计算机科学
COMPUTER SCIENCE

一种基于有向感知区域调整的强栅栏构建算法

王方红，范兴刚，杨静静，周杰，王德恩

引用本文

王方红，范兴刚，杨静静，周杰，王德恩. 一种基于有向感知区域调整的强栅栏构建算法[J]. 计算机科学, 2022, 49(6A): 612-618.

WANG Fang-hong, FAN Xing-gang, YANG Jing-jing, ZHOU Jie, WANG De-en. Strong Barrier Construction Algorithm Based on Adjustment of Directional Sensing Area[J]. Computer Science, 2022, 49(6A): 612-618.

相似文章推荐（请使用火狐或 IE 浏览器查看文章）

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

基于节点近似圆的有向强栅栏构建算法

Directional Strong Barrier Constructing Scheme Based on Node Approximate Circle

计算机科学, 2019, 46(11A): 393-398.

一种延长目标覆盖网络寿命的群智能算法

Swarm Intelligence Algorithm for Prolonging Target Coverage Network Lifetime

计算机科学, 2018, 45(12): 86-91. https://doi.org/10.11896 / j.issn.1002-137X.2018.12.013

高斯白噪声信道传感网络能量有效与可靠性研究

Energy-efficient and Reliability under White Gaussian Noise Channels of WSNs

计算机科学, 2015, 42(10): 81-87.

一种分布式无线传感器网络能量均衡路由算法

Distributed Energy Balancing Routing Algorithm in Wireless Sensor Networks

计算机科学, 2010, 37(1): 122-125.

一种移动自组网混合式功率路由协议

计算机科学, 2006, 33(5): 43-45.

计算机科学 COMPUTER SCIENCE
http://www.jsjkx.com
DOI:10.11896/jsjkx.210300291

一种基于有向感知区域调整的强栅栏构建算法

王方红[1]　范兴刚[1]　杨静静[2]　周　杰[1]　王德恩[1]
1 浙江工业大学之江学院　杭州 310023
2 浙江工业大学计算机科学与技术学院　杭州 310023
(wfh@zjc.zjut.edu.cn)

摘　要　K-栅栏覆盖是有向传感器网络的研究热点之一。传统栅栏构建算法消需要耗大量节点能量,降低了网络寿命。文中创新性地利用有向节点感知区域的可调特性,不消耗节点能量,可高效构建栅栏。首先,创建有向可调感知模型,揭示感知区域的调整规律,使相距较远的两个节点不靠移动形成连续感知区域。接着,提出一种基于感知区域可调特性的有向强栅栏构建方法,优化调整感知区域,分布式选择最优节点,构建有向强栅栏。仿真结果证明,相比依赖于节点运动的传统栅栏构建算法,所提栅栏构建方法能够用更少的资源构建栅栏,有效延长网络寿命,具有重要的理论与实际意义。

关键词:有向栅栏覆盖;感知区域调整;调节环;网络寿命
中图法分类号　TP301.6

Strong Barrier Construction Algorithm Based on Adjustment of Directional Sensing Area

WANG Fang-hong[1],FAN Xing-gang[1],YANG Jing-jing[2],ZHOU Jie[1] and WANG De-en[1]
1 Zhijiang College of Zhejiang University of Technology,Hangzhou 310023,China
2 College of Computer Science and Technology,Zhejiang University of Technology,Hangzhou 310023,China

Abstract　K-barrier coverage is one of the hotspots in directional sensor networks. Traditional barrier construction algorithm consumes a lot of node energy and reduces the network lifetime. This paper innovatively exploits the adjustable characteristics of the direcitonal sensing area to efficiently construct directional barrier without consuming node energy. It firstly creates the adjustment of directional sensing area to reveal the regulation of sensing region adjustment. So that two nodes far from each other form continuous sensing regions without locomotivity. Then,it proposes a barrier construction scheme based on the adjustment of sensing area,optimizes and adjusts the directional sensing area,and selects optimal node to form barrier in distributed manner. Simulation results show that,compared with other methods using actuating capability,the proposed method could form barrier with less network resources,and achieve longer service lifetime. This research has important theoretical and practical significance.

Keywords　Directional barrier coverage,Adjustment of sensing area,Adjusting ring,Network lifetime

1　引言

随着网络安全的需求日益增加,入侵检测和边界检测逐渐成为有向传感器网络的一个研究热点,吸引了大量关注[1-6]。这类应用要求有向传感器网络中至少存在一个节点集合,它们的感知区域依次相连,并且可以覆盖两边边界,形成栅栏覆盖。

有向传感器节点的特性决定了栅栏覆盖的构建策略。通过调整位置或感知方向可以使彼此不相连的感知区域相连形成栅栏。现有的栅栏构建方法大都是基于感知位置和感知方向的变化,使其形成连续的感知区域,进而形成栅栏覆盖。Wang 等先采用权重栅栏图(WBG)选择静态节点组成 K 条候选栅栏,再通过匈牙利算法选择节点移动到最佳目标位置,得到 K 条栅栏[7-8]。Zhang 等调整节点感知方向构建栅栏[9-11]。在有向节点线性部署下,Chen 等和 Wu 等通过调整节点感知方向修补栅栏空隙,形成栅栏[12-13]。Fan 等研究了栅栏构建算法,利用节点的移动和转动能力构建栅栏[14-16],从左到右,依次找到目标位置,由最新加入的栅栏节点选择最优的移动节点运动到目标位置,调整到目标感知方向,形成栅栏。Che 等提出一种基于目标圆的分布式有向强栅栏构建方法(DBCTC)[17],以节点感知区域内横坐标最大的点为圆心构建目标圆,最新加入的栅栏节点根据其目标圆选择后续节点的最佳目标位置,并从附近移动节点中选择最优节点构建有向强栅栏。以上算法利用节点的运动能力(转动和移动)可以有效构建栅栏,但需要较大的能耗。

