节点 A 相切,也与节点 C 相切。图 3 中,节点 B 的虚拟感知圆与节点 A 和节点 C 的虚拟感知

圆分别相交,点 B 与父节点 A 的连线与其虚拟圆的交点为 D ,节点 B 与其子节点 C 的连线与其虚拟圆的交点为 E 。

定理 1 节点 B 只要调整感知方向,其实际感知区域就可以覆盖这交点 D 和 E 。

证明:这 2 个交点与圆心 B 形成一个夹角 θ ,无论这两个交点在近似圆的什么位置,夹角 θ 最大都为 π ,根据假设 1,感知角度 $\alpha > \pi$,所以 $\theta \leq \pi \leq \alpha$ 。又因为 2 个交点 D 和 E 到圆心 B 的距离都小于或等于半径 r 。根据扇形的几何特性,节点 B 经过旋转,可以使两个交点 D 和 E 在其感知区域内,即节点 B 同时覆盖点 D 和 E 。证毕

如图 2 所示,节点 B 与父节点 A 相切于点 D ,与子节点 C 相切于点 E , $\angle DBE < \pi < \alpha$ 。经过旋转,节点 B 的实际感知区域完全覆盖点 D 和 E 。在图 3 中, $\angle DBE < \pi < \alpha$,经过旋转,节点 B 的实际感知区域也可以完全覆盖点 D 和 E 。

定理 2 在一个节点集合内,任意两个相邻节点的距离小于或等于 $2r$,且这两个相邻节点近似圆的公共感知区域内至少存在一个点同时在两个节点的实际感知区域内,这样的一组节点集合形成连续有向强栅栏。

证明:当两个相邻节点的距离等于 $2r$ 时,如图 2 所示,节点 A 和 B 的近似圆感知公共点为 D ,节点 B 和 C 的近似圆感知公共点为 E 。由于点 D 既在节点 A 的实际感知区域内,也在节点 B 的实际感知区域内,则节点 A 和节点 B 的感知区域通过点 D 形成连续的感知区域,即形成强栅栏。同样的道理,由于点 E 既在节点 B 的实际感知区域内,也在节点 C 的实际感知区域内,则节点 B 和节点 C 也形成强栅栏。

当节点之间的距离小于 $2r$ 时,如图 3 所示,节点 A 和节点 B 的近似圆公共区域的端点为 F 和 G ,节点 B 和节点 C 的近似圆公共区域的端点为 I 和 H 。又因为 F 既在节点 A 的实际感知区域内,也在节点 B 的实际感知区域内,则节点 A 和节点 B 的感知区域通过点 F 形成连续的感知区域,构成栅栏。同样,因为点 H 既在节点 B 的实际感知区域内,也在节点 C 的实际感知区域内,则节点 B 和节点 C 的感知区域通过点 H 形成连续的感知区域,构成栅栏。证毕。

4 基于近似圆的集中式有向强栅栏构建算法 (HapC)

Wang 等^[18]考查区域内的所有静态节点组成的网络拓扑结构,采用顶点不重复的 K 条路径的图论算法找到形成栅栏的目标位置,然后移动节点和这些目标位置进行最佳匹配。参考这个算法,根据节点近似圆,将整个网络 N 划分为多个子群,找到 K 个最优子集合,也就是 K 条基本路径,为了进一步减少节点数量,对在基本路径中的每个群进行精简,得到 K 条精简路径。最后选择最优节点连通这些子群,形成 K 条栅栏。这个算法称为基于近似圆的有向强栅栏构建算法 (Heuristic barrier construction based on approximate circle, HapC),这是一个集中式的栅栏构建算法。

HapC 算法的伪代码如算法 1 所示。

算法 1

```
INPUT: N, K, Jr, Jm
OUTPUT: K-barriers, energy consumption, barrier nodes
Get every node's approximate circle.
```

```
The whole network is divided into subgroup;
Look for K basic barrier by heuristic searching;
For every subgroup in the basic barrier
    Reduce the staff nodes;
    For every isolation distance in this basic barrier
        Select the nodes with minimum energy;
        consumption to fill up the isolation distance;
    End for
    Connect basic barrier with left and right boundary;
    For each node of barrier;
        If there is no intersection with its neighbor node
            Rotate to ensure there is intersection at least;
        End if
    End for
End for
Sum the number of barrier nodes;
Calculate total and mean energy consumption;
```

