基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖优化算法*

戴 宁，毛剑琳，付丽霞，段绍米，乔冠华
（昆明理工大学 信息与自动化学院，昆明 650500）

摘 要：针对有向传感器网络中存在覆盖重叠区和盲区这一问题，引入重叠质心和有效质心的概念，提出了一种基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖优化算法 PCAFD。该算法通过重叠质心和有效质心相互作用，使节点因受虚拟斥力而改变感知方向，并针对边界情况和网络优化过程中的节点往复运动现象进行改进。算法快速地提高了网络覆盖率，一系列仿真验证了该算法的有效性。

关键词：有向传感器网络；虚拟势场；覆盖优化；重叠质心；有效质心
中图分类号：TP393 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-3695(2014)03-0905-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.03.064

Virtual potential field based coverage optimization algorithm for directional sensor networks

DAI Ning, MAO Jian-lin, FU Li-xia, DUAN Shao-mi, QIAO Guan-hua
(*Faculty of Information Engineering & Automation, Kunming University of Science & Technology, Kunming* 650500, *China*)

Abstract: For the problem of coverage overlapping areas and blind spots in directional sensor networks, this paper introduced a virtual potential field based coverage algorithm for directional sensor networks (PCAFD) involving the concepts of overlapping centroid and effective centroid. Through the interaction between overlapping centroid and effective centroid, the algorithm led node sensor direction rotated by a virtual potential force. And it was directed towards the improvement of border conditions and node movements occurring during network optimization. This algorithm increased network coverage quickly. A series of emulation verifies the effectiveness of the algorithm.

Key words: directional sensor network; virtual potential field; coverage optimization; overlapping centroid; effective centroid

无线传感器网络凭借其广泛性和多样性，在军事和民用领域得到了广泛应用[1,2]。覆盖控制是无线传感器网络的一个基本问题[3]，对于合理分配网络空间资源、更好地完成环境感知、信息获取任务、提高网络生存能力都具有重要的意义[4,5]。传感器网络的初始部署分为两种策略：a)大规模的随机部署；b)针对特定用途的计划部署。工作在复杂环境下的无线传感器网络通常采用大规模的随机部署方式，这样容易形成覆盖重叠区和盲区，因此在传感器网络初始部署后，需要采用覆盖优化策略来获得理想的网络覆盖性能。

目前，众多国内外学者相继开展了有关有向传感器网络覆盖问题的研究。Ma 等人[6]首先提出了有向传感器网络的概念，设计了一种基本的有向感知模型。在此基础上，陶丹等人[7]利用虚拟势场中虚拟斥力的作用，提出了一种基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法(PFCEA)，通过引入质心概念，质心在虚拟力的作用下做扩散运动，从而逐渐消除网络中的感知重叠区和盲区。Zhao 等人[8]进一步引入虚拟负质心的概念，加入了虚拟引力的作用，取得了很好的效果。黄帅等人[9]提出根据虚拟力的大小决定节点感知方向的转动量，在一定程度上提高了网络优化收敛速度。

以上算法中，节点所受虚拟力的大小和方向都是简单依据各个节点的质心位置关系，均需要计算所有邻居节点的合力，而且边界情况得不到有效解决。除此之外，在网络覆盖优化后期，由于虚拟力和节点感知方向转动量关系单一，导致网络频繁计算和节点的往复运动。因此，本文提出了一种基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖优化算法 PCAFD。

1 感知模型与问题描述

1.1 有向感知模型

不同于全向感知模型，有向感知模型的感知区域是一个以节点为圆心、感知距离为半径的扇形区域，该扇形区域可以绕圆心切换到不同的方向。有向感知模型可用一个四元组(P,R,V,α)表示。如图 1 所示，$P(x,y)$表示有向传感器节点位置的坐标；R 表示节点感知半径；单位向量 $V(t)$表示节点在 t 时刻的感知方向，即扇形感知区域的中轴线；α 表示节点感知夹角，当 $\alpha=\pi$ 时，是有向感知模型的一个特例，为全向感知模型[7]。

1.2 覆盖优化问题描述

在研究本文内容之前，先作如下必要假设：a)网络中所有节点同构；b)网络中所有节点经过初始部署后，位置固定不变，但其感知方向可调；c)网络中所有节点可获取自身位置及

收稿日期：2013-05-28；**修回日期**：2013-07-01 **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：戴宁(1989-)，女，江苏泰州人，硕士研究生，主要研究方向为无线传感器网络覆盖控制(969880596@qq.com)；毛剑琳(1976-)，女，广西桂林人，副教授，主要研究方向为无线网络优化与控制；付丽霞(1971-)，女，云南昆明人，讲师，主要研究方向为嵌入式系统设计与分析；段绍米(1981-)，女，云南施甸人，助理实验师，主要研究方向为智能算法；乔冠华(1987-)，男，山西长治人，硕士研究生，主要研究方向为无线传感器网络控制系统.