监控区域危险不可达,节点电池能量有限,且无法更换。如何节省能量、提高能量效率始终是要重点关注的问题。实际上,为了对远方的入侵者进行监控,节点可以在感知区域面积不变的前提下,扩大自己的感知半径[1,18],减小感知角度。如图 1 所示,为了对入侵者 1 进行监控,节点 C 把自己的感知区域从虚拟扇形调整为实线扇形,从而实现对入侵者 1 的监控。

基金项目:浙江省自然科学基金(LY20F020024)
This work was supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province,China(LY20F020024).
通信作者:范兴刚(xgfan@zjut.edu.cn)

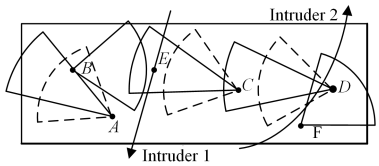


图 1 有向感知区域调整实例

Fig. 1 Example of directed sensing area adjustment

感知区域调整能力可以有效提高节点覆盖能力。以前的研究工作大都是利用节点的运动能力（转动和移动）构建栅栏[9-14]。通过节点区域调整，不需要移动节点位置，也可以节能高效地构建栅栏。如图 1 中，初始部署节点的感知区域都是半径较小、角度较大的扇形，节点集合 A,B,C,D,F 的感知区域不能互连，无法形成栅栏，虽然可以监测到入侵者 2，但无法监测到入侵者 1。通过调整节点 A,C 和 D 的感知区域，增大感知半径，减少感知角度，不需要移动和转动，节点集合 A,B,C,D,F 感知区域互连，形成栅栏，不仅入侵者 1 和 2 都可以被有效监测到，任意穿过区域的入侵者都可以被检测到。到目前为止，还鲜有关于节点区域调整能力的研究。

本文研究基于节点感知区域调整的栅栏构建算法，主要贡献如下：

(1)建立了一种有向节点可调感知模型，揭示节点感知角度和感知半径的关系。利用节点的调焦能力，摒弃节点移动，形成连续感知区域。

(2)提出了一种基于调节环的有向强栅栏构建算法(Directional Barrier Construction Based on Adjusting Ring, Dbarar)，创建栅栏节点调节环；根据非栅栏节点与调节环的位置关系，确定其感知区域调整策略；根据能效比，分布式选择最优节点，构建有向强栅栏。

本文第 1 节描述网络模型；第 2 节详细介绍 Dbarar 方法；第 3 节通过仿真实验对所提算法进行性能评估；最后总结全文并展望未来。

2 相关模型及定义

为了简化有向栅栏问题，假设如下：

(1)传感器监视范围内的信号强度相同，且能在该范围内以 100%的可能性监测到事件。

(2)传感器可以自动调整感知半径和感知角度，在覆盖能力增强过程中，节点仅能调整一次感知区域，而且这种调整不消耗能量。

(3)所有传感器的转动能耗和移动功耗均相同，参考文献[19]，传感器每转动 180°耗能为 1.8 J，每移动 1 m 耗能为 3.6 J(后面的对比算法要用到移动能耗)。

(4)栅栏构建方向是从左到右。

定义 1(有向可调感知模型) 可以采取六元组$\langle S,r_1,r_2,\alpha,\Theta_1,\Theta_2\rangle$表示，如图 2 所示。其中 $S=(x,y)$表示节点的位置坐标，r_1,r_2 表示节点的最大、最小感知半径，α 表示节点的工作方向，为相对于 x 正半轴的方向角，取值范围为 $0\leqslant\alpha\leqslant2\pi$，$\Theta_1,\Theta_2$ 表示与 r_1,r_2 对应的感知角度。则当 $\alpha=2\pi$ 时，此时有向感知模型则变成了全向感知模型，是有向感知模型的一个特例。

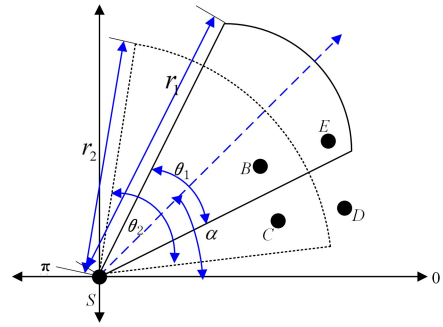


图 2 有向变焦感知模型

Fig. 2 Directional zoom perception model

定义 1 表明节点感知区域调整方法是，在感知区域面积不变的前提下，感知半径在$[r_1,r_2]$之间变化，相应感知角度在$[\Theta_1,\Theta_2]$之间变化，如图 1 所示，感知区域在角度大、感知半径小的虚线扇形和角度小、半径大的实线扇形之间变化。在变化过程中，节点感知面积不变，如式(1)所示。