HapC 算法具体步骤如下。

Step1 获取节点子集合

根据定理 1,相交或相切(也就是圆心之间的欧氏距离小于或等于 $2r$)的节点可以形成栅栏,这样可以找到彼此相交或相切节点子集合,2 个集合之间的距离为两个集合中任意两个节点之间的最短距离与 $2r$ 的比值。

Step2 找到 K 条基本栅栏

根据上面节点子集合,找到修补节点数最少的 K 条基本栅栏。

Step3 精简基本栅栏

对 K 条基本路径上的子集合进行精简。找到子集合在 x 轴的最大投影,保证这个投影不变的前提下,找到全连通且具有最少数量节点的子群,由此得到“精简路径”。如图 4 中的子集合有 5 个节点,在 x 轴的最大投影为 l ,经过精简,只有 4 个节点,节点 4 作为修补候选节点。

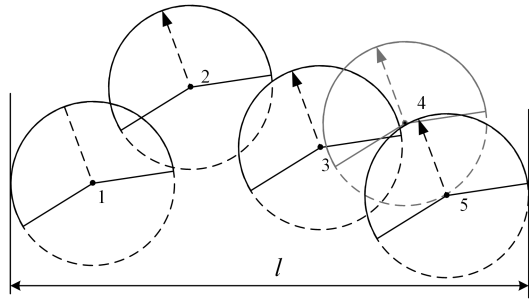


图 4 子集合精简

Step4 填补精简路径之间的隔离距离

通过匈牙利算法填补路径之间的隔离距离。

Step5 调整节点感知方向,形成 K 条栅栏

根据定理 1,调整 K 条栅栏上每个节点的感知方向,使其实际感知区域同时覆盖与父节点的交点和与子节点的交点,形成连续栅栏。如图 2 和图 3 所示,节点 B 与父节点 A 的连线与其虚拟圆的交点为 D ,节点 B 与其子节点 C 的连线与其虚拟圆的交点为 E 。调整节点 B 的感知方向,使其实际感知扇形区域覆盖交点 D 和 E ,完成栅栏构建。

5 基于近似圆的分布式栅栏构建算法 (INSDBC)

HapC 算法需要全局拓扑信息,算法复杂度高。NSDBC

算法中^[16],前一个节点选择能耗最少的节点运动到目标位置,从而构建有向强栅栏。

选取节点数偏差最小的集合,通过节点近似圆增大单个节点的栅栏贡献,基本过程同 NSDBC 方法一样,通过子节点的目标位置和目标方向确定节点能耗,选择能耗最小的节点构建栅栏。这个算法称为改进的 NSDBC(Improved NSDBC, INSDBC)算法,其具体过程参考文献[16]的 NSDBC 算法。它与 NSDBC 算法的主要不同有如下 4 点:

1)栅栏区域的选择

NSDBC 算法^[16]选取节点个数最多的区间段作为栅栏形成区域,没有考虑节点分布的均匀性。虽然某个区间的节点数量很多,但是分布比较集中,这个时候栅栏形成的能耗并不一定小。针对此问题,对整个区域网格化,网格边长为 $2r$ 。在投撒完传感器后,分别统计各个网格的节点个数,然后将纵坐标一致的正方形为一个集合,共形成 q 个集合,每个集合有正方形 $v(L-(2v-1)r \leq r \leq r)$ 个, q 个集合的纵坐标分别为 $y=r, 3r, \dots, (2q-1)r$, 且 $W-(2q-1)r \leq r$ 。针对每个集合,求出正方形内的平均节点数,求出每个正方形的节点数偏差。 v 个正方形的节点数偏差之和就是这个集合的节点数偏差。

2)子节点的目标位置

假设父节点位置用 (x_a, y_a) 表示,如果有节点在父节点扇形区域内部,则选出扇形区域内横坐标最大的节点(即最靠右的节点)作为子节点,不进行移动,只将其按照文献[16]的式(1)调整方向角,并计算运动能耗。

