

## 多障碍场景的有向传感器网络覆盖优化算法

李 娜, 向凤红, 毛剑琳, 戴 宁, 段绍米

(昆明理工大学信息工程与自动化学院, 昆明 650500)

**摘 要:** 针对监控区域中存在障碍物的情况, 引入一种避障策略, 提出基于虚拟势场的传感器网络覆盖优化算法。该算法基于有向感知模型, 通过重叠覆盖区域、有效覆盖区域和障碍物遮挡区域之间虚拟力的相互作用, 调整节点的传感方向, 逐步消除网络中的重叠覆盖区域和障碍物遮挡区域, 并根据分布在边界区域的边界节点进行改进, 通过在边界线上增加一个虚拟邻居节点, 实现有向传感器网络的覆盖性能增强, 并分析传感器参数对覆盖率的影响。仿真结果表明, 在有障碍物的情况下, 该算法可有效提高网络覆盖率。

**关键词:** 有向传感器网络; 有向感知模型; 虚拟势场; 避障策略; 边界处理; 覆盖优化

**中文引用格式:** 李 娜, 向凤红, 毛剑琳, 等. 多障碍场景的有向传感器网络覆盖优化算法[J]. 计算机工程, 2015, 41(4): 19-25.

**英文引用格式:** Li Na, Xiang Fenghong, Mao Jianlin, et al. Coverage Optimization Algorithm of Directional Sensor Network in Multi-obstacles Scene[J]. Computer Engineering, 2015, 41(4): 19-25.

## Coverage Optimization Algorithm of Directional Sensor Network in Multi-obstacles Scene

LI Na, XIANG Fenghong, MAO Jianlin, DAI Ning, DUAN Shaomi

(Faculty of Information Engineering & Automation, Kunming University of Science & Technology, Kunming 650500, China)

**【Abstract】** Aiming at the presence that obstacles exist in the monitored area, introducing a kind of obstacle avoidance strategy, this paper puts forward a PCMOD (Potential field based Coverage optimization algorithm to multi-obstacle scene for directional sensor networks). The algorithm is based on the directional sensing model, by means of overlapping coverage area, the effective coverage and virtual force of interaction between obstacles block area, adjusts node sensing direction and gradually eliminates the network of overlapping coverage and blind area, and improves the boundary condition by adding a neighbor node in the boundary line, makes sensor network coverage enhancement. On this basis, it analyzes the impact of sensor parameters on coverage rate. Simulation results show that the proposed algorithm can improve coverage rate in obstacle situation.

**【Key words】** directional sensor network; directional sensing model; virtual potential field; obstacle avoidance strategy; boundary processing; coverage optimization

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-3428.2015.04.004

### 1 概述

无线传感网络需要大量传感器节点协同完成测量任务, 同时也面临着复杂多变的工作环境<sup>[1]</sup>。根据不同环境合理布置节点, 有利于提高无线传感网络的工作效率<sup>[2-3]</sup>。传感器网络大都采用随机部署方式, 但是这种大规模随机部署方式极易导致传感器网络覆盖的不合理, 进而形成感知重叠区和盲区。因此, 在传感器网络初始部署后, 对其网络覆盖结构

进行优化具有重大意义<sup>[4-6]</sup>。

虚拟势场<sup>[7]</sup>是解决传感器网络的覆盖问题的典型方法之一。文献[8]首先将虚拟势场方法引入到传感器网络的覆盖增强问题中。文献[9]于 2005 年提出有向传感器的概念以及一种方向可调的有向感知模型。在此基础上, 文献[10]提出了基于虚拟势场有向传感器网络覆盖增强算法, 通过引入“扇形质心”的概念, 将覆盖增强问题转换为质心均匀分布问题。文献[11]在虚拟斥力的基础上, 提出了一种基

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61163051); 云南省应用基础研究基金资助项目(2009ZC050M)。

**作者简介:** 李 娜(1990-), 女, 硕士研究生, 主研方向: 无线传感器网络; 向凤红、毛剑琳, 教授; 戴 宁, 硕士研究生; 段绍米, 助理实验师。

**收稿日期:** 2014-03-04 **修回日期:** 2014-05-29 **E-mail:** 970848001@qq.com

于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法的改进,该算法针对网络中边界区域节点受力模型,引入虚拟节点,同时提出自调整角度机制,在监控区域无障碍情况下能够快速消除网络中的覆盖重叠区和盲区,大幅度提高覆盖率。文献[12]针对监控环境中存在障碍物的情况,研究了无线视频传感器网络中节点监视方向的自主调整技术,通过节点间信息交互来调整监视方向来提高网络覆盖性能。文献[13]从无线传感器节点的有向传感器节点的有向感知特性出发,讨论了视频传感器网络覆盖性能与监测区域间的相互联系,提出一种无盲区覆盖模型的覆盖率动态优化算法,该算法设计了节点运动规则来优化视频传感器网络的覆盖率。但是以上算法中,没有考虑存在障碍物的情况,或是有障碍物的情况下没有有效提高网络覆盖性能,此外,分布在边界区域的节点通过以上算法的调整后没有达到较为理想的覆盖优化效果。