$$\Theta_1 r_1^2=\Theta_2 r_2^2=\theta r^2 \tag{1}$$

定义 2(有向强栅栏) 如果监控区域中存在一个从左到右的传感器节点集合满足如下条件：

(1)有且仅有一个初始节点和终止节点，起始节点的感知区域与监控区域左边界至少有一个交点，终止节点的感知区域与监控区域右边界至少一个交点；

(2)除了初始节点和终止节点，每个节点的感知区域都和两个节点的感知区域相连，左边的邻居叫父节点，右边的邻居叫子节点；

(3)起始节点感知区域只与其子节点感知区域相连，终止节点感知区域只与其父节点感知区域相连；

(4)任意相邻两节点之间都存在一个连续感知区域，这样的节点集合形成有向强栅栏。

定义 3(转动圆) 以节点感知区域内横坐标最大的点为圆心，以感知半径为半径的圆就是节点的转动圆。

定义 4(调节环) 在一个节点转动圆外，存在一个环。环内节点可以通过调整感知区域来改变感知方向，不需要移动就可以与这个节点形成强栅栏。这个环称为该节点的调节环。

定义 5(栅栏增益) 栅栏添加节点以后，栅栏长度在水平方向增加的长度被称为这个节点的栅栏增益。

定义 6(能效比) 能耗和栅栏增益的比值(参考文献[14])。

定义 7(网络寿命) 如果有多条栅栏，每条栅栏的寿命累加起来就是网络寿命。假设每个节点的初始能量为 E_0，整个网络共有 K 条栅栏，形成第 j 条栅栏的最大能耗 $E^j_{\max}$。则网络寿命用式(2)表示。

$$L_s=\frac{\sum_{j=1}^{K}(E_0-E^j_{\max})}{E_0} \tag{2}$$

我们研究的问题就是：在狭长区域中，随机部署初始感知半径为 r_2 的 N 个有向节点，如何利用感知区域的调节能力来分类优化调度节点，节能高效地构建有向强栅栏，延长网络生命周期。

3 理论分析

为了便于分析，有关参数说明如表 1 所列。

表 1 相关参数

Table 1 Relevant parameters

参数	意义
N	传感器节点集合
d	节点到点的距离
(x_{an}, y_{an})	父节点的坐标
$(x_{\max}, y)(anc)$	父节点感知区域内横坐标最大的点
θ_{an}	父节点感知角度
(x_t, y_t)	调节环的圆心
l	节点栅栏增益
a_t	目标感知方向
β	节点与调节环圆心连线与 x 轴的夹角
$J_2/(\mathrm{J}/\pi)$	传感器节点转动角度能耗
E	节点的总运动能耗

3.1 节点感知区域调整能力分析

根据定义 3，父节点转动圆内节点与这个转动圆圆心的距离小于节点感知半径，改变这个节点的感知方向，就能使这个节点与父节点之间存在连续感知区域，形成强栅栏。

如图 3 所示，父节点 S 的感知区域内，横坐标最大的点为 D，以点 D 为圆心、感知半径为半径的圆 D 就是节点 S 的转动圆。在转动圆上的节点 C，只要调整感知方向，使其感知区域调整到蓝色虚线扇形就可以覆盖圆心 D，节点 S 和 C 之间形成连续的感知区域，形成子栅栏。而目标圆 D 外的节点 B 与点 D 的距离大于感知半径，即使旋转到蓝色虚线扇形，仍存在栅栏空隙 $\overline{DE}$，无法形成连续感知区域，传统算法就要求节点 B 向目标圆移动。这需要一定的移动能耗才能形成栅栏。

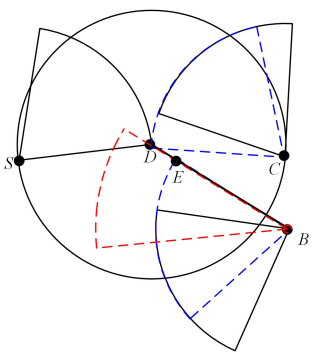


图 3 目标圆(电子版为彩图)

Fig. 3 Target circle

为了减少移动能耗，节点 B 就需要调整感知区域。根据定义 1，有向可调节点在不消耗能量的情况下，增大感知半径。图 3 中的节点 B 通过感知区域调整和转动感知方向，感知区域从蓝色虚线扇形变为红色虚扇形，就可以摒弃移动，修复栅栏空隙 $\overline{DE}$，与父节点 S 形成连续感知区域，形成栅栏。这说明有向感知区域的调整能力可以使一些节点不需要移动就能形成连续感知区域，形成栅栏。极限情况下，感知区域的调整特性可以把节点栅栏增益从 r_2 增大到 r_1。这表明节点变焦特性不仅可降低栅栏构建能耗，还可增加节点栅栏增益，增大能效比，提高效率。

3.2 调节环计算

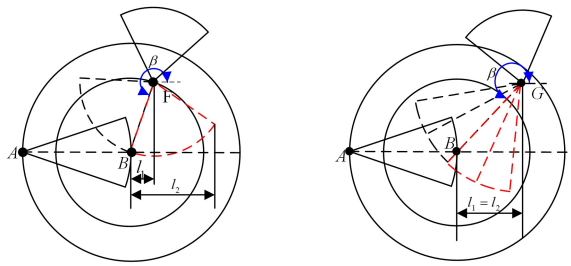
假设父节点的坐标为 (x_{an}, y_{an})，感知方向为 a_{an}，感知角度为 θ_{an}，定理 1 确定父节点的调节环。

