

传感器网络中无需地理信息的空洞填补算法

苏 瀚 汪 芸

(东南大学计算机科学与工程学院计算机网络与信息集成教育部重点实验室 南京 210096)

摘 要 传感器网络由大量的节点组成,节点大多使用电池供电,如果某块区域内传感器节点由于能量耗尽、物理损毁而导致空洞的产生,对于空洞区域,传感器网络将无法进行监测.当传感器网络出现空洞时,需要移动传感器节点填补覆盖空洞,实现网络自愈合.现有的空洞填补算法都依赖于精确地理位置信息,且迭代次数较多,收敛时间较长.文中提出了传感器网络中空洞填补的两个准则,即(1)填补节点的引入至少消除一段空洞边缘弧;(2)填补节点的引入不能造成空洞的分裂.文章证明了填补准则的正确性,并基于填补准则提出了在没有地理位置信息条件下传感器网络的自愈合算法 CHH.算法通过节点移动辅助定位的方法,实现了相邻节点间距离和方位的计算以及空洞边缘节点间距离的计算.空洞边缘节点根据填补准则,判断是否引入填补节点.算法 CHH 将空洞填补工作分布到空洞边缘节点上分别执行,并最终实现分布式的空洞填补.仿真实验结果表明,相比现有算法,CHH 不仅消除了地理位置信息的假设,并且提升了空洞填补性能和算法收敛速度.

关键词 传感器网络;覆盖空洞;分布式算法;网络自愈合

中图法分类号 TP301 **DOI 号:** 10.3724/SP.J.1016.2009.01957

A Self-Healing Algorithm without Location Information in Sensor Networks

SU Han WANG Yun

(Laboratory of Computer Network and Information Integration of Ministry of Education,
School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract Wireless sensor networks (WSN) are composed of many inexpensive sensor nodes which are equipped with limited battery energy. If no sensor node is available in an area due to used up energy or WSN destruction, for example, the area forms a coverage hole where no monitoring is applied. Mobile sensors are needed in order to heal such coverage holes. Most of the healing algorithms suppose sensors have location informations and it takes many iteration times for these algorithms to execute. This paper discusses the self-healing problem and proposes two principles for self-healing in WSNs. (1) A healing sensor should eliminate at least one Hole Boundary arc during the healing process. (2) The coverage hole should not be partitioned. The authors prove the correctness of the principles. Based on the principles, a novel self-healing algorithm CHH without location information is given. The algorithm calculates the distances and directions between neighbor sensors by using the method of sensor's moving. It also calculates the distances between hole boundary sensors. Hole boundary sensors then determine the positions of healing sensors according to the principles. The algorithm CHH distributes the healing work to different Hole Boundary Sensors and finally eliminates the Coverage Hole in WSN. Compared with some current state-of-the-art algorithms, CHH outperforms in coverage and convergence rate without location information.

Keywords wireless sensor network; coverage hole; distributed algorithm; self-healing

1 引 言

无线传感器网络已经成为当前研究的热点. 无线传感器网络由许多微型的传感器节点组成, 这些传感器节点具有感知目标环境的功能, 同时传感器节点之间可以在一定的通信频率下进行无线数据传输. 无线传感器网络技术广泛应用于军事、交通、医疗、灾难救援等领域. 随着微电子技术的不断发展, 单个传感器造价的降低, 使得在应用中大规模地部署传感器节点成为可能. 在对人员无法到达的恶劣环境进行监测时, 传感器网络可以替代人成为有效的工具. 在军事环境中传感器网络也可以替代人对战场环境进行实时监测. 当监测区域内的传感器节点由于各种原因不能工作时, 将造成覆盖空洞. 因此在实际应用中如何确定覆盖空洞边界, 并对出现的覆盖空洞进行填补成为传感器网络研究的工作重点.