本文针对多障碍物的监控区域,提出一种面向多障碍场景的有向传感器网络覆盖优化算法 PCMOD,通过覆盖重叠区域、有效覆盖区域和障碍物区域之间虚拟力的相互作用,设计了一种避障策略。

## 2 节点感知模型及障碍区域覆盖问题描述

### 2.1 有向感知模型

有向传感器节点的感知区域为一个以节点为圆心、感知距离为半径的扇形区域,节点的主感知方向可调,可以覆盖到感知半径内的整个圆形区域。

有向感知模型<sup>[6]</sup>可用一个四元组  $(S_i, R, \mathbf{V}, \varphi)$  表示。如图 1 所示,  $S_i(x_i, y_i)$  示有向传感器节点的位置坐标;  $R$  表示节点感知半径; 单位向量  $\mathbf{V}(t)$  为节点在  $t$  时刻的感知方向;  $\varphi$  表示节点感知夹角,  $\alpha = 2\varphi$  为传感区域视角。特别地,当  $\varphi = \pi$  时,传统的全向感知模型是有向感知模型的一个特例。在无障碍物情况下,传感器节点  $S_i$  所能覆盖到的区域面积为  $\delta_i$ , 且  $\delta_i = \frac{1}{2}\alpha R^2$ 。

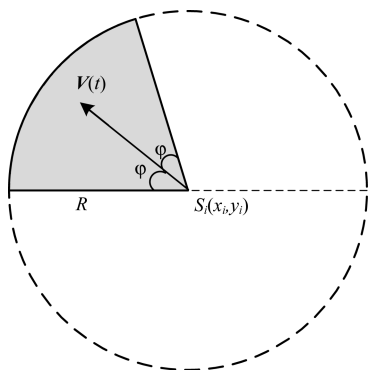


图 1 有向感知模型

### 2.2 障碍区域及重叠区域的定义及分析

在实际监控区域中,通常存在多个障碍物,若传感器节点与障碍物相交,则通信中断。此外,多个传感器节点的覆盖区域会存在相互重叠区域。

节点的监控区域覆盖范围关系如图 2 所示。

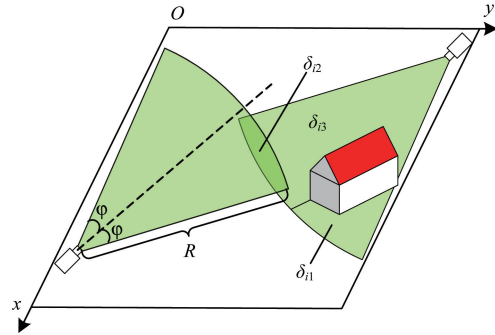


图 2 传感器节点的二维视角图

为方便描述,本文做如下定义:

**定义 1** 在监控区域  $U$  中,出现的障碍物所构成的集合记为  $W$ ,且区域中的点  $S(x, y) \in W$  均能遮挡与其相交的监控区域。

**定义 2** 在监控区域  $U$  中,若节点  $S_i$  的监控区域受到障碍物遮挡,即  $\exists W \cap \delta_i \neq \emptyset$ ,则称障碍物区域为  $\delta_{i1}$ 。

**定义 3** 在监控区域  $U$  中,若节点  $S_i$  与其邻居节点覆盖区域存在重叠,则称重叠覆盖区域为  $\delta_{i2}$ ,且:

$$\delta_{i2} = \bigcup_{j=1, j \neq i}^n ((\delta_i - \delta_{i1}) \cap (\delta_j - \delta_{j1})) \quad (1)$$

**定义 4** 在监控区域  $U$  中,若节点  $S_i$  除去其所有障碍物区域、重叠覆盖区域的剩余区域,称为有效覆盖区域  $\delta_{i3}$ ,且:

$$\delta_{i3} = \delta_i - \delta_{i1} - \delta_{i2} \quad (2)$$

**定义 5** 在监控区域  $U$  中,若节点  $S_i$  除去其所有障碍物区域、重叠覆盖区域、有效覆盖的剩余区域,称为无效覆盖区域。

### 2.3 障碍区域覆盖增强问题描述

在研究本文内容之前,先做如下必要假设:

- (1) 网络中所有节点同构,且满足有向感知模型;
- (2) 网络中所有节点一经部署,位置固定不变,但其传感方向可调;
- (3) 网络中所有障碍物位置固定不变;
- (4) 网络中各节点都了解自身位置及传感方向信息,且各节点对自身传感方向可控<sup>[14]</sup>。