定理 1 父节点调节环的内边界是以其感知区域内横坐标最大的点为圆心、以 r_2 为半径的一个圆，外边界是以 r_1 为半径的同心圆。

证明：任意一个小圆($r=r_2$)外，大圆($r=r_1$)内的节点到圆心的距离 $r_2 \leqslant d \leqslant r_1$，调整感知区域，使其感知半径 $r=r_1$，再调整其感知方向，就可以覆盖调节圆圆心，与父节点之间存在连续感知区域，形成栅栏。证毕。

如图 4 所示，在父节点 A 感知区域内，点 B 的横坐标最大。$r=r_2$ 的小圆和 $r=r_1$ 的大圆之间就是父节点 A 的调节环。在图 4(a)内，在小圆内的节点到圆心的距离 $d \leqslant r_2$，不需要调整感知区域，只要调整感知方向就可以与父节点 A 形成栅栏。如节点 F 只要调整到虚线的位置，就可以形成栅栏。

同样的道理，在图 4(b)中，在小圆外大圆内的节点到圆心的距离 $r_2 \leqslant d \leqslant r_1$，只要调整感知区域，使其感知半径为 $r=r_1$，再调整感知方向就可以与父节点 A 形成栅栏。如节点 G 只要调整到虚线的位置，就可以形成栅栏。



(a)第二类节点 (b)第三类节点

图 4 调节环(电子版为彩图)

Fig. 4 Adjusting ring

假设栅栏从左到右依次选择节点构建栅栏，根据父节点的工作方向，调节环有 2 个不同的圆心。

(1)如果父节点的感知方向 $(\pi+\theta_{an})/2 \leqslant a_{an} \leqslant (3\pi-\theta_{an})/2$，如图 5 中的节点 A，D 所示，则调节环圆心为父节点位置 (x_{an}, y_{an})。

(2)如果父节点的感知方向 $0 \leqslant a_{an} < (\pi+\theta_{an})/2$，或者 $(3\pi-\theta_{an})/2 < a_{an} \leqslant 2\pi$，如图 5 中的节点 C 所示，则调节环圆心在父节点感知区域内横坐标最大的点，其坐标为 $(x_{\max}, y)(anc)$。父节点调节环圆心如式(3)所示：

$$(x_t, y_t) = \begin{cases} (x_{an}, y_{an}), & \text{if } \dfrac{\pi+\theta_{an}}{2} \leqslant \alpha_{an} \leqslant \dfrac{3\pi-\theta_{an}}{2} \\ (x_{\max}, y)(anc), & \text{others} \end{cases} \tag{3}$$

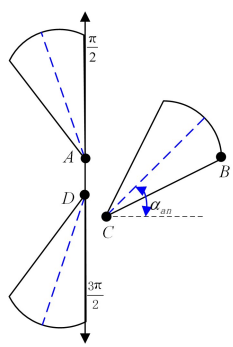


图 5 栅栏节点位置

Fig. 5 Fence node location

调节环的内边界圆半径为 r_2，外边界圆为半径为 r_1，调节环的面积为 $\pi(r_1^2-r_2^2)$。

3.3 邻居节点分类

父节点周围的节点被调节环分成以下 3 种类型。

(1)第一类节点，位于父节点感知区域内。这类节点不需要移动，也不需要调整感知区域，只需要转动感知方向就可以与父节点形成连续的感知区域。

为了减少能量消耗，第一类节点的目标感知方向如式(4)所示：

$$\alpha_t(I)=\begin{cases}\alpha_0, & 0\leqslant\alpha_0\leqslant\theta/2\\ \alpha_0, & 2\pi-\theta/2\leqslant\alpha_0\leqslant2\pi\\ \theta/2, & \theta/2\leqslant\alpha_0\leqslant\pi\\ 2\pi-\theta/2, & \pi\leqslant\alpha_0\leqslant2\pi-\theta/2\end{cases}\tag{4}$$

其中，α_0 为节点初始感知方向，α_t 为节点目标感知方向，θ 为节点感知角度。式(4)表明，若 $0\leqslant\alpha_0\leqslant\theta/2$，或者 $2\pi-\theta/2\leqslant\alpha_0\leqslant2\pi$，不进行转动；若 $\theta/2\leqslant\alpha_0\leqslant\pi$，转至 $\theta/2$ 处；若 $\pi<\alpha_0<2\pi-\theta/2$，则转至 $2\pi-\theta/2$ 处。

(2)第二类节点，位于父节点感知区域外，调节环内边界里面。这类节点也不需要调整感知区域，只需要调整节点感知方向即可。

(3)第三类节点，位于调节环内。这类节点既需要调整感知方向，也需要调整感知区域。

根据节点类型不同，调整节点感知区域的方法如式(5)和式(6)所示。即第一、二类节点不需要变焦，节点感知半径和感知角度仍为原初始感知半径、感知角度。第三类节点需要变焦，感知角度从 Θ_2 变为 Θ_1，感知半径从 r_2 变为 r_1。

$$\theta=\begin{cases}\Theta_2, & \text{types I and II}\\ \Theta_1, & \text{type III}\end{cases}\tag{5}$$

$$r=\begin{cases}r_2, & \text{types I and II}\\ r_1, & \text{type III}\end{cases}\tag{6}$$

