

一种基于蒙特卡罗算法的传感器网络点覆盖质量评估技术

王行甫, 苗付友, 熊 焰, 周大铨, 岳丽华

(中国科学技术大学计算机科学技术系, 安徽合肥 230027)

摘 要: 在无线传感器网络 (Wireless Sensor Network) 中, 随着能量的消耗将导致部分节点失去工作效能, 无法保证预先部署的节点有效地覆盖被监测区域或目标。因此, 本文提出一种基于蒙特卡罗 (MC) 算法的目标点覆盖质量评估技术, 该技术每次从目标点集合中任意选取若干点进行检测, 若全部满足覆盖质量要求则返回, 否则标定不满足条件的目标点。反复使用该技术有限次, 可以使覆盖质量评估的正确率超过 99%, 从而可以有效解决无线传感器网络中的点覆盖质量评估问题, 为节点的补充提供依据。分析和模拟实验表明该技术是可行的。

关键词: 传感器网络; 点覆盖; 蒙特卡罗算法

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12A-2485-03

The Monte Carlo Algorithm to Evaluate the Cover Quality of Object Points in Wireless Sensor Network

WANG Xing-fu, MIAO Fu-you, XIONG Yan, ZHOU Da-quan, YUE Li-hua

(Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract: In WSN (Wireless Ad-hoc Sensor Network), some sensor nodes could die with their limited power consuming, which leads to the decrease of the point covering quality. Thus a method must be found to evaluate the quality of nodes' covering. An evaluating algorithm is proposed to measure how well a set of object points are monitored by sensor networks on the basis of Monte Carlo algorithm. The algorithm evaluates some points which are randomly selected from the set of object points. If all selected points meet the requirement, it will return; or it demarcate those object points which don't meet requirements. Repeat to call the algorithm limited times, which will make the ratios of the correctness of the quality evaluation algorithm exceed 99%. So it solves point covering problem effectively in WSN. The simulation shows that it is feasible.

Key words: wireless sensor network; point covering; Monte Carlo algorithm

1 引言

传感器节点是一种具有感知、计算、存储和通信功能的器件。传感器网络是由传感器节点组成的, 可以用来完成一个感知任务的大规模网络。比如要监测一片森林的平均温度, 那么需要在森林中均匀地布撒大量的传感器, 每个传感器将探测到的温度发送给汇聚节点 (sink), 再由它传送到主机集中处理。

传感器网络的一个重要特性是节点部署的随意性 (比如飞机空投), 所以无法预先知道节点的确切位置。传感器网络还有如下特性: 能量受限、网络规模较大、拓扑结构随能耗的增加而发生变化等。

传感器网络目前是国际学术界研究的热点, 而节点覆盖问题^[1]是传感器网络中的一项重要研究技术。根据监听目标的种类, 节点覆盖分为区域覆盖和目标点覆盖。区域覆盖主要用途是检测整个区域, 即随机配置的传感器覆盖某一任务区域, 该区域内的各地点至少要被一个传感器节点所监视到。而点覆盖是指任务区域内的一组给定的地点至少被一个传感器节点所监视。由于随机部署的大量传感器节点位于目标点附

近, 所以点覆盖的研究目标就是保证每个目标在任意时刻至少被一个传感器所监控。

传感器网络能否较好地完成监测任务, 首先应该看网络的部署是否达到覆盖质量的要求。即网络中可以覆盖目标点的传感器节点必须要达到一定的数目, 网络才能实现设计的要求。而传感器网络的任务区域一般情况比较复杂, 所以节点实现精确部署存在较大难度。目前一般采用随机部署的形式, 但是这会造成部分待监测的目标点未达到覆盖质量的要求。同时当传感器节点部署完毕并开始工作后, 随着目标点周围传感器节点的能量逐步耗尽, 覆盖目标点的节点数也会不断减少, 使得网络达不到点覆盖质量的要求。为了有效评估点覆盖质量, 本文基于蒙特卡罗 (MC) 算法提出一种传感器网络目标点的覆盖质量评估技术, 从而为是否需要进一步补充节点提供依据, 以保证网络中监测的目标点的覆盖质量。