假设监控区域  $U$  为二维平面,在该区域部署  $N$  个有向传感器节点,节点集表示为  $S_i \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ , 其中,  $S_i = \{x_i, y_i, R, \varphi\}$  表示以节点坐标  $\{x_i, y_i\}$  为圆心,感知半径为  $R$ ,感知夹角为  $\varphi$  的扇形区域。将监控区域离散化为  $m$  个像素点,像素点的坐标为  $\{x, y\}$ ,其像素大小由求解精度决定。像素点

$K(x,y)$ 被有向传感器节点  $S_i(x_i, y_i)$  覆盖需满足以下2个条件:

(1) 像素点  $K$  到节点  $S_i$  的欧氏距离小于等于感知半径  $R$ ;

(2)  $\overrightarrow{S_i K}$  与  $V$  间夹角取值属于  $[-\varphi, \varphi]$ 。

像素点  $K(x,y)$  被传感器节点  $S_i(x_i, y_i)$  覆盖的概率记为  $P_c$ :

$$P_c = \begin{cases} 1 & \begin{cases} d(S_i, K) \leq R, d(S_i, K) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \\ \overrightarrow{S_i K} \times V \geq d(S_i, K) \times \cos \phi \end{cases} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $d(S_i, K)$  代表像素点  $K$  到节点  $S_i$  的欧氏距离; 当像素点  $K(x,y)$  被传感器节点  $S_i(x_i, y_i)$  覆盖时,  $P_c = 1$ , 否则,  $P_c = 0$ 。

在监控区域  $U$  中, 被  $S_i \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$  覆盖的像素点总和为每个像素点被  $S_i$  覆盖概率之和  $\sum_{i=1}^m P_c(i)$ , 将网络的区域覆盖率  $P_f$  定义为  $U$  中被  $S_i$  覆盖的像素点总和与监控区域离散化的总的像素点  $m$  之比:

$$P_f = \frac{\sum_{i=1}^m P_c}{m}, K(x,y) \notin W \quad (4)$$

设在监控区域  $U$  和障碍物  $W$  确定的情况下,  $t = 0$  时刻初始随机部署后, 区域初始覆盖率为  $P_0$ 。将覆盖优化问题定义为: 对于一组初始的感知方向  $(V_1(t), V_2(t), \dots, V_N(t))$  的初始覆盖率  $P_0$ , 求解一组优化后的感知方向  $(V_1^*(t), V_2^*(t), \dots, V_N^*(t))$  的区域覆盖率  $P_f$ , 使得覆盖率增大量  $\Delta P$  的取值接近最大, 其中:  $\Delta P = P_f(V_1^*(t), V_1^*(t), \dots, V_1^*(t)) - P_0(V_1(t), V_2(t), \dots, V_N(t))$ 。

### 3 基于虚拟势场的多障碍物覆盖优化算法

本文首先对基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法进行试验仿真, 结果表明在无障碍物情况下, 该算法对于边界区域节点的调整有一定的缺陷, 影响了网络的整体覆盖率; 此外, 节点转动角速度的局限性也限制了算法的有效性。

针对以上问题, 在监控区域存在障碍物的情况下, 设计了一种基于虚拟势场的节点避障策略来减小障碍物对网络覆盖率的消极影响, 并对边界情况进行改进, 提高了网络覆盖性能。

#### 3.1 虚拟势场方法

虚拟势场的基本思想是把有向传感器网络中每一个节点看作一个虚拟电荷, 每个节点受到其他节点的虚拟斥力作用, 同时向目标区域的其它区域扩散,

最终实现有向传感器网络在目标区域的充分覆盖。

当监控区域存在障碍物时, 不同的监测区域有不同的质心。设非空指定区域  $\delta$  的质心点为  $G(\delta)$ , 通过离散化方法求解质心点的位置坐标, 公式如下:

$$G(\delta) = G\left(\frac{\sum_{S(x,y) \in \delta} x}{\text{num}(\delta)}, \frac{\sum_{S(x,y) \in \delta} y}{\text{num}(\delta)}\right) \quad (5)$$

其中,  $\text{num}(\delta)$  为区域  $\delta$  中离散点的个数。

如图3所示, 传感器节点  $S_i$  与  $S_j$  的欧氏距离小于2倍的感知半径, 则称节点  $S_i$  与  $S_j$  互为邻居节点。重叠覆盖区域  $\delta_{i2}$  的质心为  $G(\delta_{i2})$ , 有效覆盖区域  $\delta_{i3}$  的质心为  $G(\delta_{i3})$ 。