为了确定第二、三类节点的感知方向，假设节点位置与调节环圆心的连线与横轴的夹角为 β，则这两类节点的感知方向如式(7)所示。假设感知方向调整为 $\beta-\theta/2$，其可能的增益为 l_1，感知方向调整为 $\beta+\theta/2$，其可能的增益为 l_2，则具有较大增益的目标方向为节点实际目标方向。如图 4(a)所示，第二类节点 F 不需要变焦，感知半径为 r_2，感知角度为 Θ_2，调整到黑色虚线扇形的增益为 l_1，调整到红色虚线扇形的增益为 l_2，且 $l_2>l_1$，则节点 F 的目标感知方向为红色虚线扇形的位置，即 $\alpha_t=\beta+\theta/2$。图 4(b)中，为了和父节点形成连续的感知区域，第三类节点 G 需要变焦，调整后的感知半径为 r_1，感知角度为 Θ_1，调整到黑色虚线扇形的增益为 l_1，调整到红色虚线扇形的增益为 l_2，且 $l_2=l_1$。这时为了使转动能耗最小，选择转动角度最小的 $\beta-\theta/2$ 为目标感知方向，且逆时针转动节点。

$$\alpha_t(\text{II},\text{III})=\begin{cases}\beta-\theta/2, & l_1>l_2\\ \beta-\theta/2, & l_1=l_2 \text{ and } |\beta-\theta/2-\alpha|<\pi\\ \beta+\theta/2, & \text{other}\end{cases}\tag{7}$$

根据栅栏定义 5，节点增益计算方法如式(8)所示。

$$l=x_{\max}-x_t\tag{8}$$

其中，$x_{\max}$ 表示增加该节点后，栅栏最右点的横坐标。在增加该节点之前，栅栏最右点就是调节环圆心。

根据定义 6，进一步计算节点能效比，栅栏增益与节点转动能耗的比值就是能效比。

此算法选择能效比最高的节点构建栅栏。

4 基于感知区域调整的强栅栏构建算法

Dbarar 算法的基本思想如下：先确定覆盖左边界的第一个节点，以此节点为第一个父节点，根据调节环确定周围节点的感知区域、目标方向、转动能耗、栅栏增益、能效比，选择具有最大能效比的节点为自己的中继节点，延长栅栏。按照从左到右的顺序，依次确定栅栏节点，直到当前栅栏节点覆盖右边界。

4.1 算法具体过程

参数的定义如表 1 所列。Dbarar 算法伪代码如图 6 所示，具体步骤如下。

```
Input:nodes N,K
Output:K barriers
For each barrier
    ascertaining the first barrier member B1;
     If r2<x(B1)
       r=r1
    End
    rotating its sense direction;
    Anc=B1// the first barrier node is selected
    While Lr is not covered by Anc //forming barrier until //the rightest
    boundary is covered by newly barrier node.
    ascertaining the center of Rar by Eq (3);
    determining the candidate nodes'type; // the location
    //relationship of node and barrier is determined
    computing the sensing range by Eqs (5) and (6);
    ascetaining target direciton by Eq (7); //optimizing the
    //node sensing area
    calcualting possible barier gain by Eq (8);
    calcualting possible energy efficiency ratio
    selecting optimal node as relay node;
    adjusting sensing range and working direction; // the
    //barrier is extenged to the rightest boundary from left to right
    Anc=relay node;
  End
End
```

图 6 Dbarar 算法伪代码

Fig. 6 Dbarar algorithm pseudo code

Step1 确定有向强栅栏的第一个节点。

假设左边界横坐标为 x_l，在 x_l+r_1 这个区域内的节点按照横坐标大小依次排序，选出预选区域中横坐标最小的节点。若其横坐标大于半径 r_2，则调整其感知区域，使感知半径为 r_1，再用最少的转动能耗调整其感知方向，使其在$[\pi-\alpha/2,\pi+\alpha/2]$之间。若其横坐标小于半径，判断扇形区域与左边界 $x=0$ 是否有公共点。若已有公共点，不进行转动；若无公共点，选择需要转动角度较小的那个方向，转至其扇形区域恰与左边界 $x=0$ 有一个公共点。该节点调度完毕后作为该条栅栏的第一个节点，也是决定下一个节点的父节点。

Step2 确定父节点的调节环。

根据式(3)，找到父节点感知方向上横坐标最大的位置，这就是调节环圆心。例如，在图 4 中，父节点 A 的感知区域内，横坐标最大点 B 就是其调节环的圆心。以 r_2 为半径的小圆为调节环的内边界，以 r_1 为半径的大圆为调节环的外边界。