如果父节点扇形区域内没有节点,为了使节点的栅栏贡献达到最大 $2r$,子节点的目标位置为 (x_a+2r, y_a) 。如图 5 所示,节点为父节点 A,点 B 为子节点的目标位置。

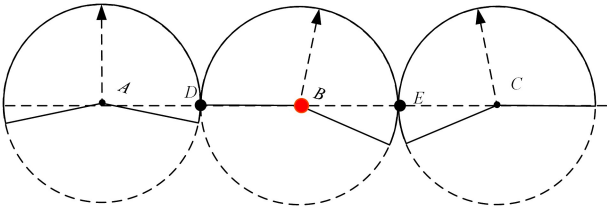


图 5 节点目标位置

3)子节点的目标方向

由于子节点目标位置为 (x_a+2r, y_a) ,父节点和子节点的距离为 $2r$,它们的近似圆相切,子节点与自己中继节点的近似圆也相切,2 个切点与圆心形成的夹角 $\theta=\pi$ 。根据定理 1 和定理 2,子节点的实际感知区域要覆盖这 2 个切点才能形成栅栏。如图 6 所示,节点 B 的虚拟感知圆与父节点 A 相切于点 D,与子节点 C 相切于点 E。为了用最少能耗覆盖这两个切点,子节点的目标方向 β_i 由式(3)计算。例如,图 6 中,父节点 A 的目标感知方向 β 在 $[\pi-\alpha/2, \alpha/2]$ 之间,子节点 B 的目标感知方向为 $\pi-\alpha/2$,子节点 B 的中继节点 C 的目标感知方向为 $\alpha/2$ 。

$$\beta_i = \begin{cases} \beta, & \text{if } \pi-\alpha/2 \leq \beta \leq \alpha/2 \\ \pi-\alpha/2, & \text{if } 0 \leq \beta \leq \pi-\alpha/2 \\ \alpha/2, & \text{if } \alpha/2 \leq \beta \leq \pi \\ \beta, & \text{if } 2\pi-\alpha/2 \leq \beta \leq \pi+\alpha/2 \\ 2\pi-\alpha/2, & \text{if } \pi \leq \beta \leq 2\pi-\alpha/2 \\ \pi+\alpha/2, & \text{if } \pi+\alpha/2 \leq \beta \leq 2\pi \end{cases} \quad (3)$$

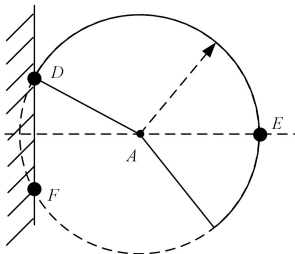


图 6 首节点的目标方向

4)首节点的目标方向

选出预选区域中横坐标最小的节点,即区域内最靠左的节点。若其横坐标小于半径 r ,找到首节点虚拟圆与左边界 $x=0$ 的交点 D 和 F,找到首节点横坐标加上感知半径 r 后的位置 E,用最少的转动能耗同时覆盖点 D 和 E,或者同时覆盖点 E 和 F。该节点调度完毕后作为该条栅栏的第 1 个节点。

6 仿真结果

本文运用 Matlab7.0 和 Python2.7 对本文算法进行仿真,每组实验数据采用重复 50 次独立实验取平均值的方式获得。如果没有特别指明,实验的默认参数如表 1 所列。我们选取 NSDBC 算法^[16]与本文中的算法进行比较。

表 1 实验参数

参数	取值范围
ROI/m ²	400×300
K	1
R	10
α	$8\pi/5$
ρ	0.0025
$J_m/(J/m)$	3.6
$J_r/(J/\pi)$	1.8