本文接下来介绍了传感器网络节点覆盖问题的研究进展, 在此基础上提出了一种基于蒙特卡罗 (MC) 算法的传感器网络目标点覆盖质量评估技术, 并分析了该技术的可行性。最后通过实验验证了该技术的有效性。

2 相关研究

传感器网络是目前研究的一个热点,它具有许多具有挑战性的技术难题,覆盖问题即是其中之一.覆盖可以认为是衡量传感器网络质量的一个标准.例如,在战场上部署大量传感器节点来监视特定地域的敌情.这其中有一个关键问题是怎样部署传感器节点才能使给定的区域完全涵盖在网络的监视之下,并且一旦出现情况能迅速将信息传送到设在后方的网络情报收集中心.解决这个问题有两个难点,一是如何使得任务区域内的所有目标点均在网络的有效监视之下;二是传感器节点的能耗是有限的,随着时间的推移,部分节点电池能源耗尽导致失去功效,从而会导致网络中出现一些监视的盲点,如何发现并消除这些盲点成为一个棘手的问题.

针对第一个难点,目前的解决方法是从几何学的角度来讨论传感器网络的覆盖问题,从而使任务区域均处于网络的完全监视之下.如 Meguerdichain, S 等人^[1]提出了覆盖度的概念,用于度量目标穿越传感器网络时的可检测性问题. Liu B 等人^[2]讨论了达到完全覆盖所需要的临界密度问题.而 Adlakha, S^[3]提出了一种计算有效检测半径的方法,可以计算传感器网络在完全覆盖条件下的临界节点密度.针对第二个难点,目前提出的解决方法是利用传感器节点的能源策略和应用特性,进行有效地节能,从而延长网络节点的寿命.如 Schurgers C^[4]提出通过调度节点的值守时间来节省能耗.由于节点呈随机分布,暂时关闭部分冗余节点从网络全局来看是可行的,可以使得所有节点轮流依次得到休眠,从而提高整个网络系统的寿命. M. Cardei^[5]将上述思想进行了延伸,将所有节点分成若干个不相交的集合,每个集合可完全覆盖整个地区.这些节点集合依次被唤醒,只要一个集合的节点处于工作状态,则可由其完成监测任务.

但是以上的解决方法都是设定为网络节点只进行一次部署.但是实际上由于任务区域的条件复杂以及传感器节点自身所具有极其有限的能源,所以依靠进行一次部署就使得网络在完成监测任务前始终满足覆盖质量的想法不太现实.因此本文认为应该考虑多次部署节点的情况,即允许网络在检测到点覆盖质量下降后进行补充部署.而这就需要定期检测传感器网络的点覆盖质量.就目前而言,尚未看到有关点覆盖质量检测方面的文献.

3 基于 MC 算法的点覆盖质量检测技术

本文通过蒙特卡罗 (MC) 算法^[6]来解决对任务区域的点覆盖质量的评估问题. MC 算法是一种概率算法. 概率算法的一大特点就是对所求解问题的同一实例用同一概率算法求解两次可能得到完全不同的效果. 而 MC 算法会得到问题较为准确的解. 对于许多问题来说, 近似解毫无意义. 例如, 一个判定问题其解为“是”或“否”, 二者必居其一, 不存在任何近似解答. 用蒙特卡罗算法能求得问题的一个解, 但这个解未必是正确的. 求得正确解的概率依赖于算法所用的频度. 算法所用的频度越高, 得到正确解的概率就越高. 通过证明显示, 本文所提出的算法调用偏假的 MC 算法最多六次, 就可以得到超过

99% 的准确率.

下面本文对所提出的基于 MC 算法的点覆盖检测技术进行一下描述.

为方便描述, 我们先给出以下几个定义.

定义 1 网络中可以覆盖目标点的传感器节点的数目称为目标点的覆盖质量.

定义 2 算法正确解决问题的概率称为正确率.

定义 3 设网络能够监测目标点所需的最低覆盖质量为 k , 如果某目标点 p 的覆盖质量大于或等于 k , 则我们称该目标点符合 k -cover. 符合 k -cover 的目标点可以被网络正确监测.

