

一种传感器网络移动栅栏部署算法

靳冰¹, 王树森²

(1. 南阳理工学院 软件学院, 河南 南阳 473004; 2. 济源职业技术学院 信息工程系, 河南 济源 459000)

摘要: 栅栏覆盖是传感器网络研究中的热点问题, 现有有关栅栏覆盖研究大多针对静态兴趣区域的栅栏覆盖, 而对于实际应用中如海洋污染、森林火灾、部队行军等的栅栏覆盖应用不适用; 该文主要针对动态对象研究移动传感器网络的有效栅栏覆盖; 抽象了问题模型并提出了栅栏覆盖评价指标, 然后结合凸优化理论提出了一种分布式的移动栅栏覆盖算法; 通过3个不同场景分别测试了算法在400 × 600 m的区域中随机部署有50个移动传感器节点对于不同动态对象构建一条封闭栅栏带所花费的时间以及栅栏带动态形成时的移动距离; 测试结果算法能够快速有效实现动态区域的栅栏覆盖。

关键词: 传感器网络; 移动栅栏覆盖; 动态目标; 凸优化

A Mobile Barrier Deployment Algorithm in Mobile Sensor Networks

Jin Bing¹, Wang Shusen²

(1. Software School, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China;

2. Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan 459000, China)

Abstract: Barrier coverage is the hot issue in sensor network. Most of existing studies of barrier coverage focus on the static interest area coverage. For the practical application such as marine pollution, forest fires, troops marching, previous barrier coverage does not fit into these applications. In this paper, we study mobile barrier coverage for dynamic objects in mobile sensor network. Abstract the model from the problem and put forward barrier coverage evaluation index in this paper. Then combined with the convex optimization theory, we propose a distributed algorithm for mobile barrier coverage, according to different scenarios simulation results confirm the validity of the algorithm.

Keywords: mobile sensor network; mobile barrier coverage; dynamic object; convex optimization

0 引言

传感器网络作为物联网的底层网络为物理世界与信息世界构建了桥梁。传感器网络的广泛应用前景迅速使得其成为研究热点^[1-15]。在传感器网络应用中, 栅栏覆盖问题已吸引了大量的研究。传感器节点通过协同组织成一条栅栏带包围目标区域用于入侵检测或目标逃逸, 这种称为栅栏覆盖。栅栏覆盖应用广泛, 比如应用在国界边界线监测偷渡, 栅栏包围敏感区域如金库保险柜等防止盗窃, 致命生化物质标识防止人畜接近等。而更多场景中, 监测对象是动态变化的, 许多学者因此提出了移动栅栏覆盖问题。移动栅栏覆盖是指当对象是动态变化的情况下, 传感器节点要随着对象的变化而移动, 始终组成栅栏带围绕着对象。在此场景下, 传感器节点要能够随着变化的对象快速响应, 用最短的时间实现再封闭包围。

文献[1]首先提出了栅栏覆盖问题并且提出了一个算法用来判定栅栏带是否形成, 同时证明了没有分布式的算法可以用来判定全局的栅栏带是否形成。随后, 文献[2]提出了用分布式算法来判定局部栅栏带是否形成。近年来, 更多栅栏覆盖的研究涌现。比如, 文献[3]研究了利用数据融合技术构造虚

拟节点来增加节点覆盖区域。文献[4]提出了强栅栏覆盖概念, 文献[5]探讨了栅栏覆盖的质量和评测方法, 文献[6]提出一种基于融合的k集覆盖优化问题, 将其建模为融合覆盖博弈, 其最优解得出为一个纯策略Nash均衡解。以上都是针对固定栅栏静态对象监测的研究。文献[7]为减少栅栏覆盖传感器节点数量, 通过全面的分析提出一种多轮传感器节点部署方法, 避免传感器节点部署错误。文献[8]针对单方向的边界检测, 需要识别入侵方向, 提出一步边界覆盖问题。文献[9]针对传感器节点不足的情况下, 研究节点动态巡逻模式来构建栅栏的问题, 提出一种传感器节点协同巡逻算法来改善栅栏覆盖性能。