感知方向信息,且每个节点对自身感知方向可控。

假设目标监测区域为有限的二维平面,Tao 等人[10]针对有向感知模型,提出了一个概率公式来预估目标区域被 N 个传感器节点覆盖的初始概率为

$$E_0 = 1 - (1 - \frac{\alpha R^2}{S})^N \tag{1}$$

其中:S 表示监控区域的面积。由式(1)可以看出,预期的覆盖率 E_0 越大,需要部署的节点个数 N 越多。当 E_0 取值较大时(>80%),E_0 每增加 1%,N 就要增加数十,甚至数百。如果不采取有效的覆盖优化策略,大量部署节点必定会造成不必要的成本浪费。

2 覆盖优化算法

2.1 传统虚拟势场方法

虚拟势场(virtual potential field)这一概念最初应用于机器人的路径规划和障碍躲避问题。Howard 等人[11]首先将虚拟势场应用到传感器网络覆盖优化问题中,其基本思想是把网络中每个节点看做一个虚拟的电荷,各节点受到其他节点的虚拟力作用,自发地在监控区域中做扩散运动,最终达到平衡状态。

2.2 虚拟受力模型分析

监控区域内,当两个节点的欧氏距离小于两倍的节点感知半径时,则这两个节点互为邻居节点。为方便描述,定义如下:

定义 1 监控区域内,若某节点与其邻居节点覆盖区域存在重叠,则称重叠部分为这两个节点的覆盖重叠区域。

定义 2 监控区域内,某节点除去其所有覆盖重叠区域的剩余区域称为其有效覆盖区域。

定义 3 覆盖重叠区域的质心点称为重叠质心。

定义 4 有效覆盖区域的质心点称为有效质心。

如图 2 所示,P_1 和 P_2 互为邻居节点,并且存在覆盖重叠区域 S_{12};区域 S_1 和 S_2 分别为节点 P_1 和 P_2 的有效覆盖区域;O_1、O_2 和 O_{12} 分别为区域 S_1、S_2、和 S_{12} 的质心点,通过离散化方法求取质心点坐标,计算公式如下:

$$O(x,y) = O\left(\frac{\sum_{i=0}^{m} x_i}{m}, \frac{\sum_{i=0}^{m} y_i}{m}\right) \tag{2}$$

其中:m 为该区域离散点的个数。

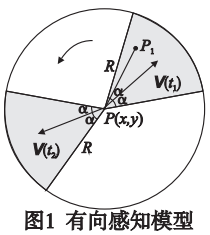

图1 有向感知模型

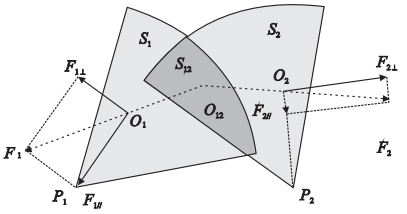

图2 质心点虚拟受力模型

本文利用虚拟势场将传感器覆盖优化问题近似等价于重叠质心和有效质心之间的虚拟斥力问题。节点的有效质心受到重叠质心的虚拟斥力 F 计算公式如下:

$$F = \left(F_{\max} \cdot \frac{S_c}{S_y}, \theta\right) \tag{3}$$

其中:$F_{\max}$ 为常数,用来限制斥力最大值;S_c 表示节点覆盖重叠区域的面积;S_y 表示节点有效覆盖区域的面积;θ 表示节点所受虚拟斥力 F 的方向,由节点的重叠质心指向有效质心。如果某个节点与多个邻居节点存在覆盖重叠区域,则该节点所受虚拟斥力 F 为多个重叠质心和其有效质心虚拟斥力的合力。

将虚拟斥力 F 分解为作用于节点位置的力 $F_{//}$ 和与圆周相切的力 $F_{\perp}$。由于本文假设节点位置不会发生变化,所以分量 $F_{//}$ 不起作用,只有分量 $F_{\perp}$ 导致节点感知方向绕节点位置旋转,旋转方向与 $F_{\perp}$ 方向一致。旋转角度 $\Delta\theta$ 受 $F_{\perp}$ 影响,公式为

$$\Delta\theta = \theta_{\max} \cdot \left[\min\left(\frac{F_{\perp}}{F_{\max}}, 1\right)\right]^2 \tag{4}$$