Step3 确定周围移动节点类型、目标位置和栅栏增益。

周围节点根据自己与调节环的位置关系，确定自己属于哪一类节点，确定自己如何与父节点的感知区域相连：是仅

调整感知方向，还是仅改变感知区域，还是需要感知区域和感知方向同时改变？在此基础上，进一步计算能耗和栅栏增益，确定能效比。例如，在图 4(a)中，节点 F 在调节环内边界上，属于第二类节点，只需要根据式(7)调整感知方向为 $\beta+\theta/2$，调整后，它的栅栏增益为 $l_2=x_{\max}-x_t$。在图 4(b)中，节点 G 在调节环内，需要调整感知区域，使其感知半径为 r_1，感知角度为 r_2。感知方向调整为 $\beta-\theta/2$ 后，它的栅栏增益为 $l_2=x-x_t$。

Step4 确定中继节点。

父节点选择能效比最大的节点为中继节点。此节点调整自己的感知区域和感知方向，与父节点形成强栅栏，使栅栏向右延伸。

此中继节点作为父节点，以同样的方法确定下一个中继节点。

Step5 根据右边界位置，确定形成第一条栅栏。

第 $i+1$ 个节点调度完成后，判断 $x_{i+1}^t+r\geqslant L$ 是否满足。若是，则该条栅栏已经形成完毕，转入 Step6；若否，则继续重复 Step4 中的循环。

Step6 构建其余 $K-1$ 条栅栏。

若 $K>1$，从剩余的区域段中找出节点个数最多的区域段(之前参与形成栅栏的节点不再次计入)，重复 Step2－Step5 的操作，形成第二条栅栏。同理，依次形成第三条、第四条、…、第 K 条栅栏，算法结束。

4.2 算法的特点分析

算法在执行过程中，可能会导致后续节点的连锁调整问题：如果首次选中的节点的半径 r_1 和 r_2 的环状区域较小，导致第二个节点需要增大自己的半径。第三个节点为了与第二个节点的环状区域有交集，又需要继续调整。为了避免这种问题，本文基于能效比选择节点构建子栅栏，选择效率最高的节点来构建栅栏。

如何降低栅栏形成过程中的能耗，是栅栏构建算法要重点考虑的问题。Dbarar 算法通过以下措施降低能耗，高效构建栅栏。

(1)通过增大节点感知半径，不再需要移动就可以形成栅栏，消除了移动能耗。

(2)根据调节环分类优化调度节点是算法的核心。调度环不仅决定了周围节点的类型、变焦规律，也决定了其感知方向。

(3)虽然周围很多节点都可以与父节点形成连续的栅栏，Dbarar 算法只选择能效比最大的节点来延伸栅栏。

在栅栏形成过程中，设起始为 n 个节点，则需要先从 n 个节点中选中第一个节点，然后从 $(n-1)$ 个节点中选出第 2 个节点……以此类推，直至栅栏形成完毕。因此在整体上，时间复杂度会随着所需节点的增加而增大。最坏情况：在形成 K 条栅栏的过程中，若出现最坏情况，则形成 K 条栅栏用尽了投撒区域内全部 n 个节点。此时，时间复杂度为 $O(n^2)$。

5 仿真结果

本文运用 Matlab7.0 对此算法进行仿真，区域大小为 480 m×320 m。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。若没有特别指明，实验的默认参数为，$\Theta_1=\pi/6$，$\Theta_2=2\pi/3$，$r_2=10$ m，$\gamma=0.005$，$J_1=1.8$ J/π，$k=2$。我们选取 strong optimal 算法[11]、DBCTC 算法[17]与本文中的算法进行仿真比较。主要的性能参数是：形成的栅栏总数、网络利用率，网络寿命(如定义 7)。默认情况下取 100 次实验的平均值。总能耗、平均能耗、能耗标准差越小，节点数越少，栅栏形成算法就越高效，最大能耗越小，栅栏的寿命就越长。

5.1 算法特性

在默认参数下，Dbarar 算法形成的 2 条栅栏如图 7 所示。图 7 表明，Dbarar 算法充分运用了节点的变焦能力，增大节点感知半径，扩大了节点的栅栏覆盖能力。用 31 个左右的节点就可以形成第一条栅栏，用 37 个节点可以形成第二条栅栏。栅栏构建成功率如图 8 所示。变焦特性可以增大节点感知半径和节点的栅栏覆盖能力。在 0.004 密度时，就可以 100%形成 1 条栅栏；在 0.006 密度时，就可以 100%形成 4 条栅栏。