随着MEMS的发展, 移动传感器网络逐渐得以普及, 以移动传感器节点为标志的移动传感器网络的出现给传感器网络的研究带来了新的课题^[10-11]。文献[12]设计了在节点的移动距离有限的情况下, 通过节点位置的再调整形成监测概率更高的栅栏带, 文献[13]研究了在节点随机布撒的情况下如何通过移动组成栅栏覆盖。文献[14]研究了在移动传感器网络中1-栅栏覆盖最小移动距离和问题, 提出了一种基于分治策略的k-栅栏覆盖构建算法。以上主要是移动传感器节点对于静态目标的栅栏部署研究。

然而现实中依然存在监测对象为边界随意变化, 位置可以移动的任意动态对象, 如对于海洋污染的栅栏部署, 由于洋流气候影响, 污染物随意扩散, 对于其污染区域的栅栏部署可以

收稿日期: 2014-02-24; 修回日期: 2014-03-28。

基金项目: 河南教育厅重大科研攻关研究资助项目(12B520036)。

作者简介: 靳冰(1977-), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事信息安全、图像处理、物联网技术方向的研究。

监测污染的变化, 还有诸如森林火灾监测等。对于这类问题的栅栏部署, 需要依据动态目标边界实时调整栅栏部署实现有效覆盖。当前对于此类问题研究尚不多见, 本文主要在此基础上研究如何对一目标区域快速构建栅栏带以及构建的栅栏带需要满足何种条件才能实现对动态目标的可靠覆盖。

1 问题模型

1.1 问题定义

假设在平面上有一任意形状边界连续的对象 A 任意变化移动, 移动感知节点检测边界后对动态区域 A 形成栅栏覆盖, 防止外部入侵或内部逃逸。这类问题我们称之为动态区域的移动栅栏部署。

定义 1: 动态对象 O 。指一个在平面 M 上可以自主动态变化的不规则图形, 动态对象边界连续。

定义 2: 传感器节点 $S = \{s_i\}$ 。系统中有 n 个传感器节点, 用 $S = \{s_i, i = 1, \dots, n\}$ 表示。

每个传感器节点可以在平面 M 上任意移动。传感器节点在其感知范围能够识别动态区域边界, 能够监测入侵者以及检测动态区域边界移动。传感器节点模型采用圆盘模型, 感知半径为 r_s , 通信半径为 r_c , 假设 $r_c \geq 2r_s$ 。

安全距离 ϵ : 传感器节点能够检测识别的一个阈值距离。

定义 3: 栅栏带 $(\lambda_1, \lambda_2, w)$ 。栅栏带定义为一个封闭的带状区域。在二维平面上动态变化。由两条封闭曲线 λ_1 和 λ_2 界定, 它们的长度分别为 l_{λ_1} 和 l_{λ_2} 。栅栏带的宽度为 $w = d(\lambda_1, \lambda_2)$ 。当 λ_1 和 λ_2 完全重合, 栅栏带变成一条封闭的栅栏链。

1.2 衡量指标

如何衡量栅栏带的部署质量是研究栅栏部署方法前需要解决的问题。对于栅栏带的构建我们需要对于动态目标的快速构建一条封闭并能实现对于动态目标快速响应的栅栏带。具体衡量参数有如下。

指标 1: 时间 T 。 N 节点随机部署在区域中, 当检测到动态区域后, 对其构建一条封闭的栅栏带, 需耗时 T 。

指标 2: 传感器节点构建栅栏带所移动的距离 D , D 越短, 能耗越小。

指标 3: 栅栏层数 K 。文献 [4] 提出一种强栅栏覆盖, 一个栅栏覆盖有 K 层栅栏是指当一个进入者从任意角度穿越虚拟栅栏带时, 都至少有 K 个传感器节点检测到它。提高 K , 可以提高监测概率, 提高栅栏覆盖的可靠性和质量, 因此指标 K 越大越好。