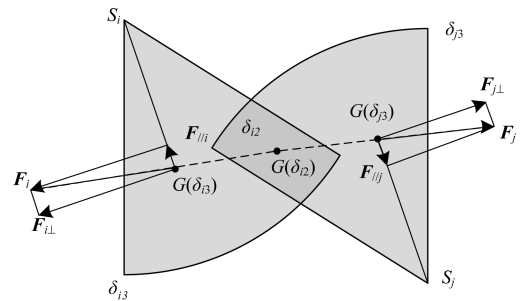


图3 重叠覆盖区域虚拟受力分析

由于节点  $S_i$  与  $S_j$  存在重叠覆盖区域, 即  $\delta_{i2} \neq \phi$ , 此时, 斥力存在于重叠覆盖区域质心  $G(\delta_{i2})$  与有效覆盖区域质心  $G(\delta_{i3})$  之间, 记为  $F_i$ , 定义斥力  $F_i$  如下:

$$F_i = \frac{1}{\eta} \times d_0 \times |F_i| \times \lambda_0 \quad (6)$$

其中,  $\eta$  为引入的权重因子——有效覆盖率, 即节点的有效覆盖区域与重叠覆盖区域的比值,  $\eta = \frac{\delta_i - \delta_{i2}}{\delta_{i2}}$ ;  $d_0$  为质心点  $G(\delta_{i2})$  到  $G(\delta_{i3})$  的欧氏距离;  $|F_i|$  为单位排斥力;  $\lambda_0$  为节点所受虚拟斥力的方向, 从  $G(\delta_{i2})$  指向  $G(\delta_{i3})$ 。

在有向传感器网络的转动模型中, 由于节点位置不变, 因此斥力分量  $F_{i//}$  不起作用, 质心点仅受合力沿圆周切线方向的斥力分量  $F_{i\perp}$  的影响, 即斥力分量  $F_{i\perp}$  导致监控方向沿圆周切线方向绕节点中心旋转, 旋转角度  $\beta_{S_i \rightarrow S'_i}$  计算公式如下:

$$\beta_{S_i \rightarrow S'_i} = \beta_{\max} \left[ \frac{\min(F_{i\perp}, F_{i\max})}{F_{i\max}} \right]^2 \quad (7)$$

其中,  $\beta_{\max}$ 、 $F_{i\max}$  为常数, 分别用来限制旋转角度和斥力的最大值。当节点受力较大时, 能够快速收敛到较优情况, 当节点受力较小时, 能够通过微调来逐渐趋向最优值。

当斥力分量  $F_{i\perp}$  趋近于0时, 转动停止, 节点到达理想位置。为了避免优化最后阶段发生往复振荡, 本文设定受力门限  $\varepsilon$ , 当虚拟斥力小于  $\varepsilon$  时, 则认



为该节点下一时刻无需再转动。

### 3.2 节点避障策略

针对监控区域中存在多个障碍物的情况,本文 PCMOD 算法提出了一种基于虚拟势场的节点避障策略,即障碍物遮挡区域质心与有效覆盖区域质心之间产生的虚拟力,能够使节点沿圆周切线方向绕节点中心旋转一定的角度来避开障碍物的遮挡,以此提高网络的覆盖性能。

如图 4 所示,当传感器节点  $S_i$  与障碍物  $W_1$  相交,则通信中断。

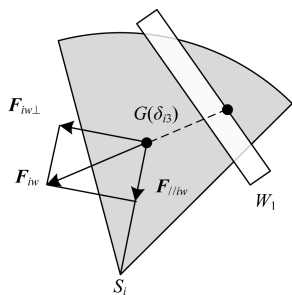


图 4 障碍物区域虚拟受力分析

节点  $S_i$  的障碍物区域  $\delta_{i1}$  质心为  $G(\delta_{i1})$ ,有效覆盖区域  $\delta_{i3}$  的质心为  $G(\delta_{i3})$ ,此时虚拟斥力存在于障碍物区域质心  $G(\delta_{i1})$  与有效覆盖区域质心  $G(\delta_{i3})$  之间,记为  $F_{iw}$ ,定义斥力  $F_{iw}$  如下:

$$F_{iw} = \frac{1}{\zeta} \times d_1 \times |F_{iw}| \times \lambda_1 \quad (8)$$

其中,  $\zeta$  为引入的权重因子——有效覆盖率,即节点的有效覆盖区域与障碍物区域的比值,  $\zeta = \frac{\delta_i - \delta_{i1}}{\delta_{i1}}$ ;  $d_1$  为质心点  $G(\delta_{i1})$  到  $G(\delta_{i3})$  的欧氏距离;  $|F_{iw}|$  为障碍物单位排斥力;  $\lambda_1$  为节点所受虚拟斥力的方向,从  $G(\delta_{i1})$  指向  $G(\delta_{i3})$ 。

在设计节点避障策略时,由于节点位置不变,因此斥力分量  $F_{iw//}$  不起作用,质心点仅受合力沿圆周切线方向的斥力分量  $F_{iw\perp}$  的影响,即斥力分量  $F_{iw\perp}$  导致监控方向沿圆周切线方向绕节点中心旋转,旋转角度  $\beta_w$  计算公式如下:

$$\beta_w = \beta_{\max} \left[ \frac{\min(F_{iw\perp}, F_{i\max})}{F_{i\max}} \right]^2 \quad (9)$$

