

一种基于选择框的有向 K -栅栏构建算法

范兴刚 王 超 杨静静 任勇默 车志聪

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘 要 K -栅栏覆盖是有向传感器网络的研究热点之一. 该文提出了一种含有最少节点的有向强栅栏覆盖模型(MDNSB). 在这个强栅栏模型中, 感知角度不管是小于 60° 还是大于等于 60° , 有向节点的最大感知距离都在栅栏方向. 在此基础上, 提出一种基于有向节点选择框的有向强 K -栅栏覆盖构建算法(DSBCSB), 以节点目标位置为基础构建有向节点选择框, 选择框内运动能耗最少的有向移动节点运动到有向强 K -栅栏的目标位置, 形成有向强 1-栅栏覆盖. 其中的节点运动能耗由移动能耗和转动能耗两部分组成. 水平相邻子区域的 1-栅栏通过竖直栅栏联合起来构成强 1-栅栏覆盖, 多个强 1-栅栏构成有向强 K -栅栏覆盖. 仿真结果证明了在形成 G -栅栏的过程中, 该方法比其他算法节省了 $40\% \sim 50\%$ 的节点, 能耗降低了 $30\% \sim 40\%$. 该文的研究对提升有向无线传感器网络的性能具有重要的理论与实际意义.

关键词 有向传感器网络; 强 K -栅栏覆盖; 感知距离; 目标位置; 节点选择; 能耗模型; 竖直栅栏; 物联网
中图法分类号 TP273 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2016.00946

A Strong K -Barrier Construction Scheme Based on Selecting Box for Directional Sensor Networks

FAN Xing-Gang WANG Chao YANG Jing-Jing REN Yong-Mo CHE Zhi-Cong
(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract K -barrier coverage is one of the hot spot in directional sensor network. This paper models MDNSB (strong barrier of minimum directional node) and mainly proposes DSBCSB (directional strong barrier construction based on selecting box) scheme. In MDNSB, sensors with both sensing angle less than 60° and greater than 60° have the largest sense distance toward the direction of barriers. Actuation energy consumption is firstly modeled as the sum of mobility and motility energy consumption. In DSBCSB, first, Barrier location with the largest number of nodes is chosen as barrier target by barrier selection box. Second, directional node selecting box with target location as a center is created. The node with least actuation energy consumption in selecting box moves to target location and turns its sensing direction for 1-barrier construction. Then, vertical barrier is built up between two horizontal adjacent subareas. Finally, these barriers are merged into strong 1-barrier coverage; k strong 1-barriers could build up directional strong K -barriers coverage in area of interest. Simulation results show that our method could effectively constitute K -barrier coverage with 50% less quantity of nodes and $30\% \sim 40\%$ less energy consumption than other methods. This research has important theoretical and practical significance.

Keywords directional wireless sensor network; strong K -barrier coverage; sense distance; target location; node selection; energy consumption model; vertical barrier; Internet of Things

收稿日期: 2015-01-23; 在线出版日期: 2015-11-20. 本课题得到“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD10B01)、国家自然科学基金(40241461, 11405145)资助. 范兴刚, 男, 1974年生, 博士, 副教授, 研究方向为无线传感器网络、物联网、大数据. E-mail: xgf@zjut.edu.cn. 王 超, 男, 1993年生, 主要研究方向为无线传感器网络、物联网、大数据. 杨静静, 男, 1990年生, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络、物联网、大数据. 任勇默, 男, 1993年生, 主要研究方向为无线传感器网络、物联网、大数据. 车志聪, 男, 1995年生, 主要研究方向为无线传感器网络、物联网、大数据.

1 引言

有向传感器,如视频传感器、超声传感器和红外传感器等,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装备情况等.在上述列举的应用中,有向传感器节点被部署于感兴趣区域的边界,对进入感兴趣区域的移动目标进行检测,这种技术被称为栅栏覆盖.如何实现栅栏覆盖是有向传感网络一个研究热点^[1].

在全向感知模型下,栅栏覆盖目前已有一些研究工作.Kumar 和 Lai 等人^[2]定义了强栅栏,弱栅栏问题.Tian 等人^[3]研究了采用节点的睡眠机制构建两维栅栏覆盖.利用节点的移动能力方面,班冬松等人^[4]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.Wang 等人^[5]研究了节点存在定位误差时的栅栏覆盖问题.He 等人^[6]多次移动节点构建栅栏覆盖.Saipulla 等人^[7]构建栅栏过程中,考虑了节点移动能力的有限性.

在有向栅栏研究中,Ma 等人^[8]研究了最少的有向视频节点组建栅栏问题;Tao 等人^[9]研究如何调整有向节点的感知方向组建有向强栅栏问题;Zhang 等人^[10]利用有向节点的转动能力构建强栅栏;Wang 等人^[11]选择有向节点组建视线栅栏,构建有向传感阵列监视入侵者;Wang 等人^[12-13]研究了混合有向网络的栅栏覆盖,根据网络拓扑构建权重栅栏图 WBG,再运用顶点不相交的路径算法构造 K-栅栏.以上这些方法都是集中式的,都需要知道整个网络的拓扑.Shih 等人^[14]研究了分布式栅栏构建算法,利用可能栅栏行中的邻居节点通过栅栏信息构建栅栏.Tao 和 Chen^[15]利用邻居节点的位置信息,选择具有最多邻居的节点构建栅栏.

针对有向栅栏的研究,或者只考虑有向节点的转动或者只考虑有向节点的移动,尚未发现从移动和转动两方面研究栅栏构建.Guvensan 和 Yavuz^[16]基于移动能耗和转动能耗,研究了有向网络的覆盖增强.另一方面,随机部署后,利用附近节点之间的位置关系,可以选择最优的节点构建栅栏.本文考虑的是如何利用节点的移动和转动能力,节能高效的构建强 K-栅栏覆盖,贡献如下:

(1) 提出了最少节点的有向强栅栏(Strong Barrier

of Minimum Directional Node, MDNSB)模型.此模型中,组成有向强栅栏的有向节点位置由从左到右的两个基准位置确定,感知方向为水平方向.

(2) 提出基于有向节点选择框的有向强 K-栅栏构建算法(Directional Strong Barrier Construction based on Selecting Box, DSBCSB).运用有向节点选择框内选择移能耗最少的有向节点构建 MDNSB,有向移动节点的能耗等于移动到基准位置的能耗和感知方向转动到目标方向的转动能耗之和.

(3) 详细分析了感知角度 $\theta \geq \pi/3$ 时的栅栏构建算法,有向节点选择框的宽度为 $2r \times (\cos(\theta/2) + \sin(\theta/2))$,长度为其最大感知距离.

本文第 2 节描述网络模型;第 3 节从理论上对 $\theta < \pi/3$ 有向强栅栏构建算法进行分析;第 4 节介绍感知角度 $\theta \geq \pi/3$ 的强栅栏构建算法;第 5 节详细介绍基于有向节点选择框的有向强栅栏构建算法(DSBCSB);第 6 节通过仿真实验对提出的算法进行性能评估;第 7 节总结全文并介绍下一步工作.

2 有向强栅栏覆盖模型

有向传感器节点方向可调感知模型可以采取四元组表示 $\langle P, r, \alpha, \theta \rangle$,如图 1 所示.其中 $P = (x, y)$ 表示节点的位置坐标, r 表示节点的感知半径, α 表示节点的工作方向(或感知方向),取值范围为 $0 \leq \alpha \leq 2\pi$, θ 表示节点的感知角度.则当 $\theta = 2\pi$ 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.

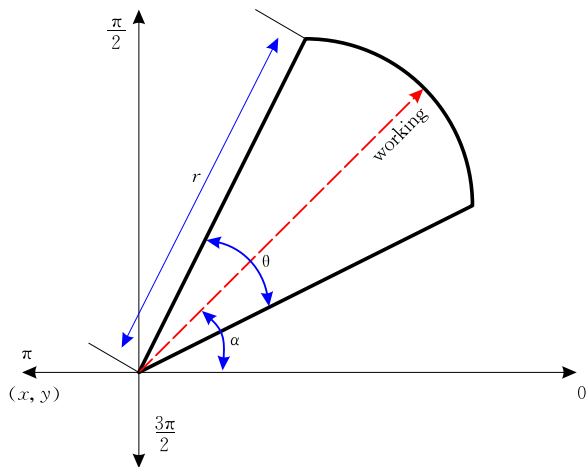


图 1 有向节点模型

假设在长度为 L ,宽度为 W 区域中,随机部署 N 个节点.先将监控区域进行划分,垂直方向为 K ,水平方向为 V 共 $K \times V$ 个相同大小的子矩形区域.

节点具有运动能力,能够转动和移动,节点的感知半径为 r . 在对有向传感器网络 1-栅栏问题分析之前,需要做以下必要假设:

- (1)网络中所有节点均是同构的,即具有相同的感知半径和感知角度.
- (2)传感器投撒后全部处于活跃状态,传感器监视范围内的信号强度相同,且能在感知范围内以 100% 的可能性监测到事件.
- (3)有向传感节点都能了解自己的感知方向信息和位置信息.
- (4)所有传感器的转动功耗和移动功耗均相同. 单个传感器节点每转动 π 耗能为 $J_1=1.8\text{J}$, 每移动 1m 耗能为 $J_1=3.6\text{J}$, 如文献[12]所示.
- (5)栅栏的方向或者与 X 轴平行,即水平方向,要么与 Y 轴平行,即垂直方向.

定义 1. 节点的最大感知距离. 如文献[13]的式(1)所示,这里用 R 表示. 如果 $\theta \leq \pi/3$, 则 $R=r$. 如果 $\theta \geq \pi/3$, 节点的最大感知距离详见第 4 节.

定义 2. 传感器之间的距离. 两个有向传感器 A 和 B 的感知区域内任意两点之间的最短距离称为传感器之间的距离,用 $D_n(A,B)$ 表示,两个感知区域无公共面积时, $D_n(A,B) > 0$ 与文献[13]的定义 6 强距离一样;两个感知区域有且仅有一个公共点时, $D_n(A,B) = 0$;两个感知区域有公共面积时, $D_n(A,B) < 0$, 其绝对值为公共面积内任意两点之间的最大欧式距离.