现有工作主要包括两部分: 空洞边缘探测和覆盖空洞填补. 在空洞边缘探测方面, 文献[1-2]提出了传感器网络中满足覆盖性能的概率的判定方法. 文献[3-6]采用 Voronoi 图实现空洞探测的方法. 文献[7-10]提出了在没有地理位置信息条件下实现空洞边界的测定的方法. 在空洞边界确定的前提条件下, 在空洞填补方面也有大量的研究结果. Lam^[11]和 Sekhar^[12]提出了在传感器网络中通过节点的大规模移动实现节点的近似均匀分布. Wang^[5]、Ghosh^[13]和 Shiu^[14]提出了将 Voronoi 图作为解决空洞覆盖问题的方法, Wang^[15]和 Kumar^[16]使用网格对传感器网络进行划分并进行空洞填补. 虽然在空洞边界探测方面, 很多研究去除了地理位置信息的假设条件, 但是在覆盖空洞填补的现有研究中, 很少将地理位置信息的假设条件去除. 同时目前使用单位圆模型的空洞覆盖算法, 没有实现对覆盖空洞区域的完全填补.

现有的覆盖空洞填补方法都假定传感器节点拥有精确的地理位置信息, 在缺乏地理位置信息的条件下, 现有的空洞填补算法都将失去作用. 但是地理位置信息的获取需要节点装备 GPS 定位设备或者部署大量用于定位的信标节点. 采用 GPS 不仅价格较高而且受环境影响较大. 在卫星信号受到干扰或者无法到达的区域(如水下环境、地下隧道), 传感器网络将无法获取地理位置信息. 采用信标节点的方法, 定位的精度往往和信标节点的部署紧密相关, 在

信标节点数量不够或者被破坏的情况下, 定位算法将无法正常工作. 本文基于现有的空洞探测模型, 在传感器网络空洞边缘节点能够探测到空洞存在的基础上, 使用移动传感器节点的策略, 实现覆盖空洞的填补. 和现有填补方法不同的是, 本文提出的覆盖空洞填补算法不需要地理位置信息, 实现了对覆盖空洞的完全填补.

本文的主要贡献包括: (1) 提出在传感器网络没有地理位置信息辅助的条件下, 通过节点的二次移动实现邻居节点相互间方位的确定方法; (2) 提出了传感器网络空洞填补的两个准则, 并证明了填补准则的正确性; (3) 在满足填补准则的基础上, 实现了简单、高效的分布式空洞填补算法 CHH, 在没有地理位置信息的条件下, 实现了覆盖空洞的完全填补.

本文第 2 节是空洞填补的相关工作; 第 3 节提出本文的系统模型和问题描述; 第 4 节在此基础上提出一个分布式的空洞填补算法 CHH; 第 5 节是实验和仿真; 最后是结论.

2 相关工作

2.1 空洞边界探测

在进行覆盖空洞填补的过程中, 首先对覆盖空洞进行探测, 精确地确定空洞的方位和大小, 为空洞覆盖提供条件. 文献[1-2]提出了传感器网络中满足覆盖性能的概率的判定方法. 文献[3-6]提出了采用计算几何学中的 Voronoi 图和 Delaunary 三角形原理实现空洞探测的方法. Rao^[7]提出了采用虚拟坐标的方式实现空洞边界的测定. 此外, Gao^[8]首次提出了在没有地理位置信息的条件下实现对空洞边缘的确定方法, 并在不同的空洞形状条件下实现了空洞边缘节点的确定. Li^[9]等人提出了在传感器网络中一种基于节点连通度的空洞探测方法, 该方法基于节点连通的假设, 实现了分布式的覆盖空洞探测. 该方法基于 3mesh 覆盖环的空洞边缘监测, 简单高效, 但是对于某些特殊形状的空洞, 无法实现 100% 的空洞边缘判定. Bejerano^[10]提出了在不依赖于地理位置信息的前提条件下, 在相对坐标系中, 实现空洞边缘的确定, 同时该方法还实现了 k 覆盖空洞的确定. 该方法不依赖于节点精确地理位置信息, 需要传感器节点之间具有误差较低的精确测距. 本文的空洞填补算法基于 Bejerano^[10]的空洞探测算法实现.