在传感器网络中, 由于传感器节点部署的随机性很大, 因此可能存在一些监视的盲点. 同时随着目标点周围传感器节点的能量逐步消耗, 会导致网络节点失效, 所以覆盖目标点的网络节点数目是不断减少的, 特别当网络规模较大, 目标点数目相对较多时, 我们可以用 MC 算法评估传感器网络监听目标点的质量, 从而判断是否需要实施进一步的节点部署, 为重新建立合适的网络拓扑结构做准备. 我们给出的评估技术由三个算法所组成.

算法 1 判断目标点的覆盖质量是否为 k :

(1) 从目标点的集合 W 中任意选取个点的集合 Q , 并且建立一个空集 S .

(2) 逐个判断这些点是否符合 k -cover, 将覆盖质量小于 k 的目标点的标识, 位置信息及其覆盖质量组成三元组加入 S 中.

(3) 如果集合 S 为空, 则返回真, 否则返回 S 并返回假.

算法 2 MC 算法:

(1) 调用算法 1 i 次, 如果返回假, 则中途退出并返回假和集合 S .

(2) 否则返回真.

算法 3:

调用算法 2, 如果算法 2 返回假, 则可以根据 S 来重新部署传感器节点, 比如在目标点附近加入一些新的传感器节点, 将附近那些冗余的传感器节点移至目标点处, 或者还可以给传感器节点充电; 重新部署完毕后再重新调用算法 2, 直到算法 2 返回真.

4 性能分析

假设 WSN 中传感器节点的最大邻居是 d , 则算法 1 的时间复杂度为 $O(v * d)$, 算法 2 时间复杂度为 $O(v * d * i)$.

定义 4 偏假算法: 设 $MC(x)$ 表示采用 MC 算法解某个判定问题 x , 其输出结果仅返回布尔判断值, 即真 (true) 或假 (false). 若 $MC(x)$ 返回假时, 与实际结果相符, 仅当返回真时, 才可能与实际结果不符, 则称此算法是偏假的.

引理 1 若所有目标点中是 k -cover 的比率为 $1 - p$ ($0 < p < 1$), 则任意选择 v 个目标点运行蒙特卡罗偏假算法的正确率高于 $1 - 1/e^{h-1}$ (当 $p * v > 1/h$ ($h > 1$) 时).

证明 算法 1 中, 第三步返回值为真的概率, 即为集合 S 为空的概率. 此时任意选择的 v 个目标点都是 k -cover 的概率

为

$$(1 - p)^v \tag{1}$$

那么偏假的算法 1 的正确率为

$$1 - (1 - p)^v \tag{2}$$

当 $p \rightarrow 0$ 时,因为我们假设 $p \approx v \cdot 1/h$,则式 2 大于 $1 - (1 - p)^{1/(h \cdot v)}$,这是一个单调递增函数,显然 $p=0$ 时,式 2 的值为 $1 - 1/e^{h^{-1}}$.

定义 5 设 p 是一个正实数,若 MC 算法以不小于 p 的概率返回一个正确解,则该 MC 算法称为是 p -correct 的.

定理 1 当 $p \approx 1/(h \cdot v)$, $m \approx p/j \approx 4$,加速比 $j > 1$,取 $h = 1.5$ 时,调用偏假的 MC 算法 1 最多 6 次,算法 2 将至少是 99% p -correct 的.

证明 设调用算法的次数为 i ,为使算法有效,必须满足

$$i \cdot v \approx m/j \tag{3}$$

取 $v = 1/(h \cdot p)$ (4),代入式(3)得

$$i/h \approx m \cdot p/j \tag{4}$$

我们考虑算法 2 调用偏假算法 1 i 共次的情况.若第一次就中断退出,根据引理 1,我们知道正确率大于 $1 - 1/e^{h^{-1}}$,依次类推,若算法 2 调用算法 1 至少 6 次,返回假时的正确率是

$$\frac{\sqrt{(1 - 1/e^{h^{-1}}) + 1/e^{h^{-1}}(1 - 1/e^{h^{-1}}) + \dots + 1/e^{h^{-1} \cdot (i-1)}(1 - 1/e^{h^{-1}})}}{i=6} = 1 - 1/e^{h^{-1} \cdot i} = 1 - 1/e^{(m/j) \cdot p} \approx 99\% \tag{5}$$

由以上的定理可知,随着算法 3 的执行,该算法就能够在多项式时间内找到覆盖数不超过 k 的目标点的集合,从而可以进行新的节点部署.