定义 3. 最少有向节点的强栅栏 MDNSB (Strong Barrier of Minimum Directional Node). 设监控区域的左边界为 s_0 , 右边界为 s_{m+1} , 如果监控区域中存在一个从左到右的传感器节点集合, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_m\}$, $m \leq N$. 如果集合满足式(1)、(2)、(3.1)、(3.2), 则水平方向形成 1 条 MDNSB. 如果在感兴趣区域 A 有 K 条这样的强栅栏, 在称为区域 A 形成强 K -栅栏覆盖.

其中 α_i 表示第 $i(1 \leq i \leq m)$ 个节点的感知方向. 式(1)表示两个有向节点仅有一个公共点; 式(2)表示边界与栅栏是相交的; 式(3.1)是感知角度 $\theta \leq \pi/3$ 时节点的感知方向, 或者与 X 轴方向一致, 或者与 X 轴方向相反, 式(3.2)是感知角度 $\pi/3 \leq \theta$ 时节点的感知方向, 或者与 Y 轴方向一致, 或者与 Y 轴方向相反.

$$D_n(s_i, s_{i+1}) = 0, 0 \leq i \leq m-1$$

(1)

$$D_n(s_0, s_1) \leq 0, D_n(s_m, s_{m+1}) \leq 0$$

(2)

$$\alpha_i = 0 \text{ or } \alpha_i = \pi, 1 \leq i \leq m$$

(3.1)

$$\alpha_i = \pi/2 \text{ or } \alpha_i = 3\pi/2, 1 \leq i \leq m$$

(3.2)

如图 2 所示,虚线框中的节点的最大感知半径都在水平方向,而且相邻的两个节点只有一个交点,交点或者在圆弧上,或者在圆心上. 虚线框中的节点在子区域形成 1MDNSB. 如果相邻的两个子区域的 1MDNSB 不在一条水平线上,可以通过竖直栅栏将相邻的两个 1MDNSB 连接起来. 从而构建一条强栅栏. 如果在感兴趣区域 A 有 K 条这样的强栅栏, 则称为区域 A 形成强 K -栅栏覆盖.

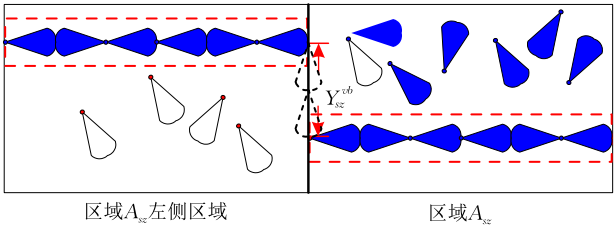


图 2 栅栏构建模型

定义 4. 节点密度. 在感兴趣区域随机部署的节点数与区域面积的百分比称为节点密度, 用 ρ 表示. 节点密度对栅栏的形成有重要的影响, 后面的仿真会进一步分析节点密度对栅栏的影响.

我们研究的问题就是: 在区域 A 中, 如何高效率地调度随机部署的移动节点, 构建 MDNSB, 进而构建强 K -栅栏覆盖.

3 基于有向节点选择框的理论分析

要构建 K -强栅栏, 先根据 MDNSB, 选择节点的目标位置, 再由节点选择框选择能耗最小的移动节点运动到目标位置. 节点选择框的创建是算法的核心. 为了描述方便, 采用如表 1 所示的参数, 其中关于节点选择框的参数详细解释见图 3(a). 由于参

表 1 参数定义

参数	参数说明
L	整个区域的长度
W	整个区域的宽度
K	栅栏数
V	水平分区数
R	节点最大感知距离
ρ	节点部署密度
Y_{sz}^b	子区域 A_{sc} 基准栅栏位置
l_n^s	节点选择框的长
w_n^s	节点选择框的宽
m	基准栅栏所需要的传感器节点数量
p	竖直栅栏所需要的传感器节点数量
W_j^l	选择框内第 j 个节点移动到左目标点的能耗
W_j^r	选择框内第 j 个节点移动到右目标点的能耗

数较多,本文用小角标 b 代表基准,小角标 l 代表左边,小角标 r 代表右边,小角标 u 代表上边,小角标 d 代表下边。

3.1 MDNSB 的性质

由 MDNSB 的定义可以推出,含有最少有向节点的强栅栏有如下的性质。

性质 1. 当 $\theta < \pi/3$ 时,形成 MDNSB 的相邻的两个有向节点水平距离 $d(x_i, x_{i+1}) = 2r$, 或者 $d(x_i, x_{i+1}) = 0$, 或者 $d(x_i, x_{i+1}) = r$. 其中 x_i 表示节点 s_i 的横坐标, $d(\cdot)$ 表示两个节点间的水平距离。

证明. 由式(3.1)可知,当 $\theta < \pi/3$ 时,第 i 个和第 $i+1$ 个节点的感知方向可以都与 X 轴方向相同,都为 $\alpha_i = \alpha_{i+1} = 0$;也可以第 i 个和第 $i+1$ 个节点的感知方向都与 X 轴方向相反,都为 $\alpha_i = \alpha_{i+1} = \pi$,这两种情况都有 $d(x_i, x_{i+1}) = r$. 如果第 i 个节点感知方向与 X 轴相反,第 $i+1$ 个节点的感知方向与 X 轴方向相同,则有 $d(x_i, x_{i+1}) = 0$. 如果第 i 个节点感知方向与 X 轴方向相同,即 $\alpha_i = 0$,第 $i+1$ 个节点的感知方向与 X 轴方向相反,即 $\alpha_{i+1} = \pi$,则有 $d(x_i, x_{i+1}) = 2r$. 证毕。

性质 2. 当感知角度为 $\theta = \pi/3$ 时,两个有向节点水平距离 $d(x_i, x_{i+1})$ 可能为 $0, 0.5r, r, 1.5r, 2r$. 证明详见 4.5 节。

性质 3. 当感知角度 $\pi/3 < \theta \leq \pi$ 时,两个有向节点水平距离 $d(x_i, x_{i+1}) = 2r \times \sin(\theta/2)$.

证明 详见 4.1 节。

性质 4. 当感知角度 $\pi \leq \theta \leq 2\pi$ 时,两个有向节点水平距离 $d(x_i, x_{i+1}) = 2r$.

证明 详见 4.1 节。

性质 5. 形成 MDNSB 的有向节点在栅栏方向上有最大感知距离。

证明. 如果 $d(x_i, x_{i+1}) = r$, 则交点在第 i 个节点的圆弧上,第 $i+1$ 节点的圆心上;或者在第 $i+1$ 个节点的圆弧上,第 i 节点的圆心上. 这两种情况下,第 i 个节点和第 $i+1$ 个节点在栅栏方向上都有最大感知距离. 如果 $d(x_i, x_{i+1}) = 2r$, 则交点在两个节点的圆弧上,第 i 个节点在栅栏方向上也有最大感知距离,第 $i+1$ 个节点在 X 轴的反方向有最大感知距离,也是在水平方向,即栅栏方向有最大感知距离. 如果 $d(x_i, x_{i+1}) = 0$, 则交点在圆心上. 这两个相邻的节点一个在 X 轴的反方向有最大感知距离,也是在水平方向,即栅栏方向有最大感知距离;另一个一个在 X 轴方向有最大感知距离,也是在水平方向,即栅栏方向有最大感知距离. 当 $d(x_i, x_{i+1}) =$

$2r \times \sin(\theta/2)$ 时,感知角度 $\pi/3 < \theta \leq \pi$, 节点的最大感知距离就是 $R = 2r \times \sin(\theta/2)$, 直线 $x = x_i$ 一定是节点 i 的最大感知距离的垂直平分线,也就是节点 i 的最大感知距离一定是水平的,同理,节点 $i+1$ 节点的最大感知距离也一定是水平的(详见图 5(a)). 同理可以证明当 $\theta = \pi/3$ 时,节点的最大感知距离也在水平方向. 所以,形成 MDNSB 的有向节点在栅栏方向上有最大感知距离. 证毕。

3.2 子区域的划分

子区域宽度为 W/K , 则子区域的面积只与 V 值相关, V 越小,子区域的长度越大,面积越大,子区域的节点数量越多,从而导致传感器网络的通信和计算开销增加. 因此要限制子区域中的节点数量,设其最大值为 $N_{\max}$. 另一方面, V 增大导致子区域增多,竖直栅栏也会增多,形成栅栏需要的节点数也会增多,因此 V 值大小要合适, V 值的取值范围推导如下: 在子区域 A_{sz} 中,可能形成强 1-栅栏的目标位置最大个数为 $\frac{L/V + W/K}{R} - 1$, 其中, L 为区域的总长度, W 为区域的总宽度, R 为节点的最大感知距离.

已知传感器节点的节点部署密度为 ρ , 只要 $N_{\max} \geq \rho \times A_{sz} \geq \frac{L/V + W/K}{R} - 1$, 子区域就能形成 MDNSB.

已知 $A_{sz} = \frac{L}{V} \times \frac{W}{K}$ 代入得 V 值的取值范围 $\frac{\rho L W}{N_{\max} K} \leq V \leq \frac{L(W - KR)}{R(WR - K)}$, 进一步得到 A_{sz} 的取值范围 $\frac{N_{\max}}{\rho} \leq A_{sz} \leq \frac{R(WR - K)W}{(W - KR)K}$.

参考文献[3],子区域的划分采取如下的方法: 先算出总区域形成一条水平横向栅栏需要的节点数目,即 $n = \lceil L/R \rceil$, 再求出左边 $(V-1)$ 个子区域的所需的节点个数, $m = \lfloor n/V \rfloor$, 和第 V 个子区域节点数为 $n - m \times (V-1)$. 则左边 $(V-1)$ 个子区域长度为 $m \times R$, 第 V 个子区域长度为 $L - m \times R(V-1)$.