其中:$\theta_{\max}$ 为常数,用来限制旋转角度最大值。

网络中的 N 个节点依次执行上述步骤后,进入下一次循环,直至 T 次循环后,网络中每个节点的受力趋于 0,此时网络达到理想覆盖状态,则停止优化。为了避免网络在优化的最后阶段发生不必要的抖动,本文设定虚拟斥力阈值 ε_1,如果节点在某次循环中,所受虚拟斥力 F 的大小小于阈值 ε_1,则该节点在这次循环中不旋转。

2.3 节点往复运动模型分析

在之前的一些覆盖优化算法中[7,8],虚拟力 F 和节点旋转角度 $\Delta\theta$ 关系单一,普遍存在节点往复运动现象。如图 3 所示,节点 P_1 与其邻居节点 P_2、P_3 有较大面积且面积相近的覆盖重叠区域,导致循环优化的过程中,节点 P_1 会不断在状态 1 和 2 中来回切换。而随机部署的网络中,特别是节点规模较大时,存在不少类似 P_1 的节点,由于它们往复运动导致整个网络频繁计算和反复调整,无疑削弱了算法的性能。

本文设定如果检测到某节点与其多个邻居节点均有较大面积的覆盖重叠区域,但所受虚拟斥力的合力 $F_{合}$ 的大小小于 ε_2(ε_2 为节点往复运动模型虚拟斥力的合力阈值),则称该节点为往复点。针对往复点,本文提出解决其往复运动的受力方法:往复点的旋转角度不再受各个重叠区域斥力的合力影响,而是只考虑其所受顺时针合力 F_s 和逆时针合力 F_n 中较大力 F_w 的影响。旋转方向与 $F_{w\perp}$ 一致,旋转角度 $\Delta\theta_w$ 的计算公式如下:

$$\Delta\theta_w = \theta_{\max} \cdot \left[\frac{F_{w\perp}}{F_s + F_n}\right]^2 \tag{5}$$

2.4 边界处理模型

在之前的一些覆盖优化算法中[7,8],并没有对边界情况进行特殊处理。如图 4 所示,节点 P_1 较大的覆盖面积均在监测区域之外,并不是有效覆盖,间接削弱了算法的性能。

本文设定如果某节点与边界线的距离小于其感知半径,则称该节点为边界点。针对边界点,本文规定其不断逆时针旋转固定角度 $\pi/36$,直至其在监测区域内的覆盖面积满足 $S_b \geqslant \varepsilon_3$($\varepsilon_3$ 为边界点在监测区域内的覆盖面积阈值),则停止旋转。被处理过的边界点在本轮优化中不再参与其他优化,感知方向保持不变。

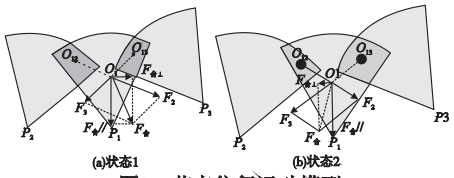

图3 节点往复运动模型

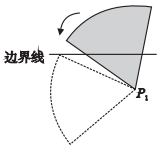

图4 边界处理模型

2.5 PCAFD 算法描述

输入:各个节点的位置以及感知方向、感知半径、感知夹角信息。
输出:各个节点的最终感知方向信息。
//初始化
$t \leftarrow 0$;
获取节点 P_i 以及其邻居节点的相关信息;
设置循环优化次数 T;

```
while(t < T)
for i = 1:N
    if P_i ∈ 边界点
        while P_i ∈ 边界点
            P_i 逆时针旋转 π/36
        end;
    else
        if P_i 与其邻居节点有覆盖重叠区域
        if P_i ∈ 往复点
        P_i 旋转 Δθ_w,旋转方向为 F_w⊥ 方向
        else
        P_i 旋转 Δθ,旋转方向为 F_⊥ 方向
        end;
    end;
    end;
  end;
  获取节点 P_i 以及其邻居节点新的相关信息;
  t←t + 1;
end;
```

3　算法仿真与性能分析

3.1　实例研究

本节设定在 500×500 m^2 的目标监测区域中,初始随机部署 N 个同构无线传感器节点(感知半径 $R = 60$ m、感知夹角 $\alpha = 45°$)。如果预期的网络覆盖率 $P_0 = 70\%$,通过式(1)可以预估出所需的节点规模为 106。针对上述实例,本文记录了算法 PCAFD 在 40 个时间步长内的有向传感器网络覆盖情况,如图 5 所示。从仿真结果可以看出,各节点在虚拟斥力的作用下,感知方向进行了旋转,逐步消除了网络中的覆盖重叠区和盲区。通过大量实验得出,本算法在起初五次优化内,覆盖率上升趋势明显,特别是第 1 次优化覆盖率提高 8.03%,幅度非常大;随后,提升效果逐渐放缓,逐步趋于稳定。此例中,网络经过 40 次优化后,覆盖率由最初的 65.50% 提高到 85.11%,上升了 19.61%。根据式(2)可知,如果预期的网络覆盖率为 85.11%,至少需要部署 168 个节点。由此可见,通过 PCAFD 算法优化网络可以节省近 37% 的传感器节点(本例近 62 个),极大地降低了网络的部署成本。