6.1 栅栏比较

3 种算法形成的栅栏如图 7 和表 2 所示。

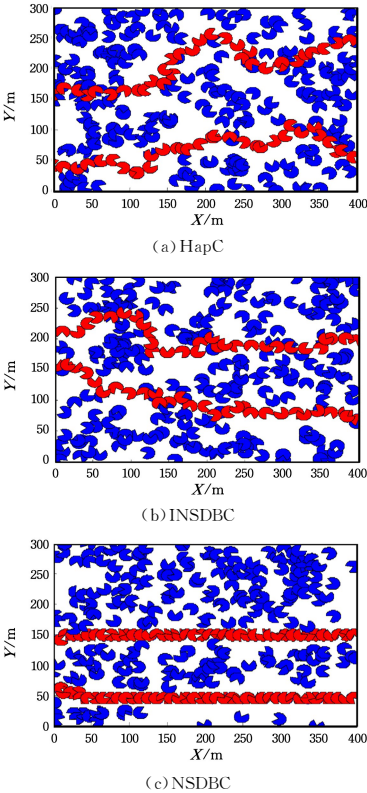


图 7

表 2 仿真结果

算法	节点数	
	第 1 条栅栏	第 2 条栅栏
INSDBC	27	28
HapC	36	42
NSDBC	40	42

由于 HapC 算法通过近似圆扩大了节点栅栏贡献,而 INSDBC 算法通过近似圆使大部分节点(除了起始节点和终止节点)的栅栏贡献为 $2r$,在 NSDBC 算法中,节点的栅栏贡献最大仅为 r ,所以组建栅栏的总节点数量按照 HapC 算法、NSDBC 算法、INSDBC 算法依次减少。

6.2 节点密度的影响

本文采用 0.002 作为起始节点密度进行仿真比较,其余实验参数均与表 1 中的默认参数一致。仿真结果如图 8—图 11 所示。

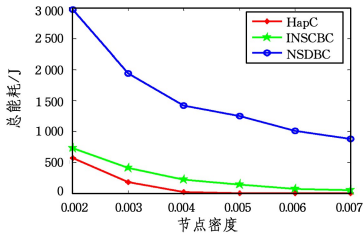


图 8 节点密度与总能耗曲线

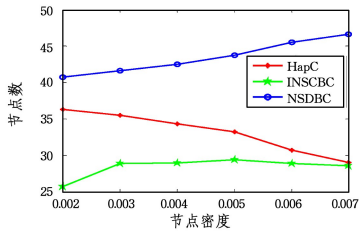


图 9 节点密度与节点数曲线

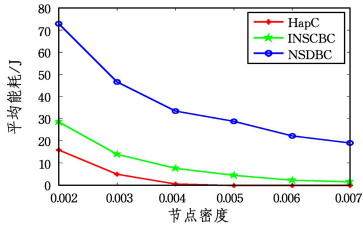


图 10 节点密度与平均能耗曲线

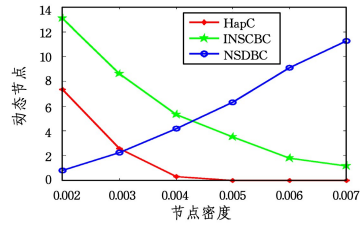


图 11 节点密度曲线动态节点数曲线

仿真结果表明,随着密度的增加,组建栅栏的可选节点数增多,可选用具有更低能耗的节点组建栅栏。因此随着节点密度的增加,3 种算法所对应的总能耗均呈显著性下降。由于根据节点初始位置构建子栅栏群落,再选用少量节点运动到目标位置连接这些子栅栏,构建栅栏,所以 HapC 算法的总能耗最小,动态节点(运动节点)最少。