3.3 节点选择框的创建

根据定义 3, 基准栅栏 Y_{sz}^b 共有 $m = \lfloor n/V \rfloor$ 个目标节点位置. 从左到右的第 i ($i = 1, 2, \dots, m-1$) 个节点位置, 由左右两个点 A, B 决定(如图 3(a)所示). A, B 坐标如式(4)和(5)所示, 其中, x_{sz}^0 表示子区域 A_{sz} 的左边界的横坐标, r 表示节点的感知半径, w_n^s 表示节点选择框的宽度. 基准栅栏最右边的节点位置由子区域的右边界决定, 即如果式(5)确定的横坐标超出右边界, 则子区域的右边界横坐标就

是右边的基准点横坐标.

$$x_{il}^b = x_{sz}^0 + (i - 1) \times r, y_{il}^b = Y_{sz}^b + w_n^s/2 \quad (4)$$

$$x_{ir}^b = x_{sz}^0 + i \times r, y_{ir}^b = y_{il}^b \quad (5)$$

定义 5. 有向节点选择框,为 MDNSB 中的有向节点位置选择能耗最少的移动节点而设定的选择框称为节点选择框(Directional Node Selection Box, DNSB).

与全向栅栏不同,在 MDNSB 中,一个节点位置由两个基准位置决定,如图 3(b)所示,基准位置 A 和 B 确定一个节点位置.简单起见,先考虑一个基准位置选择移动节点.为了选择最佳移动节点移动到基准位置,可使基准位置处于节点选择框中心.设节点分布密度为 ρ ,由于区域内节点服从均匀分布,若以基准位置为中心,划定一个正方形的节点选择框,使其内部期望有 1 个节点移动到基准位置,则子区域期望面积应为 $1/\rho$.如密度为 0.003,则子区域期望面积应为 $1/0.003=333$,得出节点选择框的边长为 $\sqrt{1/\rho}=18.25$;密度为 0.005,边长为 14.12;密度为 0.007,边长为 11.95.如图 3(b)所示,当两个相邻的正方形节点选择框合并成一个矩形选择框时,这些相邻的节点选择框存在重叠面积,边长越大,重叠面积越大.为了尽量减少相邻两个节点选择框之间的重叠区域带来的节点重复选择问题,需要进一步设定节点选择框的长和宽.

根据目标点设定选择区域,可以转换为这样一个问题:在一个区域内如何放置目标点,使这个区域内随机分布的点到目标点的距离概率上最短.根据几何理论可知,如果只有一个目标点,这个区域的中心位置就是目标点,如果要选择两个目标点,就相当于先把整个区域均分成两个区域,每一个目标点处于每一个区域的中心.

当节点选择框的宽度为 $\sqrt{1/\rho}$ 时,会出现相邻节点选择框之间重叠面积过大的问题,因此需要减小节点选择框的宽度,由此可知节点选择框中肯定存在 1 个传感器节点,而存在 2 个节点的概率小于 1.因此本文选取在 100×100 的区域中,随机分布有 1 个节点与 2 个节点的情况,两个目标点的初始坐标分别为 $(0,50),(100,50)$.然后两点的横坐标分别以步长为 5 向区域中心移动,当横坐标为 5,就表示目标点坐标为 $(5,50),(95,50)$.

随机做实验 200 次,然后取 200 次的平均值.也就是每次随机分布一个节点,算出节点到两个目标点的距离,取其中较短的值作为样本,这 50 个距离

样本再取平均值.假设一个节点到目标点 $(5,50),(95,50)$ 距离是 40,35,选 35 为一个样本,这样取得 50 个样本,其平均距离为 37.

两个节点,两个目标点的时候,4 个距离中最短的距离为一个样本,其余步骤和一个节点,两个目标点一样.仿真结果如图 3(c)所示,从图中可知,当两点坐标为 $(25,50),(75,50)$ 时,即目标点处于水平中心线的四等分点处,最短距离达到最小值.

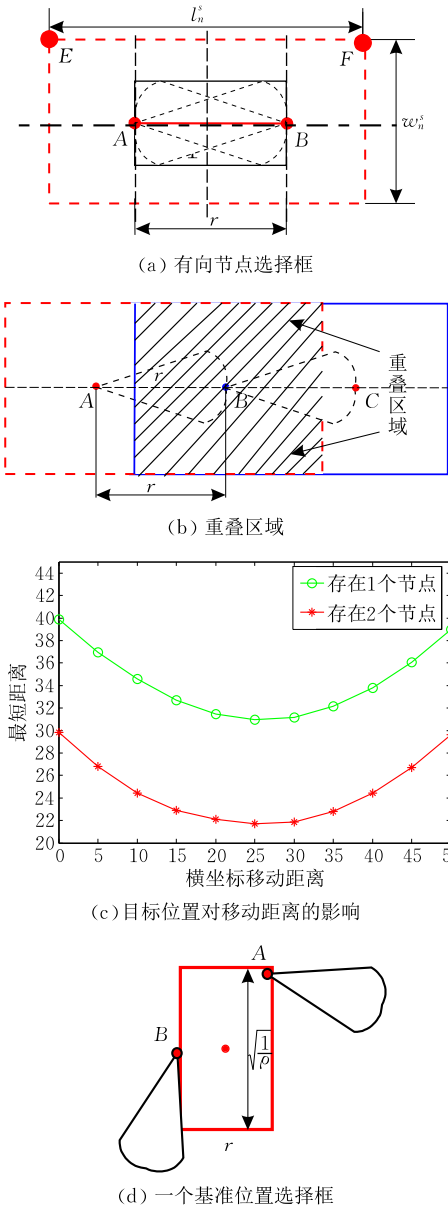


图 3 节点选择框

根据这个结果,则可以画出线段 AB 的垂直平分线,如图 3(a)所示,即将 AB 分割成两等份,每一份长为 $r/2$.再将长从 A 和 B 两侧分别延伸 $r/2$ 的距离,由于 $BA=r$,则节点选择框的长度为 $2r$.

长度设定好以后,我们进一步设定节点选择框

的宽度,如图 3(d)所示,当一个基准位置选择框宽度为 $\sqrt{1/\rho}$,长为 r 时,节点 A 在框内,节点 B 在框外,但节点 B 更接近于目标位置.为减少节点选择框过宽所带来的误差,应使基准位置尽可能地处于正方形的中心位置,所以一个基准位置节点选择框的宽度为 r .

总之,MDNSB 中,一个节点位置有两个相邻的基准位置 A 和 B 确定,这两个相邻的基准位置选择框合起来就是有向节点选择框(如图 3(a)中长方形虚线框所示).有向节点选择框为长方形, $l_n^s = 2r$, $w_n^s = r$.当框内不存在节点时,采用扩展节点选择框的方式寻找移动节点,如果节点选择框内没有节点,要对节点选择框进行扩展,为了保证基准位置圆心尽可能处于正方形中心,上下左右都扩大 $0.5r$, $l_n^s = 3r$, $w_n^s = 2r$.

3.4 有向节点运动能耗

节点选择框大小确定好以后,找出节点选择框内的节点以后,根据有向节点运动能耗选择最佳移动节点运动到目标位置.

定义 6. 有向节点运动能耗,有向移动节点移动到 MDNSB 中的目标位置消耗的能量和转动到水平方向所消耗的能量之和,就是有向节点的运动能耗,如式(6)和(7)所示.

在全向模型里,移动节点距离目标位置越近,移动能耗越小.对于节点集合 SN_i ,我们可以根据距离目标位置的远近选择节点,而在有向感知模型里,节点不仅要移动,节点的感知方向也要调整,移动和转动都会耗能,都要考虑.根据定义 6,有向传感器节点移动到目标位置所消耗的能量由移动消耗的能量和转动消耗的能量两部分组成.针对第 i 个节点选择框内的节点集合 SN_i 的第 j ($j=1,2,\dots$) 个节点,设其坐标为 (x_j, y_j) ,两个基准位置的坐标从左到右位为 (x_{il}^b, y_{il}^b) , (x_{ir}^b, y_{ir}^b) ,如式(4)、(5)所示.求出两种情况下欧式距离 d_j^l, d_j^r ,所消耗的能量为 W_j^l, W_j^r ,如式(6)、(7),在式(6)中,等号右边的第一部分是移动能耗,第二部分是转动能耗,由于是左点,节点的感知方向只能是 0,当 $0 \leq \alpha_j \leq \pi$ 时,节点顺时针转到 X 轴方向,当 $\pi \leq \alpha_j \leq 2\pi$ 时,节点逆时针转到 X 轴方向.式(7)和(6)一样,等号右边的第一部分是移动能耗,第二部分是转动能耗,由于是右点,节点的感知方向只能是 π ,当 $0 \leq \alpha_j \leq \pi$ 时,节点逆时针转到 X 轴负方向,当 $\pi \leq \alpha_j \leq 2\pi$ 时,节点顺时针转到 X 轴负方向.在这两个能耗中,较小的值的位

置保存在 E_i 集合中.

$$W_j^l = \begin{cases} J_1 \times d_j^l + J_2 \times \alpha_j, & 0 \leq \alpha_j \leq \pi \\ J_1 \times d_j^l + J_2 \times |2\pi - \alpha_j|, & \pi \leq \alpha_j \leq 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

$$W_j^r = J_1 \times d_j^r + J_2 \times |\pi - \alpha_j| \quad (7)$$

第 i 个节点选择框内的节点集合 SN_i 考查完毕以后,将 E_i 中最小的能耗所对应的有向移动传感器节点移动到目标位置,感知方向调整为相应的水平方向,或者与 X 轴方向一致,或者与 X 轴的负方向一致.

定理 1. 如果节点选择框没有扩大,选择框中的节点移动到目标位置,消耗的能量最大为 $W_{\max} = J_1 \times \frac{\sqrt{2}}{2}r + J_2 \times \pi$.