传感器网络模型抽象为 $G(n) = (V, E)$, V 为传感器节点集合。传感器节点覆盖图由 $G(n)$ 表示, 当节点之间距离小于 $2r_s$ 时, 则表示边存在。图 1 表示当图中的顶点连接起来后的覆盖图, 可以看出对目标区域 A 进行 2 层的栅栏覆盖。

1.3 问题模型

本文主要研究如何对一动态的目标区域快速构建栅栏带形成栅栏覆盖。首先研究感知节点如何分布在对象边界时, 使得覆盖效果最优。

引理 1: 对于动态对象的最短栅栏覆盖是其凸包。

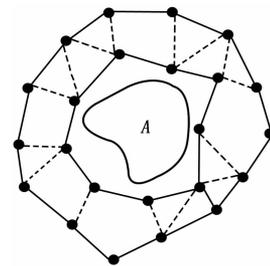


图 1 强 K 栅栏部署 ($k=2$)

证明: 凸包的定义为对于一个集合 D , D 中任意有限个点的线性组合的全体称为 D 的凸包。假定动态对象为点集 O , 则由凸分析理论^[16]有 O 的凸包 (convex hull) 是指一个最小凸多边形, 满足 O 中的点或者在多边形边上或者在其内。根据凸分析理论, 对于平面上的任一图形 O , 能围绕 O 的最短封闭曲线就是它的凸包。

定理 1: 对某一动态对象的栅栏部署中, 其最大栅栏层数 K 为 $K_{\max} = \frac{2nr_s}{l_c(A(t)) + 2\pi\epsilon}$ 。

证明: 由引理 1 可知, 最短栅栏为凸包, 又因为要保证安全距离 ϵ , 则其栅栏应该覆盖在凸包的 ϵ 外, 因此栅栏部署距离为 $l_c(A(t)) + 2\pi\epsilon$ 。

区域中有 n 个传感器节点随机分布在整个区域中, 当所有传感器节点直线排列时可以组成最大长度的栅栏带, 其长度为 $2nr_s$ 。

$$\text{则最大 } K \text{ 值为: } K_{\max} = \frac{2nr_s}{l_c(A(t)) + 2\pi\epsilon}。$$

下面研究 K 层栅栏部署方式。由于多层栅栏覆盖在目标区域上, 图 2 展示了两种部署方式, 分层部署和密集部署。两种栅栏中其任意方位越过栅栏都能保证有 2 个感知节点检测到, 其 $K=2$ 。

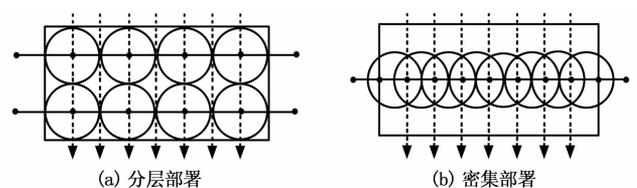


图 2 栅栏部署两种不同方式

因为 K 的大小只在乎栅栏层的数量, 而不在于栅栏层的分布情况。当两个栅栏层在位置上重合在一起, K 值还是 2 并没有变成 1。而以 (a) 类分层部署时, 其外层的边界大于内层栅栏长度边长 $2\pi m$, 部署效果一样而密集部署所需感知节点更少。

当出现栅栏缺口时, K 层栅栏均匀分布与整个边界上可以快速补充。而当 K 不是整数时, 对于分层部署, 可能节点随机分布与边界外层, 而当栅栏出现缺口时, 若附近无冗余的感知节点, 则需要通过多次通信从远处调拨冗余的节点, 造成部分时间段栅栏空缺。而对于单层密集部署, 传感器节点均匀分布, 当出现缺口可以将周围冗余节点移动到栅栏缺口处。因此动态区域的栅栏部署更加适宜于单层密集部署。