2.2 覆盖空洞填补

当传感器网络探测到覆盖空洞的方位和小时,就可使用空洞填补算法对空洞进行填补,使网络满足最基本的单覆盖的特性. Lam^[11]提出了在传感器网络中通过节点的大规模移动实现节点的近似均匀分布,消除覆盖空洞的算法,该算法消除了覆盖空洞,但是该算法需要网络中所有节点进行大规模的移动,移动代价相当高.此外该算法还需要节点具有精确的地理位置信息,限制了算法的实用性.该算法使用逐步迭代的方式,节点从初始的随机分布到最终的满足覆盖的近似均匀分布需经过多次迭代,收敛时间较长. Sekhar^[12]提出了在传感器网络中通过空洞边缘的节点的移动消除覆盖空洞的算法.该算法保证了在空洞周围节点移动能力范围内,能够消除较小的覆盖空洞.算法移动节点较少,代价较小.但是该方法无法解决多个节点失效时产生的大范围的覆盖空洞.同时该算法只移动空洞边缘的临近节点,即使空洞范围较小,也无法实现空洞区域的全覆盖.最后该算法依赖于地理位置信息.

Wang^[5]、Ghosh^[13]和 Shiu^[14]提出了将 Voronoi 图作为解决空洞覆盖问题的方法,该方法可重新部署传感器网络中的节点,最大效率利用节点的覆盖区域,降低覆盖空洞大小.基于 Voronoi 图方法需对网络内所有传感器节点进行多次迭代,计算时间较长.该方法需要每个节点都参与移动,移动代价较大.同时该方法只保证了最大限度利用节点的覆盖区域而无法实现对目标区域的完全覆盖.该方法需要节点之间具有精确地理位置信息.

Wang^[15]采用网格覆盖的方式对传感器网络目标区域进行划分.该方法采用逐步移动节点的方式,将部署密度高的区域中的传感器节点逐步移动到部署密度低的区域.该方法简化了传感器网络的覆盖模型,降低了覆盖计算的复杂程度,同时限制了移动节点的数量以及节点的移动距离.但是该方法不仅需要节点具有精确地理位置信息,同时由于采用网格覆盖的方式,虽然简化了覆盖模型,也一定程度忽略了冗余覆盖,造成节点覆盖的浪费.

Kumar^[16]提出了使用网格对传感器网络进行划分,并提出了在网络中出现覆盖空洞的条件下,实现了覆盖空洞的填补.算法实现了对空洞区域的完全覆盖,但是该算法完全依赖于节点地理位置信息,覆盖模型较为简单.

现有的空洞填补算法虽然都在一定假设条件下达到了一定的效果,但都依赖于精确地理位置信息.

在没有地理位置信息的条件下,现有算法大多无法正常工作.现有使用单位圆模型的算法,往往只实现了对目标空洞的概率覆盖,而没有实现对覆盖空洞区域的完全覆盖.最后,在对大范围覆盖空洞进行填补的算法中往往需要较长的收敛时间,算法迭代次数较多,限制了算法的实用性.

3 模型和问题描述

3.1 前提假设

如果传感器网络中节点的通信半径 R_c 大于两倍的感知半径 R_s ,且传感器网络满足覆盖,则为连通网络^[17].本文假设传感器节点的监测范围和通信区域满足单位圆性质,同时传感器节点的通信半径大于两倍的感知半径.传感器节点不拥有精确地理位置信息,监测区域边界上的传感器节点都能够正确标识自身,不会将监测区域的边界误判为空洞区域.本文使用 Bejerano^[10]的空洞探测方法实现空洞边缘的探测.利用文献[18-19]中的方法,相邻传感器节点之间具有误差较低的精确测距.