证明. 在节点选择框中,距离目标位置最远的点耗能最大,如果节点位于 E 处,或者 E 关于水平虚线的对称点处,如图 3(a)所示,感知角度 $\alpha = \pi$,这个时候节点到基准点 B 的距离要比到点 A 的距离长,根据我们的选择原则,能耗更少的位置才会被选择,所以节点会移动到点 A ,感知方向调整为 X 轴方向.点 E 到点 A 的欧式距离为 $\frac{\sqrt{2}}{2}r$,移动能耗为 $J_1 \times \frac{\sqrt{2}}{2}r$,顺时针转到 X 轴方向的能耗为 $J_2 \times \pi$.总能耗为 $W_l = J_1 \times \frac{\sqrt{2}}{2}r + J_2 \times \pi$.如果节点位于 F 处,或者 F 关于水平虚线的对称点处,感知角度 $\alpha = 0$,同样可以证明,节点移动到点 B ,感知方向为 X 轴负方向的能耗为 $W_r = J_1 \times \frac{\sqrt{2}}{2}r + J_2 \times \pi$.所以节点消耗最大为 $W_{\max} = J_1 \times \frac{\sqrt{2}}{2}r + J_2 \times \pi$. 证毕.

3.5 竖直接栅构建

相邻的 MDNSB 通过竖直接栅连接起来,竖直接栅中的节点感知方向是竖直的,即感知方向为 $a = \pi/2$ 或者 $a = 3\pi/2$.如果当前子区域的左侧基准栅栏位置纵坐标为 $Y_{s(z-1)}^b$,当前子区域的基准栅栏位置纵坐标为 Y_{sz}^b ,则这两个相邻 MDNSB 之间的纵坐标差为 $p = |Y_{sz}^b - Y_{s(z-1)}^b|$,竖直接栅所需要的传感器节点数量就是 p ,如在图 2 中, $p=2$.

从当前子区域的栅栏的左端点开始自上往下或者自下往上选择最佳的传感器节点,如图 2 所示,选择策略与 3.4 节相似,仍然对基准位置采用节点选择框选取最优节点移动到目标位置,但是感知方向不再是水平的,而是垂直的.竖直接栅从下到上的第

$i(i=1,2,\dots)$ 个基准位置,由上下两个点决定,其坐标分别为 $(x_{id}^b, y_{id}^b), (x_{iu}^b, y_{iu}^b)$,如式(8)、(9)所示,其中 $Y_{\min}^b = \min(Y_{s(z-1)}^b, Y_{sz}^b)$. 运用和 3.4 节类似的方法,选择移动节点. 节点消耗的能量 W_j^d, W_j^u ,如式(10)、(11)所示.

$$x_{id}^b = x_{sz}^0, y_{id}^b = Y_{\min}^b + r \times (i-1) \quad (8)$$

$$x_{iu}^b = x_{sz}^0, y_{iu}^b = y_{id}^b + r \times i \quad (9)$$

$$W_j^d = \begin{cases} d_j^d \times J_1 + |\pi/2 - \alpha_j| \times J_2, & 0 \leq \alpha_j \leq 3\pi/2 \\ d_j^d \times J_1 + (5\pi/2 - \alpha_j) \times J_2, & 3\pi/2 \leq \alpha_j \leq 2\pi \end{cases} \quad (10)$$

$$W_j^u = \begin{cases} d_j^u \times J_1 + (\pi/2 + \alpha_j) \times J_2, & 0 \leq \alpha_j \leq \pi/2 \\ d_j^u \times J_1 + |3\pi/2 - \alpha_j| \times J_2, & \pi/2 \leq \alpha_j \leq 2\pi \end{cases} \quad (11)$$

将 E_i 集中最小的能耗所对应的有向移动传感器节点移动到竖直目标位置,感知方向调整为相应的竖直方向,或者与 Y 轴方向一致,或者与 Y 轴的负方向一致.

4 感知角度 $\theta \geq \pi/3$ 时 MDNSB 的创建

4.1 基准栅栏

当感知角度 $\pi/3 < \theta \leq \pi$ 时,节点的最大感知距离 $R = 2r \times \sin(\theta/2)$;当感知角度 $\pi \leq \theta \leq 2\pi$ 时,节点的最大感知距离 $R = 2r$,同样为了使节点的最大感知距离与栅栏方向重合,节点的感知方向调整为垂直方向,两种情况下的有向基准栅栏 MDNSB 如图 4 所示. 这个时候,基准栅栏选取框的宽度仍然与节点选择框的宽度一样.

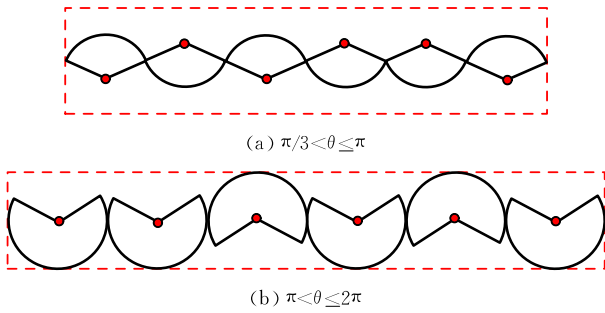


图 4 MDNSB

MDNSB 性质 3 的证明如下.

证明. 当感知角度 $\pi/3 < \theta \leq \pi$ 时,由式(3.2)可知,第 i 个和第 $i+1$ 个节点的感知方向可以都与 Y 轴方向相同,如图 5(a)的左边虚扇形所示,都为 $\alpha_i = \alpha_{i+1} = \pi/2$;也可以第 i 个和第 $i+1$ 个节点的感知方向都与 Y 轴方向相反,如图 5(a)的右边虚扇形所示,都为 $\alpha_i = \alpha_{i+1} = 3\pi/2$,或者有一个节点感知方向与 Y 轴方向相反,另一个节点的感知方向与

Y 轴方向相同,这 3 种情况都有 $d(x_i, x_{i+1}) = 2r \times \sin(\theta/2)$. 证毕.

MDNSB 性质 4 的证明如下.

证明. 当感知角度 $\pi \leq \theta \leq 2\pi$ 时,由式(3.2)可知,第 i 个和第 $i+1$ 个节点的感知方向可以都与 Y 轴方向相同,也可以与 Y 轴方向相反. 无论第 i 个和第 $i+1$ 个节点的感知方向如何,两个有向节点水平距离都为 $d(x_i, x_{i+1}) = 2r$,如图 5(b)所示. 证毕.

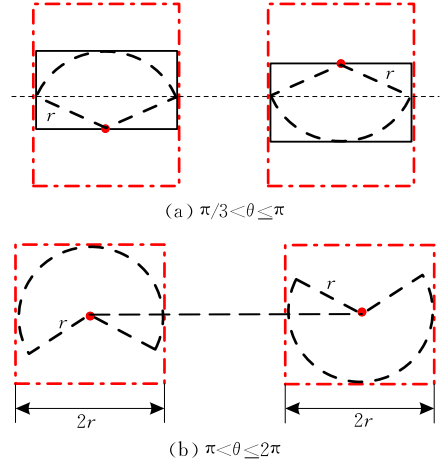


图 5 水平节点选择框

4.2 节点选择框

当 $\pi/3 < \theta \leq \pi$ 时,节点选取框也发生了变化,如图 5(a)中的虚线框所示,由于决定有向节点的两个基准点处于一条垂直线上,因此只需节点选择框长度等于最大感知距离,基准位置就处于选择框水平方向的中垂线上,最大感知距离如式(12)所示.

$$l_n^s = \begin{cases} 2r \times \sin(\theta/2), & \pi/3 < \theta \leq \pi \\ 2r, & \pi < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (12)$$

选择框宽度 w_n^s 的选取思路与上文感知角度小于 $\pi/3$ 时的情况不同. 由于两个基准位置的圆心在同一条垂直线上,因此两个圆心之间的距离为 $2r \times \cos(\theta/2)$,最大距离为 $\sqrt{3}r$,小于 $2r$,而随着感知角度的增大,两个基准位置的圆心之间的距离会越来越小直至等于 0,如果为了满足基准位置的圆心处于正方形的中心而使选择框的宽度等于 $4r \times \cos(\theta/2)$,会导致选择框不断缩小直至消失. 因此在这种情况下为保证节点选择框足够大又能使目标位置尽可能处于中垂线的四等分点,即选择框宽度 w_n^s 为 $2r \times (\cos(\theta/2) + \sin(\theta/2))$.

当感知角度 $\pi \leq \theta \leq 2\pi$ 时,由于基准位置圆心重合,因此选择框的长、宽一样,即 $l_n^s = w_n^s = 2r$,如图 5(b)中的点划线框所示.

4.3 消耗的能量

当感知角度 $\pi/3 < \theta \leq \pi$ 时, 基准栅栏 Y_{sz}^b 从左到右的第 $i (i=1, 2, \dots)$ 个节点基准位置, 由上下两个点决定. 从下到上的坐标为 $(x_{id}^b, y_{id}^b), (x_{iu}^b, y_{iu}^b)$, 如式(13)、(14)所示.

$$\begin{aligned} x_{id}^b &= x_{sz}^0 + i \times l_n^s + 0.5l_n^s, \\ y_{id}^b &= Y_{sz}^b + \frac{w_n^s}{2} - r \times \cos(\theta/2) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} x_{iu}^b &= x_{id}^b, \\ y_{iu}^b &= Y_{sz}^b + \frac{w_n^s}{2} + r \times \cos(\theta/2) \end{aligned} \quad (14)$$

当感知角度 $\pi < \theta \leq 2\pi$ 时, 只有一个目标位置, $x_{id}^b = x_{iu}^b = x_{sz}^0 + i \times 2r - r, y_{id}^b = y_{iu}^b = Y_{sz}^b + r$ (如图 5(b)所示).