当传感器节点部署完毕开始工作后,目标点周围传感器节点的能量逐步耗尽,目标点的覆盖质量不断减少;当个别目标点的覆盖质量不满足监听要求时,就可以使用本算法快速找到这些目标点.

5 算法模拟

我们将 10000 个传感器均匀布置在 3000×4000 的区域内;再假设目标点总数 $m = 2000$;假设初始时只有 8 个目标点没有达到 k -cover ($k = 2$),即 $p = 0.4\%$;再假设节点失败率为 5% ;那么从实验得出加速比 $j \approx i/h$ 和对应的 MC 算法的正确率之间的关系如图 1:

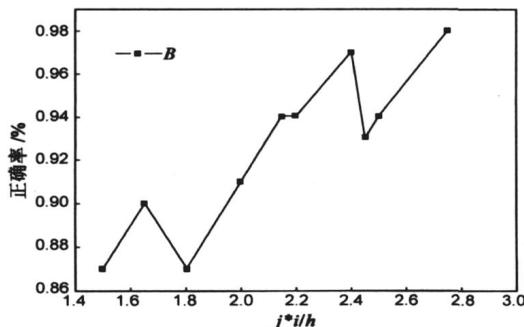


图 1 模拟试验得出的加速比 $j \cdot i/h$ 与 MC 算法正确率之间的关系

从上面的试验,我们看出随着的增大,正确率总体上是增大的,满足理论证明.因为在证明中我们使用了放大缩小的方法,所以实际中需要的调用次数明显偏低,从试验结果可以看出如果调用 6 次就可以找到所有的 8 个目标点.当 $p \approx v \cdot 1/h$ 时,可以通过 MC 算法以很高的概率找到不符合 k -cover 的目标点的集合,如果我们进一步进行节点的部署可以使几乎 100% 的目标点符合 k -cover.

6 结论

考虑到无线传感器网络随着时间的推移,有些传感器会失效而导致点覆盖质量的下降.从而提出了一种基于蒙特卡罗算法的传感器网络点覆盖质量评估技术.分析表明,反复使用该技术有限次,可以使点覆盖质量评估的正确率超过 99%,从而可以有效解决无线传感器网络中的点覆盖质量评估问题,为节点的补充提供依据.模拟实验也证明该技术是有效可行的.

参考文献:

- [1] S Meguerdichian, F Koushanfar, M Potkonjak, M Srivastava. Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks [J]. IEEE Infocom 2001, 4(3): 1380 - 1387.
- [2] Liu B, Towsley D. On the coverage and detectability of wireless sensor networks [OL]. WiOpt '03: Modeling and optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, Sophia-Antipolis, France, 2003, <http://citeseer.ist.psu.edu/liu03coverage.html>.
- [3] Adlakh S, Srivastava M. Critical density thresholds for coverage in wireless sensor networks [A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '03) [C]. New Orleans, USA, 2003. 1615 - 1620.
- [4] Schurgers C, Tsiatsis V, Srivastava M. STEM: topology management for energy efficient sensor networks [A]. The 2002 IEEE Aerospace Conference [C]. Big Sky, USA, 2002. 1099 - 1108.
- [5] M Cardei, D Z Du. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization [J]. ACM Wireless Networks, 2005, 11(3): 333 - 340.
- [6] 王晓东. 计算机算法设计与分析 (第 2 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.

作者简介:



王行甫 男, 1964 年 9 月出生于江苏徐州. 副教授. 主要研究方向: 网络安全、传感器网络、移动计算. E-mail: wangxfu@ustc.edu.cn