现有大多数空洞填补算法都基于假设网络是连通的,覆盖空洞是闭合空洞,因此本文同样假设网络是连通的,覆盖空洞是闭合空洞.本文同时假设存在一定数量具有移动能力的用于填补空洞的传感器节点.这些传感器节点并不参加网络覆盖的计算,它们对传感器网络的覆盖性能不造成额外的影响,即传感器网络不会由于这些填补节点的离开而造成新的覆盖空洞.移动节点同时可以通过二次移动的方法辅助节点定位.在现有的空洞填补算法中,有些工作假设填补节点的移动将造成新的覆盖空洞,应在节点移动过程中一并加以考虑.同样存在一些工作,假设填补节点为网络中额外部署的节点,这些节点的移动不会造成新的覆盖空洞.本文关注大范围空洞的填补过程,因此采用后一个假设.

3.2 术语

覆盖空洞.传感器网络中如果存在一片连续的区域不被任何传感器节点监测区域所覆盖,那么这片未被监测的连续区域称为一个覆盖空洞.如图 1 中黑色区域所示.

感知邻居.传感器网络中,如果两个传感器节点的感知区域存在公共部分,则称这两个传感器节点互为感知邻居节点.由假设条件知,互为感知邻居关系的节点能够实现互相通信.如图 2 所示节点 A 和节点 B 的感知区域存在公共部分,它们互为感知邻居.

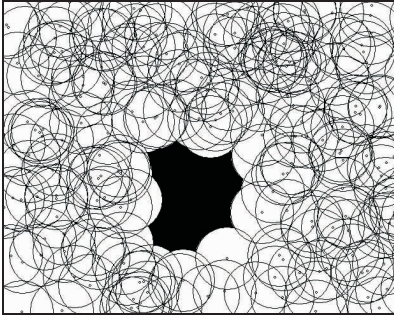


图 1 覆盖空洞

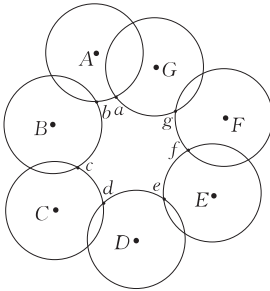


图 2 空洞边缘交点

空洞边缘节点. 传感器网络中如果存在一个传感器节点, 其感知范围边缘某段圆弧未被其它传感器节点的感知区域所覆盖, 则称该节点为空洞边缘节点. 如图 2 所示, 节点 A、B、C、D、E、F 和 G 互相邻接围成一个空洞区域. 该区域不处于任何传感器节点的感知范围之内, 节点 A、B、C、D、E、F 和 G 的感知范围边界上都存在圆弧未被其它传感器节点覆盖, 因此节点 A、B、C、D、E、F 和 G 都是空洞边缘节点.

空洞边缘交点. 传感器网络中如果存在两个空洞边缘节点互为感知邻居, 且这两个传感器节点中存在一个交点, 不被这两个节点之外的第 3 个节点的感知范围所覆盖, 则称该交点为空洞边缘交点. 如图 2 中, 大写字母表示空洞边缘节点, 小写字母表示空洞边缘交点. 节点 A、B、C、D、E、F 和 G 两两相交, 交点 a、b、c、d、e、f 和 g 为空洞边缘交点.

空洞边缘弧. 相邻的空洞边缘交点通过圆弧相连, 节点感知区域边缘上连接空洞边缘交点的圆弧称为空洞边缘弧.

空洞边缘邻居. 传感器网络中如果两个节点互为感知邻居并且这两个节点之间的交点至少有一个为空洞边缘交点, 则这两个节点互为空洞边缘邻居. 如图 2 中节点 A 和 B 互为空洞边缘邻居.

3.3 空洞填补准则

在进行传感器网络的空洞填补过程中, 本文采

用逐步移动传感器节点的方法进行空洞填补. 通过不断消除现有的空洞边缘弧实现减少空洞面积, 并最终消除覆盖空洞的目标. 在进行填补过程中, 本文采用分布式的填补算法. 相比集中式算法而言, 分布式算法将整个空洞的填补工作分布到若干节点, 由不同节点共同实现填补工作. 降低了由集中式算法带来的单个节点负载过重、能耗过多的缺点. 同时避免了集中式算法中所有节点都与一个集中点通信, 造成局部区域负载过重、网络中节点能耗不均的现象. 由于采用分布式的空洞填补策略, 每个空洞边缘节点都根据自身拥有的局部信息进行空洞位置的判断和填补节点的选择.