当感知角度 $\pi/3 < \theta \leq \pi$ 时, 针对第 i 个选择框内的节点集合 SN_i 的第 $j (j=1, 2, \dots)$ 个节点, 其坐标仍为 (x_j, y_j) , 两个目标基准位置如式(13)、(14)所示. 求出两种情况下移动欧式距离为 d_j^d, d_j^u , 能量消耗如式(10)、(11)所示.

当感知角度 $\pi \leq \theta \leq 2\pi$ 时, 虽然只有一个目标位置, 但是其感知方向是不一样的, 一个为 $\pi/2$; 一个为 $3\pi/2$, 也就是转动的能耗不一样, 其运动能耗公式与 $\pi/3 < \theta \leq \pi$ 相同.

4.4 竖直栅栏

竖直栅栏的节点选择框(如图 6 所示)的从下到上第 i 选择框内的节点集合 SN_i 内, 第 $j (j=1, 2, \dots)$ 个节点, 设其坐标为 (x_j, y_j) , 当 $\pi/3 < \theta \leq \pi$ 时, 两个基准位置的坐标从左到右位为 $(x_{il}^b, y_{il}^b), (x_{ir}^b, y_{ir}^b)$, 如图 6(a)所示, 用式(15)、(16)所示, Y_{min}^b 参考 3.4 节. 如果节点移动到这两个位置, 其对应的感知方向分别为 $0, \pi$. 求出两种情况下移动距离为 d_j^l, d_j^r (即欧式距离), 所消耗的能量 W_j^l, W_j^r 如式(6)、(7)所示.

$$x_{il}^b = x_{sz}^0 - r \cos(\theta/2), \quad (15)$$

$$y_{il}^b = y_{min}^b + r \sin(\theta/2) \times (2i - 1)$$

$$x_{ir}^b = x_{sz}^0 + r \cos(\theta/2), \quad (16)$$

$$y_{il}^b = y_{ir}^b$$

当 $\pi < \theta \leq 2\pi$ 时, 竖直栅栏的节点选择框的从下到上的第 $i (i=1, 2, \dots)$ 个基准位置由 $(x_{il}^b, y_{il}^b), (x_{ir}^b, y_{ir}^b)$ 决定, 这时候 $x_{il}^b = x_{ir}^b = x_{sz}^0, y_{il}^b = y_{ir}^b = Y_{min}^b + r \times (2i - 1)$, 但是感知方向不一样, 一个为 0 , 一个为 π , 所消耗的能量 W_j^l, W_j^r 仍然可用式(6)、(7)计算.

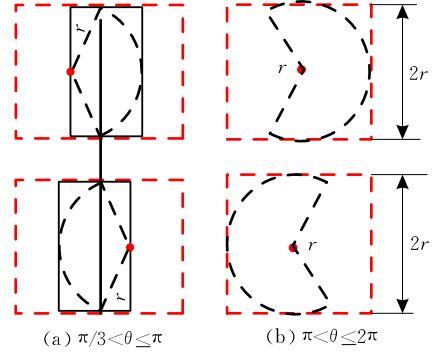


图 6 竖直节点选择框

4.5 当 $\theta = \pi/3$ 时的节点选择框

当感知角度 $\theta = \pi/3$ 时, 由于 $R = 2r \times \sin(\theta/2) = r$, 此时节点选择框的基准位置由 A, B, C, D 共 4 个点决定, 节点在这 4 个位置的感知方向分别为 $0, \pi, \pi/2, 3\pi/2$, 如图 7 所示, 此时节点选择框的长度为 $l_n^s = 2r$, 宽度为 $w_n^s = r + 2r \times \cos(\theta/2)$, 而点 A, B, C, D 的坐标位置由式(4)、(5)、(13)、(14)决定, 运动能耗由式(6)、(7)、(10)、(11)决定. 然后从这 4 个运动能耗中最小的能耗值和对应的节点、对应的位置存储到能量集合 E_i 处. 其余的步骤和 $\theta < \pi/3$ 时一样.

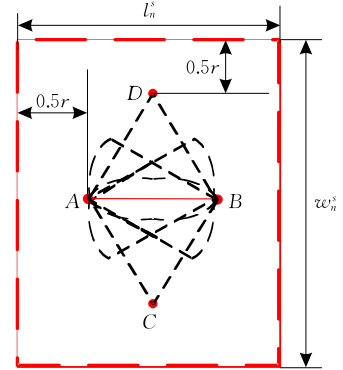


图 7 $\theta = \pi/3$ 时节点选择框

MDNSB 性质 2 的证明如下.

证明. 由式(3.1)可知, 当 $\theta = \pi/3$ 时, 第 i 个和第 $i+1$ 个节点的感知方向可以都与 X 轴方向相同, 如图 7 中以位置 A 为圆心的虚拟扇形, 都为 $\alpha_i = \alpha_{i+1} = 0$; 也可以第 i 个和第 $i+1$ 个节点的感知方向都与 X 轴方向相反, 如图 7 中以位置 B 为圆心的虚拟扇形, 都为 $\alpha_i = \alpha_{i+1} = \pi$, 这两种情况都有 $d(x_i, x_{i+1}) = r$. 如果第 i 个节点感知方向与 X 轴相反, 第 $i+1$ 个节点的感知方向与 X 轴方向相同, 则有 $d(x_i, x_{i+1}) = 0$. 如果第 i 个节点感知方向与 X 轴方向相同, 即 $\alpha_i = 0$, 如图 7 中以位置 A 为圆心的

虚拟扇形,第 $i+1$ 个节点的感知方向与 Y 轴方向相同或相反,如图 7 中以位置 C 为圆心的虚拟扇形,或如图 7 中以位置 D 为圆心的虚拟扇形,则有 $d(x_i, x_{i+1}) = 1.5r$. 如果第 i 个节点感知方向与 X 轴方向相反,如图 7 中以位置 B 为圆心的虚拟扇形,第 $i+1$ 个节点的感知方向与 Y 轴方向相同或相反,如图 7 中以位置 C 为圆心的虚拟扇形,或如图 7 中以位置 D 为圆心的虚拟扇形,则有 $d(x_i, x_{i+1}) = 0.5r$. 如果第 i 个节点感知方向与 X 轴方向相同,即 $\alpha_i = 0$,如图 7 中以位置 A 为圆心的虚拟扇形,第 $i+1$ 个节点的感知方向与 X 轴相反,如图 7 中以位置 B 为圆心的虚拟扇形,则有 $d(x_i, x_{i+1}) = 2r$. 所以当感知角度为 $\theta = \pi/3$ 时, $d(x_i, x_{i+1})$ 可能为 $0, 0.5r, r, 1.5r, 2r$. 证毕.

5 基于有向节点选择框的有向强栅栏构建算法(DSBCSB)设计

Wang 等人考查区域内的所有静态节点,形成栅栏的目标位置,所有的移动节点再匹配这些目标位置,这需要全局拓扑信息,通信和开销较大,要减少通信和计算开销,可以把构造 K -栅栏这个复杂的问题分成小问题,先在小的子区域构造 1MDNSB,这些 1-栅栏合起来就是强 K -栅栏. 在子区域内先选择节点最多的位置作为基准 1MDNSB 的目标位置;再构建节点选择框,选择框内的最优节点移动到此基准位置形成一条 MDNSB. 水平相邻的子区域之间通过竖直栅栏连接起来,形成强 K -栅栏覆盖. 我们称这个算法为 DSBCSB 算法(Directional Strong Barrier Construction Based on Selecting Box).

5.1 算法基本过程

DSBCSB 算法先选择栅栏位置,确定节点的目标位置,再构建节点选择框,选择运动能耗最少的节点移动到目标位置,最后在相邻的子区域之间构建竖直栅栏,形成强 K -栅栏. DSBCSB 算法的基本步骤如下:

(1) 初始化,划分子区域.

先算出总区域形成一条水平横向栅栏需要的节点数目,即 $n = \lceil L/R \rceil$,其中 L 是区域的长度, R 是节点的最大感知半径. 再求出左边 $(V-1)$ 个子区域的所需的节点个数, $m = \lfloor n/V \rfloor$,则第 V 个子区域水平栅栏所需节点数为 $n - m \times (V-1)$. 左边 $(V-1)$ 个子区域长度为 $m \times R$,第 V 个子区域长度为 $L - m \times R(V-1)$.

(2) 确定水平节点目标位置.

如果子区域 A_{sz} 左侧区域不存在栅栏覆盖,采用基准栅栏选取框(宽度 w_b 就是节点选择框的宽度,长度就是步(1)确定的子区域长度)选择基准栅栏位置. 先将节点按照纵坐标的大小排序,从子区域 A_{sz} 下边界开始,将栅栏基准位置选取框依次向上移动,移动至上边界为第一个节点的纵坐标处(如图 8(a)所示的虚线位置). 记录每个栅栏基准位置和选取框中的传感器节点数量. 当栅栏基准位置 $Y_q = y_{sz}^{\max} - w_b$ ($y_{sz}^{\max}$ 为子区域的最大纵坐标)时,停止移动,选择节点数最多的位置作为基准栅栏位置,记作 Y_{sz}^b . 对应的节点数为 N_{sz}^b .

(3) 确定竖直节点目标位置.

如果子区域 A_{sz} 左侧区域存在栅栏覆盖,对于基准栅栏位置 Y_{sz}^b ,其节点的目标位置除了水平目标位置,还要选取相应的竖直目标位置. 设子区域 A_{sz} 左侧栅栏位置为 $Y_{s(z-1)}^b$,则竖直目标位置个数为 $p = |Y_{s(z-1)}^b - Y_{sz}^b|$,例如在图 8(b)所示,水平栅栏所需的节点个数 $m=6$,子区域 A_{sz} 左侧区域的栅栏位置为 $Y_{s(z-1)}^b$,针对 $Y_{sz}^b = 0$ 基准栅栏位置,相邻栅栏位置的竖直目标位置差 $p=3$, $m+p=9$,目标位置为 $G_t = (g_1, \dots, g_6, \dots, g_8, g_9)$,其中 (g_7, g_8, g_9) 为连接相邻水平栅栏的竖直栅栏位置.