2 栅栏部署算法

前面分析了节点的部署满足何种条件时为最优栅栏部署。本节分析要实现前面分析了部署条件，具体采用什么策略与算法。

2.1 算法思想

对于目标区域的栅栏构建主要分两步，边界识别和栅栏带构建。

步骤 1: 边界识别

传感器节点随机分布于监测区域内，其感知节点与边界的关系可能有 3 种，动态对象之外，动态对象边界上，动态对象边界内部。对于这 3 类分情况讨论，当远离动态对象时，感知节点随机移动寻找对象边界，但为了提高效率，感知节点应避免寻找过的区域重复寻找，因此考虑螺旋式移动，感知节点围绕感知原始位置向周围区域慢慢扩展寻找边界。对于第二种情况，感知节点位于边界上时，不用移动，通知向周围节点广播边界位置信息。对于第三种情形，则感知节点直接由对象内部向外部移动，直至到边界时停止。当感知节点找到到边界后，向周围节点广播，使得周围节点向该节点靠近。

步骤 2: 栅栏带构建

当节点寻找到区域边界后，传感器节点在边界上依照链状依次部署，链状头尾节点沿着边界向两边游动，将聚群的节点拉伸成链状，其最大移动距离为邻居节点的 $2r_s$ 外。

每次链状扩展，则加入链条队列中，并依照链条传播信息。

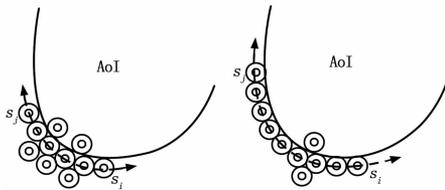


图 3 链状栅栏带构建时移动节点分布

当不同链状触碰后，首尾合拢，构成同一条链，并将其加入链状队列中。链状构建过程中，当首尾合拢时栅栏带构成。

凹区域边界的处理，位于栅栏链中的节点，可以通过计算两邻居节点之间的中部位置，形成凸包。对于凸边界，其两邻居节点中点位于动态对象内部，因此节点沿着边界移动到两节点等距位置。对于凹边界，计算的中央位置位于远离边界位置，这节点向外移动到距离中点上。

当不同链状触碰后，首尾合拢，构成同一条链，并将其加入链状队列中。链状构建过程中，当首尾合拢时栅栏带构成。

2.2 算法设计

依照前面的分析，我们提出移动栅栏部署算法 (MBDA: Moved Barrier Deployment Algorithm)。该算法用于对一个任意形状的动态目标进行栅栏覆盖，通过调动移动传感器节点迅速完成对于目标区域的凸包覆盖。

具体算法伪代码如下所示。

Elastic Barrier Algorithm (Executed on sensor s_i)

Input: the sensing range r_i , the warning distance ϵ ;

```

While True do
Switch(Location)
case outside boundary: spiral_moving(); break;
case on boundary: direct_moving(); break;
case inside boundary: straight_moving(); break;
broadcast boundary information
Detect immediate neighbors  $s_{i-1}$  and  $s_{i+1}$  ;
Exchange position information with  $s_{i-1}$  and  $s_{i+1}$  ;
Detect the dynamic object and the distance  $d(p_{s_i}, O)$  ;
 $p \leftarrow p_{s_i}$  ; //  $p$  is the next position  $s_i$  will to move
If  $s_i$  has two immediate neighbors
 $p_1 \leftarrow$  the middle position of two immediate neighbors;
if  $d(p_{s_i}, O) < r_s$ 
 $p_2 \leftarrow q; d(O, p_2) = \epsilon$  and  $d(p_{s_{i+1}}, q) = d(p_{s_{i-1}}, q)$  ;
 $p \leftarrow d(p_{s_i}, O) > d(O, p_1) p_2 : p_1$  ;
else  $p \leftarrow p_1$  ;
else if  $s_i$  has only one immediate neighbor
 $p \leftarrow q; d(p_{s_{i+1}}, q) = 2r_s$  and  $d(O, q) = \epsilon$  ;
If  $p \neq p_{s_i}$ 
Move to  $p$  ;
End while
    
```