其中,  $\beta_{\max}$ ,  $F_{i\max}$  为常数,分别用来限制旋转角度和斥力的最大值。此外,虽然障碍物  $W_1$  受到斥力  $F_{iw}$  的反作用力,但是由于其位置固定,所以其空间位置和角度都不变。

当斥力分量  $F_{iw\perp}$  趋近于 0 时,节点不再继续转动,达到理想状态。为了避免优化最后阶段发生往复振动,本文设定受力门限  $\varepsilon_1$ ,当虚拟斥力小于  $\varepsilon_1$  时,则认为该节点下一时刻无需再转动。

以上方法使节点有效避开障碍物的遮挡,逐步消除监控区域的障碍物遮挡区域,达到避开障碍物、

增大网络覆盖率的目的。

### 3.3 边界情况处理

本文假定传感器节点是随机分布的,因此节点被分布在监控区域的边界是不可避免的。设定距离边界线小于等于感知半径的监控区域为边界区域,分布在边界区域的节点为“边界节点”。针对边界节点,本文 PCMOD 算法提出了一种基于虚拟势场的边界处理方法,以此提高传感网络覆盖率。

如图 5 所示,节点  $S_i$  为边界节点,其覆盖面积的绝大部分分布在监控区域之外,  $G(\delta_{i3})$  为其质心。

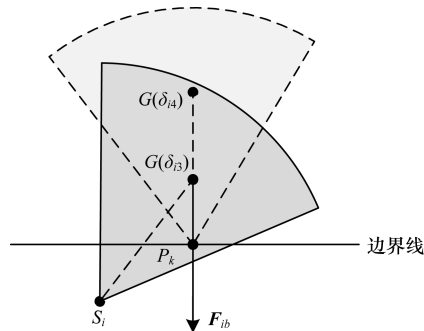


图 5 边界区域虚拟受力分析

本文假定边界节点  $S_i$  都增加一个虚拟的邻居节点  $P_k$ ,该虚拟节点位于边界线上,且其与质心  $G(\delta_{i3})$  的连线垂直于边界线。节点  $P_k$  的质心点  $G(\delta_{i4})$  指向质心点  $G(\delta_{i3})$  的虚拟斥力记为  $F_{ib}$ ,定义斥力  $F_{ib}$  如下:

$$F_{ib} = \frac{1}{d^2} \times |F_{ib}| \times \lambda \quad (10)$$

其中,  $d$  为质心点  $G(\delta_{i4})$  到  $G(\delta_{i3})$  的欧氏距离;  $|F_{ib}|$  为单位排斥力;  $\lambda$  为边界节点所受虚拟斥力,从质心点  $G(\delta_{i4})$  指向  $G(\delta_{i3})$ 。

斥力  $F_{ib}$  对边界节点产生旋转力,旋转角度  $\beta_w$  计算公式如下:

$$\beta_w = \beta_{\max} \left[ \frac{F_{ib}}{F_{i\max}} \right] \quad (11)$$

其中,  $\beta_{\max}$ ,  $F_{i\max}$  为常数,分别用来限制旋转角度和斥力的最大值。当传感器扇形区域在监控区域内的覆盖面积大于等于  $\varepsilon_1$  (本文设定的边界节点在监控区域内的面积阈值)时,则停止转动,节点达到稳定状态。

上述方法使边界节点的方向朝监控区域内部转动,达到其较大覆盖面积均在监控区域内,有效提高了网络覆盖率。

### 3.4 PCMOD 算法描述

通过以上分析,本文提出面向多障碍场景有向传感器网络覆盖优化算法 PCMOD,算法描述如下:

输入 各个节点的位置及传感方向

输出 各个节点的最终传感方向

//初始化

Step1  $t \leftarrow 0$ ;

**Step2** 获取节点  $S_i(x_i, y_i)$  及其邻居节点集  $S_j$  相关信息;

**Step3** While(1)

**Step3.1** 计算障碍物集  $W' \leftarrow W \cap \delta_i$ ;

**Step3.2** 根据  $W'$  计算被遮挡区域  $\delta_{i1}$ ;

**Step3.3**  $\delta_{i2} \leftarrow \varphi$ ; // 将重叠区域设为空集

**Step3.4** For  $j = 1 : \text{num}(S_j) // \text{num}(S_j)$  为邻居节点个数

计算  $S_i$  与邻居节点  $S_j$  的重叠区域  $\delta_{i2}$ ;