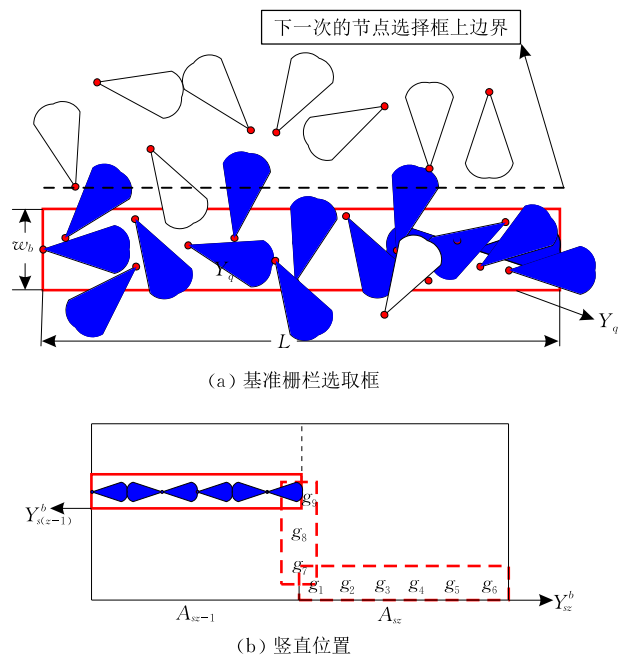


图 8 栅栏位置

(4) 为每个目标位置构建 DNSB.

为每个目标位置设定有向节点选择框 DNSB,其为长方形, $l_n^s = 2r$, $w_n^s = r$.

(5) 计算 DNSB 内移动节点的能耗。

计算 DNSB 内每个移动节点可能的运动能耗 W_j^d, W_j^u , 感知方向为水平方向时, 采用式(6)、(7); 感知方向为竖直方向时, 采用式(10)、(11)。

(6) 选出移动节点运动到相应的目标位置。

在有向节点选择框内还没有被选中的节点中, 选择运动能耗最小的节点移动到目标位置, 感知方向调整为相应的方向, 或者与 X 轴方向一致, 或者与 X 轴的负方向一致, 或者与 Y 轴方向一致, 或者与 Y 轴的负方向一致. 如果 DNSB 内没有节点, 转到步(7)。

(7) 扩展 DNSB.

如果节点选择框内没有节点, 要对节点选择框进行扩展, 为了保证基准位置圆心尽可能处于正方形中心, 上下左右都扩大 $0.5r$, $l_n^s = 3r$, $w_n^s = 2r$. 转到步(5)。

(8) 构建 K 条有向强栅栏。

在每个子区域中, 都执行一遍步(1)~(7), 构建 K 条有向强栅栏。

DSBCSB 算法详细过程如算法 1.

算法 1. DSBCSB 算法.

输入: K, V, N, R

输出: K -栅栏覆盖, 总能耗, 平均能耗.

1. 把整个感兴趣区域分成 $K \times V$ 子区域.
2. FOR 每个子区域
3. 用基准栅栏选取框选择节点数最多的基准栅栏位置;
4. IF 当前子区域的左侧有基准栅栏
5. 确定竖直栅栏位置;
6. END
7. FOR $i = 1, m + p$
8. 确定第 i 个节点位置;
9. 确定节点选择框;
10. IF 框内没有节点
11. 扩大选择框面积;

12. END
13. 节点感知方向是水平的根据式(6)和(7)计算框内节点最小运动能耗; 节点感知方向是竖直的, 根据式(10)和(11)计算框内节点最小运动能耗;
14. 能耗最小的节点运动到目标位置;
15. 统计节点能耗, 移动节点数;
16. END
17. 采用节点选择框算法构建竖直栅栏;
18. 并统计节点能耗, 移动节点数;
19. END
20. 计算节点平均能耗;

5.2 算法的复杂性分析

在感兴趣区域中, DSBCSB 算法要形成强 K -栅栏的目标位置最大个数为 $\frac{L+W}{r} \times K$, 也就是要有这些选择框来选择节点移动到目标位置, 选择框长度为 $l_n^s = 2r$, 宽度 $w_n^s = r$, 面积 $A_s = 2r^2$, 选择框内的节点个数为 $2\rho \times r^2$, 则此算法的时间复杂度为 $O(2\rho \times r \times (L+W) \times K)$. 由于每一个选择框都要有一个节点运动到目标位置, 总能耗为所有运动节点的能耗之和. 密度越大, 在一个选择框内节点数越多, 算法的复杂度越高. 栅栏数越多, 算法的复杂度, 算法的能耗越高. 所以在给定的区域内, 算法的复杂度, 能耗主要和密度 ρ , 栅栏数 K 有关. 下面的仿真也主要从这几个方面去衡量算法的性能.

当 $\theta > \pi/3$ 时, DSBCSB 算法的时间复杂度为 $O(2\rho \times R \times (L+W) \times K)$.

6 仿真结果

本文运用 Matlab7.0 对此算法进行仿真, 如果没有特别指明, 实验的默认参数如表 2 所示. 我们选取了文献[13]中的优化算法、strong greedy 算法与本文中的 DSBCSB 算法进行了仿真比较。

表 2 实验参数

参数	监测区域面积/ m^2	栅栏数 K	感知角度 θ	水平分区 V	感知半径 r	节点分布密度 ρ
取值范围	300×200	2	$\pi/4$	3	10	0.005

默认参数下的随机分布图、DSBCSB 算法、strong optimal 算法仿真结果如图 9、图 10、图 11 所示. 可以看出 DSBCSB 算法形成的两条栅栏分别用了 34、43 个节点, strong optimal 算法形成两条栅栏分别用了 50、62 个节点. DSBCSB 算法显著降低了需求的节点个数, 可以用尽量少的节点达到同样的

栅栏覆盖效果. 而随机部署的节点可能互相重叠, 在 strong optimal 算法中, 先根据节点分布情况选择最佳的基准栅栏, 基准栅栏中的节点不动, 相邻节点之间的空洞与周围的移动节点形成最佳匹配, 构建栅栏. 而在 DSBCSB 算法中, 先确定构建栅栏的节点目标位置, 再用节点选择框在这个目标位置周围选

择最优节点移动到目标位置,构建栅栏. DSBCSB 算法不仅考虑了节点的移动,也考虑了节点的转动,减少了栅栏中节点之间的重叠面积,从而 DSBCSB 算法要比 strong optimal 算法更优.

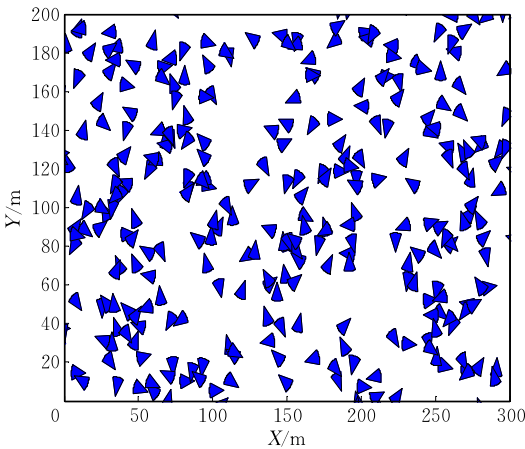


图 9 节点随机分布图

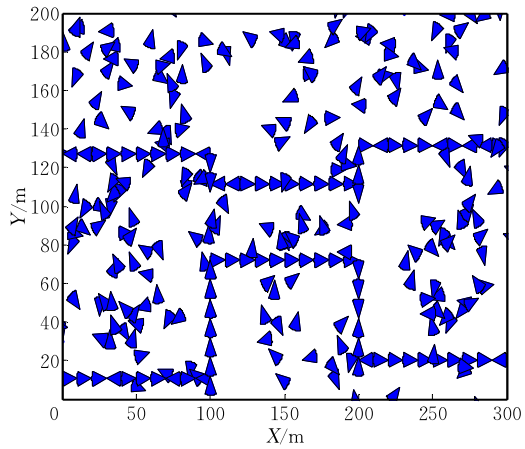


图 10 DSBCSB 算法仿真结果

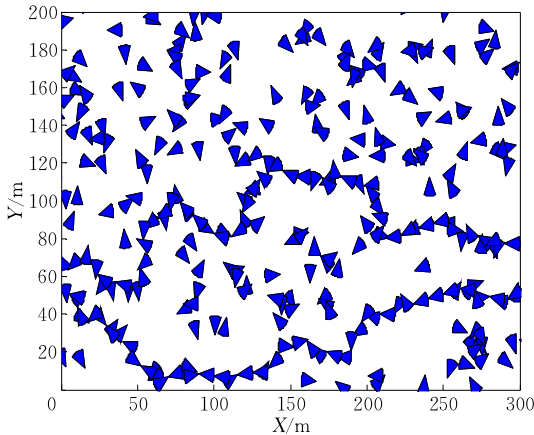


图 11 strong optimal 算法

6.1 节点密度对结果的影响

由于 strong optimal 算法、strong greedy 算法对于节点数量的要求比较高,在保证能形成栅栏的前提下,尽可能地减少节点密度来体现算法的优劣

性,因此本文采用 0.003 的起始节点密度进行仿真比较. 节点总能耗,平均能耗,建立 2-栅栏需求的节点数分别如图 12、图 13、图 14 所示. 从图中可以发现,3 种算法的总能耗与传感器节点的平均能耗均随着节点密度的增加而明显减少,同样的密度下,DSBCSB 算法的节点平均能耗则明显地低于其他两种算法. 在密度为 0.007 时,平均能耗降低了 50% 左右. 这是因为在高密度下,可选择的节点增多从而降低能耗. 在传感器数量方面,strong optimal 算法和 strong greedy 算法的传感器使用数量随着节点密度的增加而正比例增加,密度越大,这两种算法需求的节点数增加的越快,DSBCSB 算法则基本保持不变且明显低于其他两种算法,最多可节省 50% 的节点数量.