在进行空洞填补的过程中, 本文引入以下两条准则: (1) 每个填补节点的引入至少消除一段空洞边缘弧. (2) 填补节点的引入不能造成空洞的分裂, 即不会增加当前空洞的数量. 首先在消除空洞边缘弧的过程中, 如果对于每一段空洞边缘弧, 都使用多个移动节点进行填补, 将导致空洞边缘弧的数量不断增加. 而空洞边缘弧数量的增加将直接导致空洞填补工作的增加. 其次, 如果在空洞填补过程中空洞不断地被分裂, 将产生大量的小的空洞碎片, 那么填补这些小的空洞碎片不仅导致额外的节点移动, 还将导致大量的冗余覆盖的产生. 同时在本文中, 空洞边界的确定需要所有空洞边缘节点的协作, 空洞的分裂也将造成空洞边界确定工作的进一步增加.

引理 1. 如果填补节点消除了空洞边缘节点的空洞边缘弧, 则该节点的空洞边缘邻居的空洞边缘交点个数不会增加.

证明. 任意一个圆与其它圆在不重合的条件下, 交点最多只有两个. 如图 3(a) 所示, 大写字母表示空洞边缘节点, 小写字母表示空洞边缘交点. 不失一般性, 假设填补节点 D 消除了空洞边缘节点 A 的空洞边缘弧, 则 D 的感知范围包含了 A 与邻居 B 的空洞边缘交点 a, 因此 D 与 B 的感知范围相交, 交点最多为两个. 如果 D 与 B 只存在一个交点, 则该交点就是 A 与 B 的交点 a, 因此 D 的引入没有增加 B 的空洞边缘交点个数. 如果 D 与 B 存在两个交点, 则 D 与 B 的两个交点 d 和 e 分别位于交点 a 的两侧. 当 D 的覆盖范围包含交点 c 时, B 的空洞边缘交点数量为 0 或者 1, 当 D 的覆盖范围不包含交点 c 时, B 的空洞边缘交点数量为 2, 因此引入 D 没有增加 B 的空洞边缘交点数量. 证毕.

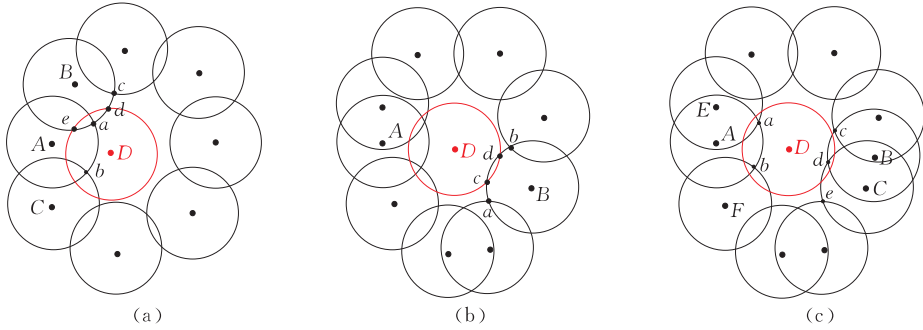


图 3 填补节点位置示意图

在空洞填补的过程中,需要保证覆盖空洞不会由于当前填补节点的引入而造成当前空洞数量的变化.即填补节点不应该将覆盖空洞分裂.如果每次填补空洞都被分裂,最终会由于分裂的空洞个数过多而造成空洞填补工作的大大增加.同时如果每次分裂出的空洞都很小,都远小于一个节点的覆盖范围,那么对每个小空洞都使用一个传感器节点进行填补,将造成很大的覆盖冗余和浪费.

定理 1. 在空洞闭合的条件下,如果填补节点造成一个空洞边缘节点的空洞边缘交点数量的增加,则空洞被分裂.