由于节点近似圆扩大了单个节点的栅栏贡献,目标位置和目标方向又保证单个节点的栅栏贡献为最大 $2r$,INSDBC 算法形成栅栏所需的总节点数最少。

由于 HapC 算法精简了栅栏群落,仅采用少量节点连接子栅栏形成栅栏,所以 HapC 算法的平均能耗最少。

6.3 栅栏数的影响

栅栏数 K 的影响如图 12—图 15 所示。

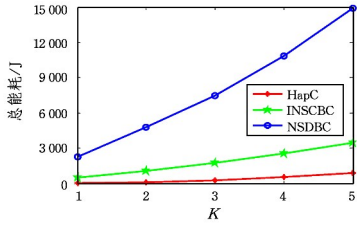


图 12 栅栏数与总能耗曲线

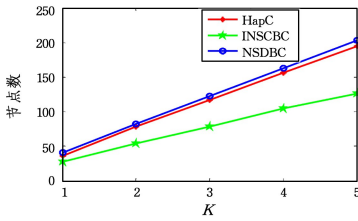


图 13 栅栏条数与节点数曲线

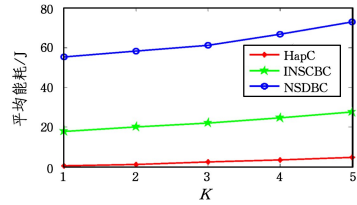


图 14 栅栏条数与平均能耗曲线

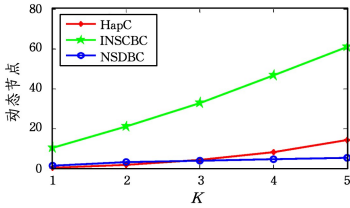


图 15 栅栏条数与动态节点数曲线

仿真结果表明,随着栅栏数 K 值的增大,构建栅栏需求的节点数增多,所以 3 种算法的节点总能耗、构建栅栏的总节点数、动态节点数和平均能耗都随 K 值的增大而增多。

INSDBC 算法中单个节点的最大栅栏贡献为 $2r$,且考虑了节点分布的均匀性。而 NSDBC 算法只选择节点数最多的子区域构建栅栏,且子节点的最远目标位置也仅是 $(x_a + r, y_a)$,在 $(x_a + 2r, y_a)$ (INSDBC 算法中子节点的目标位置)的左边。所以 INSDBC 算法的总能耗低于 NSDBC 算法,其节点数量小于 NSDBC 算法。尽管 HapC 算法中的子栅栏节点集合的节点之间的距离可能是 $2r$,但栅栏贡献要小于 $2r$ (如图 2 所示),所以 HapC 算法的节点数量也要大于 INSDBC 算法。

结束语 本文主要研究感知角度大于 π 时有向节点近似圆模型,并在此基础上,高效构建有向强栅栏。先根据全部节点的信息,通过节点近似圆找到子栅栏,再选择最优节点连通

这些子群,形成栅栏,这是集中式的方法。在分布式方法中,根据节点近似圆之间的几何关系,使每个节点具有最大栅栏贡献,从左到右依次选择能耗最小的节点分布式构建栅栏。仿真结果证明,基于近似圆的栅栏构建方法能够用较低能耗和较少节点构建有向栅栏。

概率感知模型是更符合实际的感知模型,如何节能高效地构建概率栅栏是下一步要研究的内容。

参 考 文 献

[1] TAO D,T WU. A survey on barrier coverage problem in directional sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal,2015,15(2): 876-885.

[2] 范兴刚,刘涛,胡凤丹,等. 一种延长目标覆盖网络寿命的群智能算法[J]. 计算机科学,2018,45(12):93-98.

[3] KUMAR S,LAI T H,ARORA A. Barrier coverage with wireless Sensors[C]//Proc. of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2005:284-298.

[4] 罗卿,林亚平,王雷,等. 传感器网络中基于数据融合的栅栏覆盖控制研究[J]. 电子与信息学报,2012,34(4):825-831.

[5] 班冬松,温俊,蒋杰,等. 移动无线传感器网络 K-栅栏覆盖的构建算法[J]. 软件学报,2011,22(9):2089-2103.

[6] TIAN J,ZHANG W S,WANG G L,et al. 2D k-barrier duty-cycle scheduling for intruder detection in wireless sensor networks [J]. Computer Communications,2014,4(3):31-42.

[7] 王超,范兴刚. 一种高效强 K—栅栏覆盖构建算法[J]. 传感技术学报,2015,28(2):227-233.

[8] MA H D,YANG M,LI D,et al. Minimum camera barrier coverage in wireless camera sensor networks[C]//Proc. IEEE IN-

FOCOM,Orlando,FL,USA,2012:217-225.

[9] TAO D,TANG S,ZHANG H,et al. Strong barrier coverage in directional sensor networks[C]// Computer Communications, 2012,35(8):895-905.