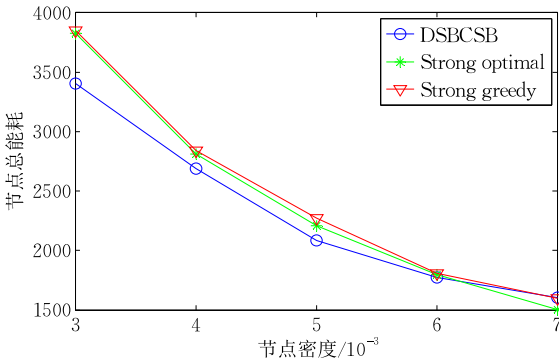


图 12 节点密度 VS 节点总能耗

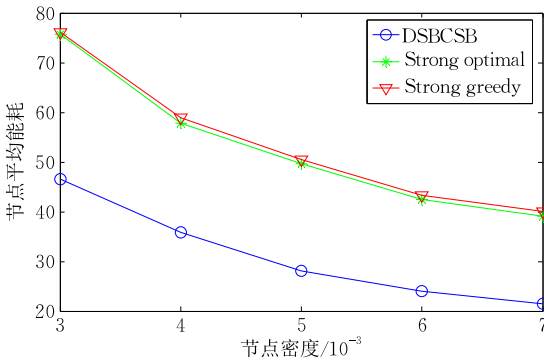


图 13 节点密度 VS 节点平均能耗

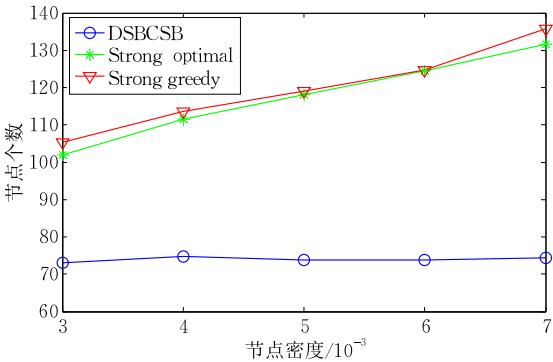


图 14 节点密度 VS 形成栅栏所需节点个数

6.2 栅栏数量对结果的影响

不同的栅栏数量 K 对仿真结果的影响,节点总能耗、平均能耗、建立 2-栅栏需求的节点数分别如图 15、图 16、图 17 所示. 从图 15 中可以发现,而当 K 大于 1 时,DSBCSB 算法的节点总能耗远远低于其他两种算法. 栅栏数越多,DSBCSB 算法的性能越好,总能耗,平均能耗下降越多,最多可分别下降 50%,70%左右,从图 17 可以发现,随着 K 的增加,DSBCSB 算法的传感器节点的需求量越来越明显

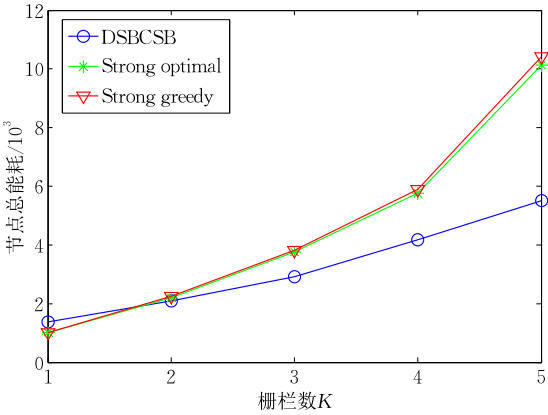


图 15 栅栏数 VS 节点总能耗

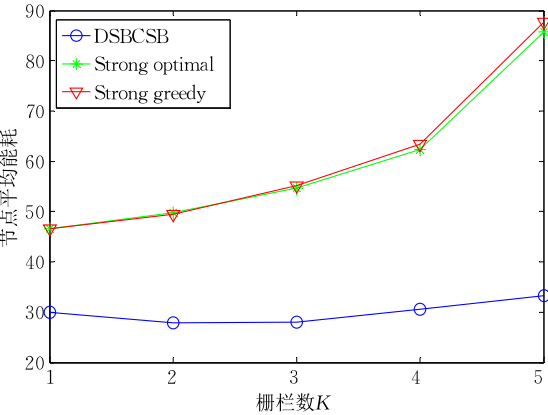


图 16 栅栏数 VS 节点平均能耗

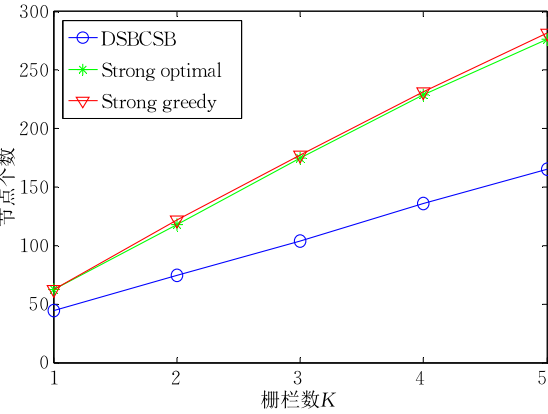


图 17 栅栏数 VS 形成栅栏所需节点个数

低于其他两种算法,当栅栏数为 5 的时候,DSBCSB 算法仅需要 160 个节点左右, strong optimal 算法、strong greedy 算法则都需要 280 个节点, DSBCSB 算法比其他两种算法节省了 40% 的节点.

6.3 水平分区对结果的影响

在 DSBCSB 算法中,水平分区数对节点总能耗,平均能耗,建立 2-栅栏需求的节点数的影响分别如图 18、图 19、图 20. 仿真结果表明,随着水平分区数量的增加,传感器节点总能耗、平均能耗、所需

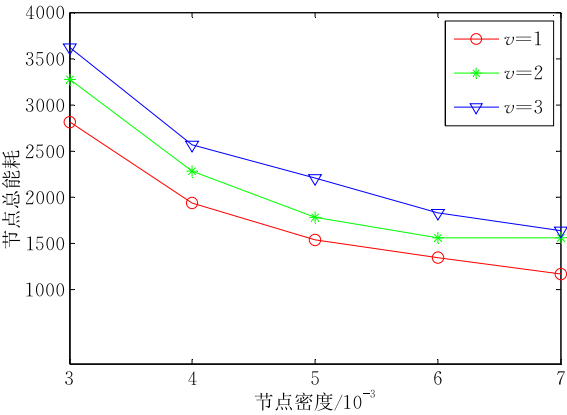


图 18 V 值 VS 节点总能耗

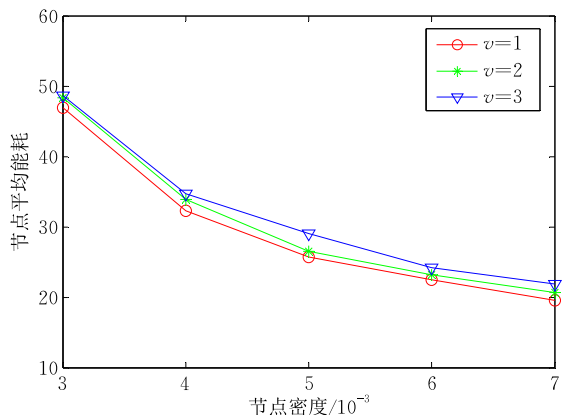


图 19 V 值 VS 节点平均能耗

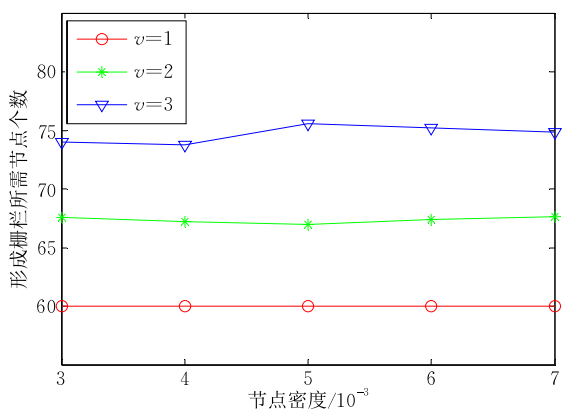


图 20 V 值 VS 形成栅栏所需节点个数

的传感器节点数量都有所上升. 通过分析我们发现, V 的增加导致水平方向的子区域增加, 而子区域的增加则使栅栏竖直方向上的节点数目也相应的增加, 最终导致节点总能耗与平均能耗增加. 不过子区域的划分可以有效的降低通信开销, 如果考虑通信开销的优先级高于能耗, 则分区对于算法是必要的.

6.4 传感器感知角度对结果的影响

当传感器感知角度 $\pi/3 < \theta \leq \pi$, 感知角度的变化会带来节点最大感知距离的变化. 因此, 在这种情况下, 本文选取了不同的感知角度进行仿真, 仿真结果如图 21、图 22、图 23 所示. 从图 21 可以发现, 随着感知角度的增加, 由于最大感知距离相应的增加, 传感器节点的总能耗和形成栅栏所需传感器个数均不断降低, 最终趋于平稳. 这是因为传感器节点的最大感知距离的增加能减少所需的传感器节点数目, 进而导致传感器节点的总能耗降低.

图 16 表明, 当感知角度在 $\theta < \pi/3$ 时, 平均能耗在 30J 左右, 而在图 22 中, 当感知角度在 $\theta = \pi/3$ 时, 节点的平均能耗降为 24J 左右, 瞬间比感知角度小于 $\pi/3$ 时的平均能耗降低 20% 左右. 这是因为当感知角度在 $\theta = \pi/3$ 时, 可选目标位置的增多导致能耗的降低. 从图 22 还可以发现, 当 $\theta > \pi/3$ 时, 节点的平均能耗均比 $\theta < \pi/3$ 时少. 因为当 $\theta > \pi/3$ 时, 相邻节点选择框之间不存在重叠区域, 减少了相邻节点选择框之间节点重复选择的概率, 而且此时节点选择框的宽度也随着角度的增加慢慢增大使得节点选择框内可选节点增多, 从而降低了节点的平均能耗.