**Step3.5** End;

**Step3.6**  $\delta_{i3} \leftarrow (\delta_i - \delta_{i1} - \delta_{i2})$ ;

**Step3.7** 计算各区域质心  $G(\delta_{i1}), G(\delta_{i2}), G(\delta_{i3})$ ;

**Step3.8** If ( $G(\delta_{i1}) \neq \varphi$ )

**Step3.8.1** 计算质心  $G(\delta_{i1})$  对  $G(\delta_{i3})$  的斥力  $F_{iw}$ ;

**Step3.8.2** 计算质心  $G(\delta_{i1})$  沿  $F_{iw\perp}$  方向转动角度  $\beta_w$ ;

**Step3.8.3** 调整质心  $G(\delta_{i1})$  的位置;

**Step3.9** End;

**Step3.10** If ( $G(\delta_{i2}) \neq \varphi$ )

**Step3.10.1** 计算质心  $G(\delta_{i2})$  对  $G(\delta_{i3})$  的斥力  $F_i$ ;

**Step3.10.2** 计算质心  $G(\delta_{i2})$  沿  $F_{i\perp}$  转动的角度  $\beta_{S_i \rightarrow S'_i}$ ;

**Step3.10.3** 调整质心  $G(\delta_{i2})$  的位置;

**Step3.11** End;

**Step3.12** If  $S_i \in$  边界节点

**Step3.12.1** 计算虚拟质心  $G(\delta_{i4})$  对  $G(\delta_{i3})$  的斥力  $F_{ib}$ ;

**Step3.12.2** 计算质心  $G(\delta_{i3})$  转动的角度  $\beta_w$ ;

**Step3.13** End;

**Step3.14**  $t \leftarrow t + 1$ ;

**Step3.15** Sleep( $\Delta t$ );

**Step4** End。

## 4 仿真与性能分析

### 4.1 仿真实例

本文在 Matlab R2010a 环境下仿真。设在  $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$  的监控区域中, 安装 5 个大小不一的矩形障碍物, 初始随机部署 70 个感知半径为 60 m、感知夹角为  $45^\circ$ 、视域为  $90^\circ$  的有向传感器节点, 网络的初始布局状态如图 6(a) 所示, 其初始覆盖率  $P_0 = 41.67\%$ 。

采用面向多障碍场景有向传感器网络覆盖优化算法 PCMOD 进行优化, 如图 6(b)、图 6(c) 所示为优化过程中时间步长为  $t = 1, t = 10$  时的覆盖状态图, 从图中可以看出, 随着时间步长的增加, 各节点的传感方向发生旋转, 逐步减少了重叠覆盖区域和障碍物遮挡区域。

如图 6(d) 所示为网络覆盖性能增强至最优的布局状态, 覆盖率由最初的 41.67% 提高到 60.38%, 增强了 18.71%。

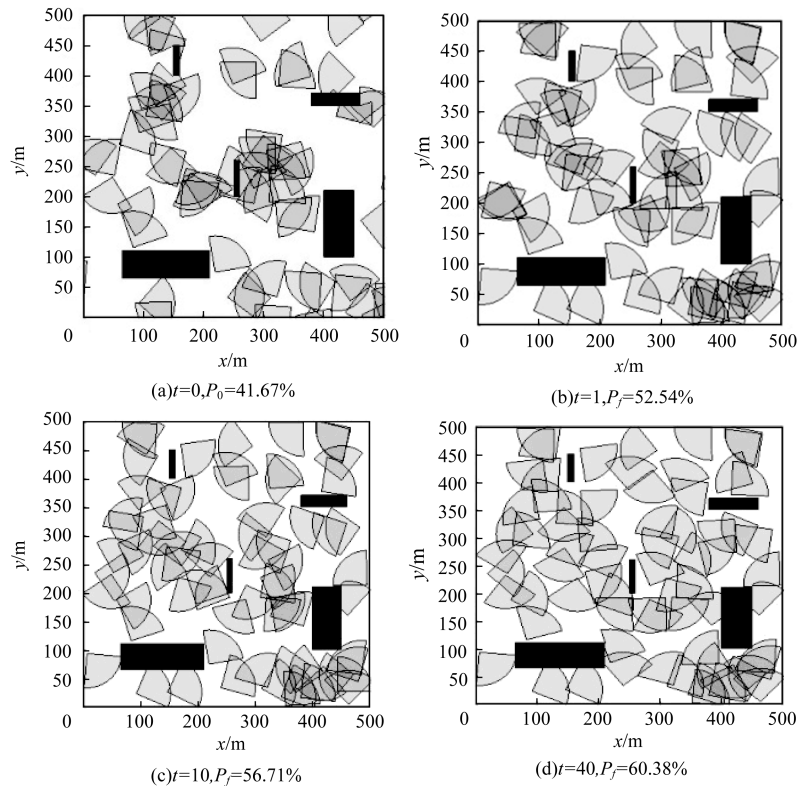


图 6 PCMOD 优化过程状态图

如图 7 所示为 PCMOD 算法的覆盖率变化趋势,初始阶段随着时间步长  $t$  的增加,网络覆盖率不断增加,尤其是第一次优化后,覆盖率的增值最大,达到 52.54%,上升了 10.87 个百分点;之后随着  $t$  的进一步增加,网络覆盖率增幅减缓;当  $t$  达到约 40 次后,网络覆盖率接近 0 增幅,此时认为有向传感器网络覆盖性能增强至最优。