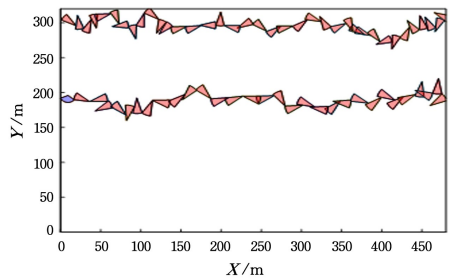


图 7 栅栏图

Fig. 7 Fence diagram

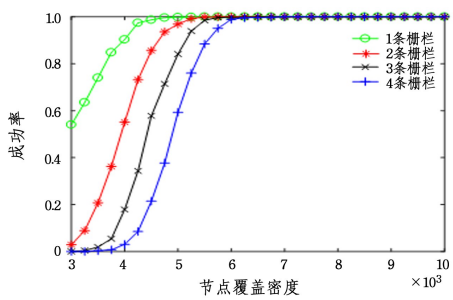
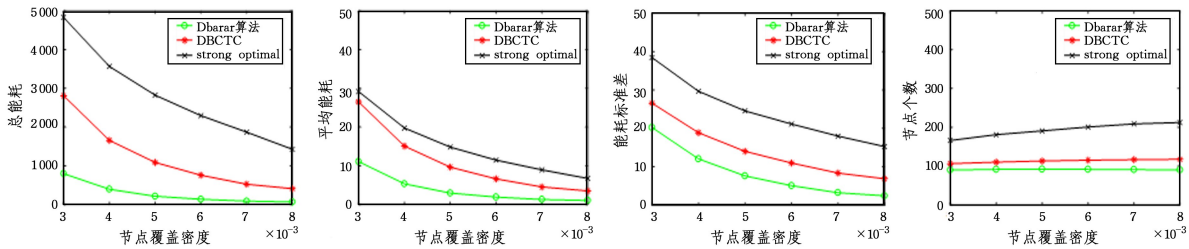


图 8 成功率

Fig. 8 Success rate

5.2 节点密度的影响

本文采用 0.003 作为起始节点密度进行仿真比较，其余默认参数一致。仿真结果如图 9 所示。结果表明，Dbarar 算法用最低的能耗、最少的节点形成栅栏。这是因为此算法采用节点的变焦特性，增大节点感知半径，扩大节点栅栏覆盖能力，摒弃节点移动，只是调整节点感知方向来形成栅栏。strong optimal 算法先选择节点形成子栅栏，再采用节点移动修补子栅栏空隙形成栅栏。它需要的节点最多。DBCTC 算法也需要节点移动，但通过能效比考虑了栅栏增益的影响，因此其能耗较低，节点数也较少。相比这 2 种算法，Dbarar 算法也是通过能效比选择最优节点，但是增大了节点感知半径，增大了节点栅栏覆盖能力，而且只调整节点感知方向，不改变节点位置，因此具有最小的能耗和最少的节点数。



(a)总能耗 (b)节点平均能耗 (c)节点能耗标准差 (d)节点数

图 9 节点密度的影响

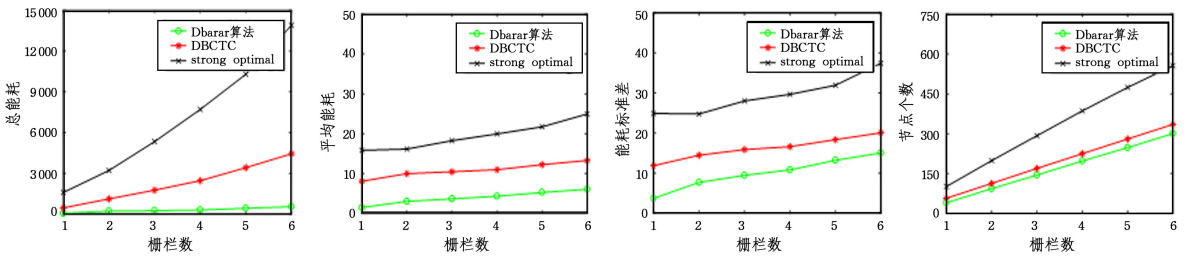
Fig. 9 Influence of node density

5.3 栅栏数的影响

栅栏数对算法性能的影响如图 10 所示，栅栏数增加，就需要更多的节点组建栅栏。随着栅栏数的增加，3 种算法的能耗和节点数都有所增加。由于先采用静态节点组建子栅栏，再采用移动节点修补子栅栏空隙，strong optimal 算法总能耗和节点数增加的幅度最大。尽管也采用移动，但 DBCTC 算法采用能效比选择节点，用最少的能耗获得最大的增益。因此，随着栅栏数的增加，DBCTC 算法的能耗增加缓慢。Dbarar 算法增大了节点感知半径，而且不需要移动，只调整节点感知方向，只需要能很少的能耗就可以形成栅栏。因此，Dbarar 算法也具有最小的能耗标准差。

5.4 网络寿命

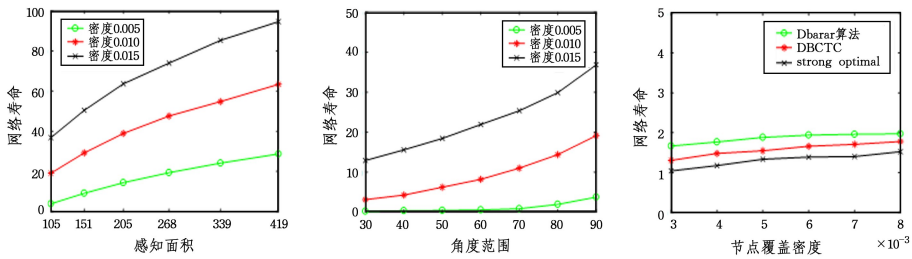
感知面积和感知角度对 Dbarar 算法的网络寿命影响如图 11(a)、图 11(b)所示。感知角度不变时，感知面积增加相当于增加节点感知半径，增大节点栅栏覆盖能力，可以用更少的能耗、更少的节点形成栅栏。同样的部署下，增加栅栏数量，因栅栏轮换得到的网络寿命也会延长。因此，Dbarar 算法中，随着感知面积的增加，网络寿命也在增加。同样的道理，角度变化范围增大了，感知半径也随之增加。Dbarar 算法随着角度变化范围的增加，栅栏寿命也会延长。