前面给出了移动栅栏带的构建算法，分析算法运行过程。传感器节点随机分布在监测区域中，启动算法后，节点随机移动进行边界识别，当节点识别边界后向周围节点广播信息，通过推拉作用将富余节点吸引到边界周围，节点移动构建栅栏链，并加入到链的队列中，每次加入向整个链上节点通信。不同区域的边界上可能构成多段栅栏链，链条两端沿着边界向两端移动，当碰到边界其他节点则边界加入合并，当某段栅栏带端头沿边界探索时遇到本链条端点时则整个栅栏带形成。

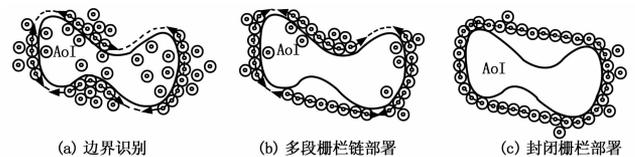


图 4 移动节点栅栏带构建分布

2.3 算法分析

定理：栅栏构建过程中，当某段栅栏链的头尾端节点相遇时则目标区域的栅栏带构建完成。

证明：假设栅栏构建过程中，动态区域边界上有 n 条栅栏链 l_1, l_2, \dots, l_n 。其中某 l_k 的首尾节点为 s_i, s_j 。

l_k 向两端扩展时，当 $s_{i+1} = s_j \parallel s_{j+1} = s_i$ 时，目标区域栅栏带未完成。

由 $s_{i+1} = s_j \parallel s_{j+1} = s_i$ ，则 l_k 为封闭曲线。由于目标栅栏带未完成，这该封闭曲线包围区域不是目标区域。即 l_k 不在目标区域凸包上。

l_1, l_2, \dots, l_n 为栅栏链，前面分析有栅栏链 l_1, l_2, \dots, l_n 分布在目标区域的凸包上。

因此矛盾，则栅栏构建完成。

3 性能评估

3.1 仿真环境

栅栏的覆盖算法,本小结来进行仿真实验评估算法的性能。分别通过3个场景来测试,假设在 400×600 m的区域中随机部署有50个移动传感器节点,红色区域为动态区域。传感器节点能够检测自身传感器节点,感知半径为20 m,通信距离为50 m,传感器节点移动速率为10 m/s。测试场景分别为静态区域,动态区域。主要测试目标为栅栏带构建形成花费时间以及栅栏带动态形成时的移动距离。

3.2 性能分析

我们分析了算法在不同场景中针对不同动态对象构建一条封闭的栅栏时所需要的时间以及节点所移动的距离。算法移动距离以及时间如图5~6所示。3种不同场景中600 s内EBA算法所有传感器节点总计移动距离为57 216 m,36 832 m和28 251 m。另外在3种不同场景中,首次栅栏带构建完成的时间分别为563 s,492 s,417 s,表示本文算法能够更快实现动态区域的栅栏覆盖。这得益于栅栏构建时传感器节点移动策略。