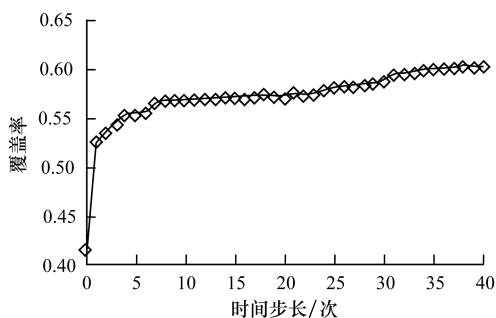


图 7 PCMOD 算法的覆盖率变化趋势

由此可见,当监控区域存在障碍物,并且部分节点落入边界区域时,PCMOD 算法的节点避障策略使节点避开障碍物遮挡,边界情况的改进使网络覆盖性能有较大提高,直至最优。

#### 4.2 仿真结果对比

本节在障碍物数目、传感器节点分别取不同数目时,与现有的覆盖增强算法 PFCEA<sup>[6]</sup>,IPFCEA<sup>[7]</sup>,SOA<sup>[8]</sup> 进行比较。

每次实验首先在 500 m × 500 m 监控区域内的固定位置生成矩形模拟障碍物,然后随机部署指定数量的传感器节点,节点的坐标位置不得位于障碍物中,节点的实验参数为:有效监控距离  $R = 60$  m,节点视角大小  $\varphi = 45^\circ$ 。为了更好地验证算法的有效性,统计算法收敛后最优覆盖率相对于初始覆盖率所提升的比例  $P'$ ,此时,  $P'$  能够较好地反映 PCMOD 算法对覆盖率的优化性能。

如图 8、图 9 所示,  $P'$  为网络优化 40 次后覆盖率  $P_f$  相对于初始覆盖率  $P_0$  所提升的比例,  $P'$  计算公式如下:

$$P' = P_f / P_0 \quad (12)$$

其中,  $P_0$  为网络初始覆盖率;  $P_f$  为运用 PCMOD 算法优化后的覆盖率;  $num(W)$  为障碍物个数;  $N$  为传感器节点数目。

如图 8 所示,4 种算法的感知半径、感知夹角等参数均相同,当传感器节点数目  $N$  一定时,障碍物数目分别取 5, 10, 15 和 20,随着障碍物数量的增加,PCMOD 算法优化后所提升的比例  $P'$  最大,调优效果最好;而 PFCEA 算法、IPFCEA 算法对  $P'$  的提升

效果并不明显;SOA 算法对  $P'$  的提升效果逐渐放缓。因此,在相同参数情况下,PCMOD 算法对网络覆盖率的优化效果明显更优。

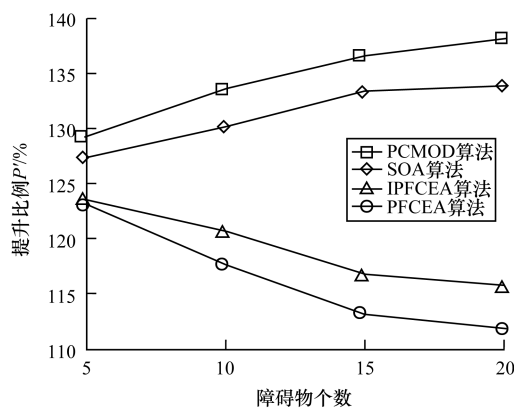


图 8 障碍物数目  $num(W)$  对  $P'$  的影响比较

如图 9 所示,4 种算法的感知半径、感知夹角等参数均相同,当障碍物数目  $num(W)$  一定时,节点数目分别取 50, 70, 90 和 110 个,随着节点数目  $N$  的增加,PFCEA 算法、IPFCEA 算法、SOA 算法和 PCMOD 算法的覆盖率提升比例逐渐放缓且趋于恒定,但 PCMOD 算法的调优效果明显较好。

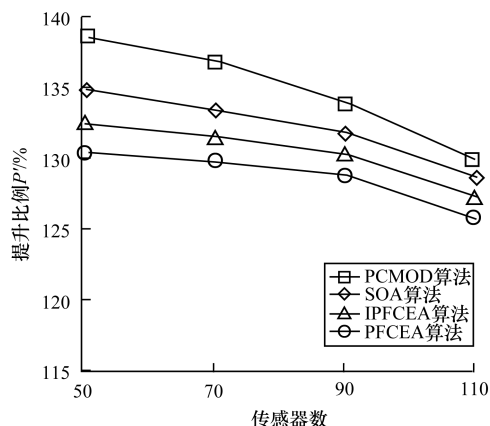


图 9 传感器数目对  $P'$  的影响比较

## 5 结束语

本文针对多障碍传感器网络的覆盖优化问题,提出一种面向多障碍场景的有向传感器网络覆盖优化算法。该算法通过重叠覆盖区域质心、有效覆盖区域质心和障碍物遮挡区域质心之间虚拟力的相互作用,逐步消除网络中的重叠覆盖区域和障碍物遮挡区域,实现网络覆盖率的有效提高,对边界节点的改进提高了网络的覆盖性能。仿真实验结果验证了该算法的有效性。在后期工作中,将研究有向传感器网络在三维空间中的覆盖优化问题。