[10] ZHANG L,TANG J,ZHANG W. Strong barrier coverage with directional sensors[C]//Proc. IEEE GlobeCom. Honolulu,HI, USA,2009:1-6.

[11] SSU K F,WANG W T,W F K,et al. K-barrier coverage with a directional sensing model[J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems,2009,2(1):75-93.

[12] CHENG C F, TSAI K T. distributed barrier coverage in wireless visual sensor networks with β -qom[J]. IEEE Sensors Journal, 2012,12(6):1726-1735.

[13] WANG Z B,LIAO J D,CAO Q,et al. Achieving k-barrier Coverage in Hybrid Directional Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2014,13(7):1443-1455.

[14] CHEN J,WANG B,LIU W,et al. Rotating directional sensors to mend barrier gaps in a line-based deployed directional sensor network[J]. IEEE Systems Journal,2017,11(2):1027-1038.

[15] WU Y,CARDEI M. Distributed algorithms for barrier coverage via sensor rotation in wireless sensor networks[J]. Journal of Combinatorial Optimization,2018,36:230-251.

[16] 任勇默,范兴刚. 一种有向传感器网络栅栏覆盖增强算法[J]. 传感技术学报,2015,28(7):1051-1057.

[17] GUVENSAN A,YAVUZ G. Hybrid movement strategy in self-orienting directional sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2013,11(3):1075-1090.

[18] 王万良. 人工智能及其应用(第三版)[M]. 北京:高等教育出版社,2016.

(上接第 380 页)

[7] GUO R,ZHANG Y,LIN Q,et al. A Channelization-Based DOA Estimation Method for Wideband Signals [J]. Sensors, 2016, 16(7):1031-1049.

[8] HUAWEI L,BAOQING L,XIAOBING Y,et al. A Robust Real Time Direction-of-Arrival Estimation Method for Sequential Movement Events of Vehicles[J]. Sensors, 2018, 18(4): 992-1008.

[9] WAX M,SHAN T J,KAILATH T. Spatio-Temporal Spectral Analysis By Eigenstructure Methods[J]. IEEE Transactions on Acoustics,Speech,and Signal Processing,1984,32(4):817-827.

[10] 官兵,徐以涛,李佳. 改进的非相干信号子空间宽带测向算法 [J]. 无线电工程,2011,41(3):11-13.

[11] 郭亚萍,陈建春,彭金龙,等. 基于 Root-ISM 算法的宽带非相干信号 DOA 估计[J]. 电子科技,2015,28(6):38.

[12] SCHMIDT R,SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameters estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation,1986,34(3):276-280.

[13] WU M J,MENG T Z,HUANG,et al. DOA estimation of partially polarized signals using conjugate MUSIC[C]//IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments. IEEE,2018.

[14] JIANG G,MAO X,LIU Y. Reducing errors for root-MUSIC-based methods in uniform circular arrays[J]. IET Signal Processing,2018,12(1):31-36.

[15] LIANG H,CUI C. Low-complexity ESPRIT-based DOA estimation for MIMO radar with L-shaped array [J]. International Journal of Electronics Letters,2017,6:1-13.

[16] LI J,JIANG D,ZHANG X. DOA Estimation Based on Combined Unitary ESPRIT for Coprime MIMO Radar [J]. IEEE Communications Letters,2017,21(1):96-99.

[17] DKALGAN A,BAHL R,KUMAR A. Source Ranging and Direction of Arrival Estimation using accelerometer based implementation of prototype Acoustic Vector Sensor[C]//Underwater Technology. Chennai:IEEE,2015.

[18] DAS P,BHATTACHARJEE A,PATHAK S. Performance analysis of TLS-Esprit and QR TLS- Esprit algorithm for Direction of Arrival estimation [C]// International Conference on Communications & Signal Processing. IEEE,2015.

[19] 周小军,谭薇,冯大政,等. 基于解相干的改进 MUSIC 算法 DOA 估计[J]. 无线电工程,2014(12):18-21.

[20] KUNDU D. Estimating direction of arrival of signal;some asymptotic results[J]. Sankhyā: The Indian Journal of Statistics, Series A (1961-2002),1999,61(1):120-138.