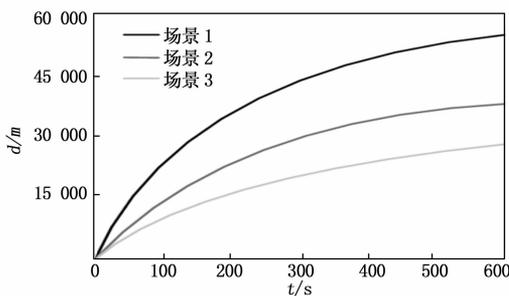


图5 所有传感器节点累积移动距离随时间变化

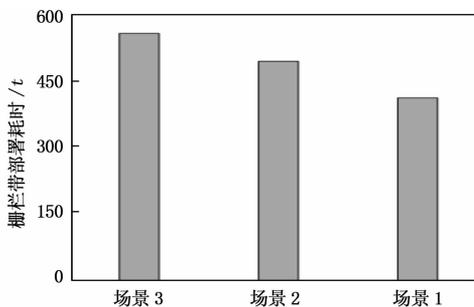


图6 算法在不同场景中构建栅栏带时间

4 小结

传感器网络栅栏部署具有广泛的应用,本文针对动态对象的移动栅栏部署算法进行研究,主要研究如何快速构建封闭的栅栏带,且能够对动态目标快速反应。借鉴凸优化理论分析移动栅栏覆盖的优化部署策略,然后提出了一种动态区域的移动栅栏算法,能够实现快速栅栏部署。随着物联网、信息物理融合系统的兴起,传感器网络作为其实现的重要途径,其相关的研究将不断深入。针对各种特殊应用场景的复杂传感器网络面临着大量尚未解决的问题需要深入研究。移动区域的栅栏覆盖问题中动态区域的模型构建较复杂,本文仅对简单模型进行初

步研究,对于任意动态区域的栅栏部署的模型构建以及理论分析是下一步需要深入的课题。

参考文献:

- [1] Kumar S, Lai T, Arora A. Barrier coverage with wireless sensors [A]. Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking [C], ACM, 2005, 284-298.
- [2] Chen A., Kumar S., and Lai T.. Designing localized algorithms for barrier coverage [A]. Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking [C], ACM, 2007, 63-74.
- [3] 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.
- [4] Liu B, Dousse O, Wang J, et al. Strong barrier coverage of wireless sensor networks [A]. Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing [C], ACM, 2008, 411-420.
- [5] Chen A, Lai T, Xuan D. Measuring and guaranteeing quality of barrier coverage in wireless sensor networks [A]. Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing [C], ACM, 2008, 421-430.
- [6] 李劲,岳昆,刘惟一. 基于融合的无线传感器网络k-集覆盖的分布式算法 [J]. 电子学报, 2013, 41 (4): 659-665.
- [7] Yang G, Qiao D. Multi-round sensor deployment for guaranteed barrier coverage [A]. INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE [C], IEEE, 2010, 1-9.
- [8] Chen A, Li Z, Lai T, et al. One-way barrier coverage with wireless sensors [A]. INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE [C], IEEE, 2011, 626-630.
- [9] He S, Chen J, Li X, et al. Cost-effective barrier coverage by mobile sensor networks [A]. INFOCOM, 2012 Proceedings IEEE [C], IEEE, 2012, 819-827.
- [10] Chen W, Hou J, Sha L. Dynamic clustering for acoustic target tracking in wireless sensor networks [J]. Mobile Computing, IEEE Transactions on, 2004, 3 (3), 258-271.
- [11] Liu B, Brass P, Dousse O, et al. Mobility improves coverage of sensor networks [A]. Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing [C], ACM, 2005, 300-308.
- [12] Bhattacharya B, Burmester B, Hu Y, et al. Optimal movement of mobile sensors for barrier coverage of a planar region [J]. Combinatorial Optimization and Applications, 2008, 103-115.
- [13] Saipulla A, Westphal C, Liu B, et al. Barrier coverage of line-based deployed wireless sensor networks [A]. INFOCOM 2009, IEEE [C], IEEE, 2009, 127-135.
- [14] 班冬松,温俊,蒋杰,等. 基于融合的无线传感器网络k-集覆盖的分布式算法 [J]. 软件学报, 2011, 22 (9): 2089-2103.
- [15] 衣晓,王梓有. 无线传感器网络节点的分布式定位算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (4): 1096-1098.
- [16] Bertsekas, Dimitri P, Angelia Nedic, Asuman E. Ozdaglar. Convex analysis and optimization [J]. Belmont: Athena Scientific, 2003.