(a)总能耗 (b)节点平均能耗 (c)节点能耗标准差 (d)节点数

图 10 栅栏数的影响

Fig. 10 Influence of fence number



(a)感知面积的影响 (b)角度范围的影响 (c)不同算法对比

图 11 网络寿命

Fig. 11 Network lifetime

不同算法形成的栅栏寿命比较如图 11(c)所示。由于密度增加，候选栅栏节点增加，可以选择更好的节点组建栅栏，可以用更少的能耗形成栅栏。3 种算法的网络寿命都随着密度的增加而增加。由于 strong optimal 算法和 DBCTC 算法都需要移动才能形成栅栏，而 Dbarar 算法摒弃节点移动，只是转动节点感知方向，形成栅栏的能耗最少。因此 Dbarar 算法形成的栅栏具有最长的网络寿命。

结束语 本文研究有向节点感知区域的调整特性，提高节点的栅栏覆盖能力，创造调节环分类优化节点结构。提出 Dbarar 有向强栅栏构建算法，利用节点的变焦能力，摒弃节点移动，节能高效地构建有向强栅栏。仿真结果证明 Dbarar 算法可以用较少的节点高效节能地构建栅栏覆盖，延长网络寿命。

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] FAN X G, HU F D, LIU T, et al. Cost effective directional barrier construction based on zooming and united probabilistic detection[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2020, 19(7): 1555-1569.

[2] FAN X G, CHE Z C, HU F D, et al.. Deploy Efficiency Driven

k-Barrier Construction Scheme Based on Target Circle in Directional Sensor Network[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2020, 35(3): 647-664.
[3] FAN X G, WANG S Y, WANG Y H, et al. Energy-Efficient Barrier Lifetime Prolonging Scheme Based on Repairing in Directional Sensor Networks[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(4): 4943-4954.
[4] WU F, GUI Y, WANG Z, et al. A survey on barrier coverage with sensors[J]. Frontiers of Computer Science, 2016, 10(6): 968-984.
[5] KUMAR S, LAR T H, ARORA A. Barrier coverage with wireless sensors[C]// Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2005: 284-298.
[6] TAO D, WU T. A survey on barrier coverage problem in directional sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(2): 876-885.
[7] WANG Z B, LIAO J L, CAO Q, et al. Barrier Coverage in Hybrid Directional Sensor Networks[C]// Proceedings of IEEE MASS. Hanghou, China, 2013: 222-230.
[8] WANG Z, CAO Q, QI H, et al. Cost-effective barrier coverage formation in heterogeneous wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2017, 64: 65-79.
[9] ZHANG L, TANG J, ZHANG W. Strong barrier coverage with directional sensors[C]// Proceedings of IEEE GlobeCom. Honolulu, USA, 2009: 1-6.
[10] TAO D, CHEN H J. Strong barrier coverage detection algorithm for directional field of view sensor networks[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(5): 8-11.
[11] 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.
[12] CHEN B, WANG W, LIU L T, 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.
[13] WU Y S, CARDEI M. Distributed algorithms for barrier coverage via sensor rotation in wireless sensor networks[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2018, 36: 230-251.
[14] FAN X G, CHEN Q H, CHE Z C, et al. Energy-efficient probabilistic barrier construction in directional sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(3): 897-908.
[15] FAN X G, REN Y M, YANG J J, et al. A Strong K-Barrier Construction Scheme Based on Selecting Box for Directional Sensor Networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(5): 946-960.
[16] FAN X G, REN Y M, CHE Z C, et al. A Distributed Directional Barrier Construction Scheme Based on Neighbor Sport[J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(1): 221-231.
[17] CHE Z C, FAN X G, XU J C. A Construction Scheme for Directional Barrier Based on Target Circle[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(3): 390-396.
[18] CASTANO F, ROSSI A, SEVAUX M, et al. An exact approach to extend network lifetime in a general class of wireless sensor networks[J]. Information Sciences, 2018, 433: 274-291.
[19] GUVENSAN A, YAVUZ G. Hybrid movement strategy in self-orienting directional sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(3): 1075-1090.



WANG Fang-hong, born in 1981, lecturer. Her main research interests include wireless sensor and network, and Internet of thing.



FAN Xing-gang, born in 1974, Ph.D, associate professor, is a member of IEEE. His main research interests include wireless sensor and network, Internet of thing.

(上接第 357 页)

[22] FU J, ZHENG H, MEI T. Look closer to see better: Recurrent attention convolutional neural network for fine-grained image recognition[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017: 4438-4446.
[23] MOGHIMI M, BELONGIE S J, SABERIAN M J, et al. Boosted Convolutional Neural Networks[C]// BMVC. 2016.
[24] ZHENG H, FU J, MEI T, et al. Learning multi-attention convolutional neural network for fine-grained image recognition[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2017: 5209-5217.
[25] YANG Z, LUO T, WANG D, et al. Learning to navigate for fine-grained classification[C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). 2018: 420-435.
[26] ZHENG H, FU J, ZHA Z J, et al. Looking for the devil in the details: Learning trilinear attention sampling network for fine-grained image recognition[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019: 5012-5021.



YANG Jian-nan, born in 1995, postgraduate. His main research interests include image recognition and computer vision.