图 22 还表明, 随着感知角度的增加, 传感器平均能耗则先降低, 到达最低以后, 则不断增加. 根据几何理论及其图 3(c) 可知, 在一个矩形区域内的垂直平分线上, 距离中心点较近的两个四等分点是两个最佳的目标点, 相比于其他目标点, 这个区域内随机分布的点到这两个目标点取到最短距离的概率最大. 当 $\theta = \pi/3$ 时, 目标点距离这两个四等分点较远, 随着感知角度的逐渐增大, 目标点逐渐靠近这两个四等分点, 平均能耗也慢慢降低, 当感知角度 $\theta = \pi/2$ 时, 目标点就是这两个四等分点, 这个时候平均能耗也达到最低, 随着感知角度的继续增大, 目标点又慢慢远离着两个四等分点, 导致平均能耗随着角度的增大又慢慢增加. 仿真结果表明, 当 $\theta = \pi/2$ 时, $K=1, 2, 3$ 对应的节点平均能耗分别为 22.4688J、21.9679J、21.9812J, 均小于感知角度为 80° 与 100° 时的节点平均能耗, 验证了分析的正确性.

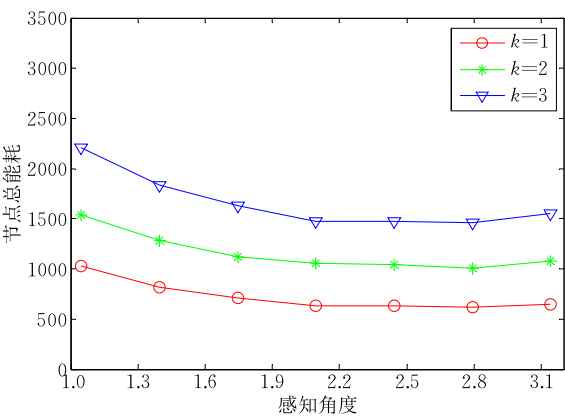


图 21 感知角度 VS 节点总能耗

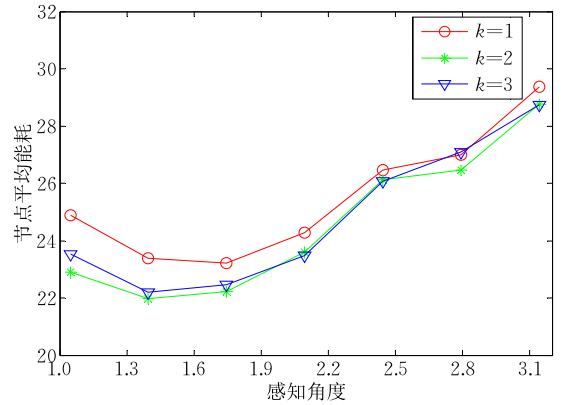


图 22 感知角度 VS 节点平均能耗

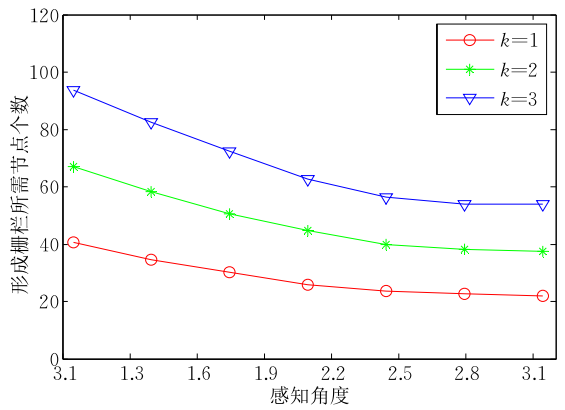


图 23 感知角度 VS 形成栅栏所需节点个数

7 结 论

本文主要研究有向强 K -栅栏覆盖构建方法 DSBCSB. 创建了有向强栅栏模型 MDNSB, 使节点的最大感知距离在栅栏方向. 采用包括转动能耗和移动能耗的有向节点能耗模型, 运用节点选择框选择能耗最少的有向移动节点移动到目标位置, 水平相邻的两个 MDNSB 之间采用竖直栅栏连接, 形成

1 条 MDNSB. K 条 MDNSB 构成有向强 K -栅栏覆盖. 仿真结果证明,DSBCSB 可以用最少的节点,高效节能的构建 K -栅栏.

本文仅是在 0-1 感知模型下研究有向栅栏,在概率感知模型下如何构建有向栅栏是下一步要研究的内容.

参 考 文 献

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

[2] Kumar S, Lai T H, Arora A. Barrier coverage with wireless Sensors//*Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. Cologne, Germany, 2005: 284-298

[3] Tian Jie, Zhang Wen-Sheng, Wang Gui-Ling, Gao Xin. 2D K -barrier duty-cycle scheduling for intruder detection in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2014, 4(3): 31-42

[4] Ban Dong-Song, Wen Jun, Jiang Jie, Dou Wen-Hua. Constructing K -barrier coverage in mobile wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2011, 22(9): 2089-2103(in Chinese)
(班冬松, 温俊, 蒋杰, 窦文华. 移动无线传感器网络 K -栅栏覆盖的构建算法. *软件学报*, 2011, 22(9): 2089-2103)

[5] Wang Z B, Chen H L, Cao Q, et al. Fault tolerant barrier coverage in Wireless Sensor Networks//*Proceedings of the IEEE INFOCOM*. Toronto, Canada, 2014: 1869-1877

[6] He S B, Chen J M, Li X, et al. Cost-effective barrier coverage by mobile sensor networks//*Proceedings of the IEEE*

INFOCOM. Orlando, USA, 2012: 819-827

[7] Saipulla A, Liu B Y, Xing G L, et al. Barrier coverage with sensors of limited mobility//*Proceedings of the ACM MobiHoc*. Chicago, USA, 2010: 201-210

[8] Ma H, Yang M, Li S, et al. Minimum camera barrier coverage in wireless camera sensor networks//*Proceedings of the IEEE INFOCOM*. Orlando, USA, 2012: 217-225

[9] Tao D, Tang S, Zhang H, et al. Strong barrier coverage in directional sensor networks. *Computer Communications*, 2012, 35(8): 895-905

[10] Zhang L, Tang J, Zhang W. Strong barrier coverage with directional sensors//*Proceedings of the IEEE GlobeCom*. Honolulu, USA, 2009: 1-6

[11] Wang Y, Cao G. Barrier coverage in camera sensor networks //*Proceedings of the ACM MobiHoc*. Paris, France, 2011: 12

[12] Wang Z B, Liao J L, Cao Q, et al. Barrier coverage in hybrid directional sensor networks//*Proceedings of the IEEE MASS*. Hangzhou, China, 2013: 222-230

[13] Wang Z B, Liao J L, Cao Q, et al. Achieving k -barrier coverage in hybrid directional sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, 13(7): 1443-1455

[14] Shih K-P, Chou C-M, Liu I-H, Li C-C. On barrier coverage in wireless camera sensor networks//*Proceedings of the 24th IEEE ATMA*. Perth, England, 2010: 873-879

[15] Tao Dan, Chen Hou-Jin. Strong barrier coverage detection algorithm for directional field of view sensor networks. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2010, 35(5): 8-11(in Chinese)
(陶丹, 陈后金. 视角受限传感器网络强栅栏覆盖判定算法. *北京交通大学学报*, 2010, 35(5): 8-11)

[16] Guvensan A, Yavuz G. Hybrid movement strategy in self-orienting directional sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(3): 1075-1090



FAN Xing-Gang, born in 1974, Ph. D., associate professor. His main research interests include wireless sensor network, Internet of Things and big data.

WANG Chao, born in 1993. His main research interests include wireless sensor network, Internet of Things and big data.

Background

Barrier coverage construction for directional sensors with limited sensing angles is a new topic. In this paper, we study distributing K -barrier coverage construction using

YANG Jing-Jing, born in 1990, M. S. candidate. His main research interests include wireless sensor network, Internet of Things and big data.

REN Yong-Mo, born in 1994. His main research interests include wireless sensor network, Internet of Things and big data.

CHE Zhi-Cong, born in 1995. His main research interests include wireless sensor network, Internet of Things and big data.

mobile directional sensor. There are some studies about directional barrier. Ma studied the minimum camera barrier coverage problem in camera sensor networks. Tao investigated

the problem of finding appropriate orientations of directional sensors such that they can provide strong barrier coverage. Zhang studied the strong barrier coverage problem for rotationally directional sensors. Wang et al. further built up directional sensor arrays to form a barrier to detect and localize intruders. Zhibo Wang proved that determining the minimum number of mobile sensors required to form K -barrier coverage is related with finding k vertex-disjoint paths with the minimum total length on the Weighted Barrier Graph (WBG).

These research on directional barrier or only considered node rotation or only node mobility, there are no barrier construction scheme that considers both mobility and rotation until now. On the other hand, it can decrease time complexity to choose nodes on the outskirts of target in barrier location. This paper proposed Directional Strong Barrier Construction based on Selecting Box (DSBCSB) scheme that considers how to use the mobility and rotating ability of mobile node on the outskirts of barrier target to efficiently build strong K -barrier coverage. Its contributions are as follows:

(1) The problem of Strong Barrier of Minimum Directional Node (MDNSB) construction is proposed. Target location of directional node is determined by 2 key points in strong barrier; there are only 2 sensing directions for all nodes in barrier; the same and the opposite direction of barrier.

(2) Directional node energy consumption model is created. This model is composed of energy consumption of nodes moving from initial location to target and rotating sensing direction. Now it is the energy consumption and is no longer just displacement that evaluates the performance of the algorithm.

(3) Directional Strong Barrier Construction based on Selecting Box (DSBCSB) is proposed, this scheme creates a novel directional node selection box with target location of directional node as center in barrier location, the mobile node with minimum energy consumption in this selecting box on the outskirts of target location is selected to build barrier.

Simulation results show that it could build up barrier with lower energy consumption.