## 参考文献

- [1] Yick J, Bharathidasan A, Getal P. Optimizing Placement of Beacons and Data Loggers in a Sensor Network—A Case Study [C]//Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference. Atlanta, USA: IEEE Press, 2004: 2486-2491.
- [2] 王雪, 王晟, 马俊杰. 无线传感器网络移动节点位置并行微粒群优化策略[J]. 计算机学报, 2007, 30(4): 563-568.
- [3] 李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 12-15.
- [4] Ren Yan, Zhang Sidong, Zhang Hongke. Theories and Algorithms of Coverage Control for Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Software, 2006, 17(3): 422-433.
- [5] 柳立峰, 邹仕洪, 张雷, 等. 基于概率覆盖模型的无线传感器网络密度控制算法[J]. 北京邮电大学学报, 2005, 28(4): 14-17.
- [6] 程卫芳, 廖湘科, 沈昌祥. 有向传感器网络最大覆盖调度算法[J]. 软件学报, 2009, 20(4): 975-984.
- [7] Poduri S, Sukhatme G S. Constrained Coverage for Mobile Sensor Networks [C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation. New York, USA: IEEE Press, 2004: 165-171.
- [8] Howard A, Mataric M J, Sukhatme G S. Mobile Sensor Network Deployment Using Potential Field: A Distributed Scalable Solution to the Area Coverage Problem [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Distributed Autonomous Robotics Systems. New York, USA: ACM, 2002: 299-308.
- [9] Ma Huadong, Liu Yonghe. On Coverage Problems of Directional Sensor Networks [C]//Proceedings of International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Networks. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005: 721-731.
- [10] Tao Dan, Ma Huadong, Liu Liang. A Virtual Potential Field Based Coverage-enhancing Algorithm for Directional Sensor Networks [J]. Journal of Software, 2007, 18(5): 1152-1163.
- [11] 陈义军, 白光伟, 张进明. 基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法的改进[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(2): 243-246.
- [12] Tezcan N, Wang W Y. Self-orienting Wireless Multimedia Sensor Networks for Occlusion-free View-points [J]. Computer Networks, 2008, 52(13): 2558-2567.
- [13] 蒋一波, 王万良, 陈伟杰, 等. 视频传感器网络中无盲区监视优化[J]. 软件学报, 2012, 23(2): 310-322.
- [14] 顾晓燕, 孙丽娟, 郭剑, 等. 一种有向传感器网络改进粒子群覆盖增强算法[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2011, 23(2): 214-219.

编辑 索书志

(上接第18页)

## 参考文献

- [1] Ma Huadong, Liu Yonghe. On Coverage Problems of Directional Sensor Networks [C]//Proceedings of the 1st International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Networks. Berlin, Germany: Springer, 2005: 721-731.
- [2] 马华东, 陶丹. 多媒体传感器网络及其研究进展[J]. 软件学报, 2006, 17(9): 2013-2028.
- [3] 陶丹, 马华东, 刘亮. 基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法[J]. 软件学报, 2007, 18(5): 1152-1163.
- [4] Ai J, Abouzeid A. Coverage by Directional Sensors in Randomly Deployed Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2006, 11(1): 21-41.
- [5] Cai Yanli, Lou Wei, Li Minglu, et al. Target-oriented Scheduling in Directional Sensor Networks [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007: 1259-1274.
- [6] 桂小林, 何欣, 尹柯. 基于目标覆盖的无线传感器网络的连通性优化部署方法[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(9): 1821-1826.
- [7] Tezcan N, Wang W Y. Self-orienting Wireless Multimedia Sensor Networks for Occlusion-free View-points [J]. Computer Networks, 2008, 52(13): 2558-2567.
- [8] 姚焯善, 王雷, 汤念, 等. 基于正三角形剖分的传感器网络覆盖判定算法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(10): 2366-2369.
- [9] Hang L, Tang J, Zhang W. Strong Barrier Coverage with Directional Sensors [C]//Proceedings of IEEE Global Communications Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [10] Shih K, Chou C, Liu I, et al. On Barrier Coverage in Wireless Camera Sensor Networks [C]//Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 873-879.
- [11] Tao Dan, Tang Shaojie, Zhang Haitao, et al. Strong Barrier Coverage in Directional Sensor Networks [J]. Computer Communications, 2012, 35(1): 895-905.
- [12] 张美燕, 蔡文郁. 无线视频传感器网络有向感知K覆盖控制算法研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26(5): 728-733.
- [13] 陶丹, 孙岩, 陈后金. 视频传感器网络中最坏情况覆盖检测与修补算法[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2284-2290.

编辑 金胡考