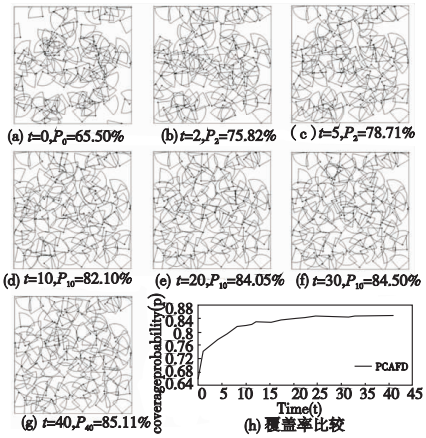

图5 覆盖优化实例

3.2　仿真对比

在本节中,针对四组不同的节点规模进行了多次实验,并与之前的一些覆盖优化算法[7,8]进行比较和性能分析。如图 6 所示,$\Delta\bar{P}$ 为网络 40 次优化后覆盖率上升值;$\Delta\bar{P}_1$ 为网络 1 次优化后覆盖率上升值;$\bar{T}$ 为算法收敛所需的时间步长。通过实验数据可以分析出:PFCAD 算法随着节点规模 N 的增加,$\Delta\bar{P}$、$\Delta\bar{P}_1$ 以及 $\bar{T}$ 均呈现上升趋势,并且均明显优于之前的算法。特别是 $\Delta\bar{P}_1$,是之前算法的 3 ~ 5 倍,优势非常明显。

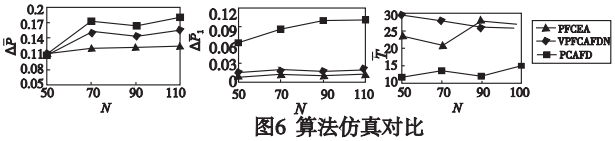

图6 算法仿真对比

由此可见,本文 PCAFD 算法在不同节点规模下都具有较好的收敛性,可以在非常短的单位时长内完成整个网络的覆盖优化过程,而且在收敛时都能达到较好的覆盖效果;当目标区域节点数目众多时,节点间覆盖盲区的概率大为降低,以及部分节点落入边界区域都大大削弱了之前算法的性能。PCAFD 算法由于直接利用有效质心和重叠质心相互作用,并针对往复点和边界点进行了改进,相较于之前算法,覆盖率上升更为明显,收敛速度更快,适用性更强。

4　结束语

本文在基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖优化算法中引入了有效质心和重叠质心的概念,通过重叠质心和有效质心的相互作用,利用与邻居节点间覆盖重叠区域的面积和位置决定节点所受虚拟斥力的大小和方向,可逐步消除网络中的覆盖重叠区和盲区,达到快速提高网络覆盖率的目的;对边界情况和网络优化过程中节点往复运动现象的改进有效地发掘了覆盖率提升的空间。一系列仿真实验验证了该算法的有效性以及优越性。未来的工作将对算法在三维空间覆盖问题的应用进行研究。

参考文献:

[1] YUAN Zheng-wu, LIANG Jun-jun. Multi-hops localization algorithm based on virtual force for wireless sensor networks [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2010,22(1):122-126.

[2] MELL P, GRANCE T. The NIST definition of cloud computing [R]. [S. l.]:National Institute of Standards and Technology, 2011.

[3] 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.

[4] 李靖, 王汝传, 黄海平,等. 有向传感器网络覆盖控制策略[J]. 通信学报, 2011, 32(8): 118-127.

[5] 任彦,张思东,张宏科。无线传感器网络中覆盖控制理论与算法[J]. 软件学报, 2006,17(3): 422-433.

[6] MA Hua-dong, LIU Yong-he. On coverage problems of directional sensor networks [C]//Proc of International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Networks. Berlin:Springer-Verlag, 2005: 721-731.

[7] 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.

[8] ZHAO Jin, ZENG Jian-chao. A virtual potential field based coverage algorithm for directional networks [C]//Proc of Chinese Control and Decision Conference. 2009:4590-4595.

[9] 黄帅, 程良伦. 一种基于虚拟力的有向传感器网络低冗余覆盖增强算法[J]. 传感技术学报, 2011, 24(3):418-422.

[10] TAO Dan, MA Hua-dong, LIU Liang. Coverage enhancing-algorithm for directional sensor networks [C]//Proc of the 2nd International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Networks. Berlin: Springer-Verlag, 2006:256-267.

[11] 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]//Proc of the 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems. 2002:299-308.