证明. 如图 3(b)所示,不失一般性,假设填补节点 D 消除了 A 的空洞边缘弧,同时造成 B 的空洞边缘节点的增加.由引理 1, D 在消除 A 的空洞边缘弧的条件下,不会导致 A 的邻居的空洞边缘交点的增加.因此节点 B 不是 A 的空洞边缘邻居.由于 B 的空洞边缘交点增加,因此 D 没有消除 B 原有的空洞边缘交点 a, b . D 与 B 感知区域的交点位于 a, b 之间.由于空洞闭合且 A 与 B 不是空洞边缘邻居,因此 D 的引入分割了 B 原有的两个交点 a, b . 空洞区域由于 D 的引入分为两个互不连通的部分,造成空洞分裂. 证毕.

但是定理 1 仅仅是空洞被分裂的充分条件,而非必要条件.图 3(c)所示的情况不满足定理 1 的条件,但是空洞同样被分裂.图 3(c)中填补节点 D 消除了节点 A 的空洞边缘弧,同时与空洞边缘节点 B, C 相交. D 的引入消除了 B 的一个空洞边缘交点 d ,同时增加了一个空洞边缘交点,因此 B 的空洞边缘交点没有增加.同样对于节点 C 来说,节点 D 的引入没有造成空洞边缘交点的增加,但是空洞仍然被分裂.在空洞闭合的条件下,如果填补节点 D 填补了 A 的空洞边缘弧,则 D 的感知区域同时与若干个空洞边缘节点的空洞边缘弧相交(公共部分为一段圆弧).这些节点按照彼此间的邻居关系可以划

分为若干个节点集合 Q_i . 对于任意一个集合 Q_i , 集合中节点的空洞边缘交点总数为 n_i 个. 如图 3(c) 所示, 填补节点 D 消除了节点 A 的空洞边缘弧, 同时将相交的空洞边缘节点分为 3 个集合 $\{E\}$ 、 $\{F\}$ 和 $\{B, C\}$, 其空洞边缘交点个数分别为 2、2 和 3.

定理 2. 当且仅当 $\forall Q_i$, 填补节点消除了全部 n_i 个空洞边缘交点, 空洞被完全填补.

证明. 采用反证法. 假设 $\exists Q_i$, 填补节点消除的空洞边缘交点数量小于 n_i 个, 同时空洞被完全填补. 因此存在一个或一个以上的空洞边缘交点未被消除, 在未被消除的空洞边缘交点周围存在空洞区域未被填补. 产生矛盾, 因此不存在这样的 Q_i , 被消除的空洞边缘交点数量小于 n_i 个. 即 $\forall Q_i$, 填补节点消除了全部 n_i 个空洞边缘交点, 覆盖空洞被完全填补.

同理, 假设空洞没有被完全填补, 同时 $\forall Q_i$, 所有的 n_i 个空洞边缘交点都被消除. 由于空洞未被填补, 必然存在一个或一个以上的空洞边缘交点未被消除. 因此一定存在空洞边缘节点属于某个集合 Q_i , 且该节点的空洞边缘交点未被消除. 这与假设产生矛盾. 因此当空洞完全填补时, $\forall Q_i$, 集合中全部 n_i 个空洞边缘交点都被消除. 证毕.

推论 1. 当且仅当 $\forall Q_i$, 填补节点消除的空洞边缘交点个数大于等于 $n_i - 1$, 空洞不会分裂.

推论 2. 当且仅当 $\exists Q_i$, 填补节点消除的空洞边缘交点个数小于 $n_i - 1$, 空洞被分裂.

推论 3. 当且仅当 $\forall Q_i$, 被消除的空洞边缘交点个数为 $n_i - x$, 集合 Q_i 内的节点与填补节点造成的空洞个数为 x .

有关推论的证明详见附录 1.

3.4 填补准则终止性

根据填补准则算法中每次填补节点至少填补一个空洞边缘弧, 在一些特殊情况下, 可能出现空洞圆弧过大而无法一次填补的情况. 对于这样的空洞边

缘弧,无法立刻对其进行填补,需要先对其它的空洞边缘弧进行优先填补.

引理 2. 空洞边缘弧无法被一个填补节点消除,当且仅当节点的空洞边缘弧大于等于 180° .

证明. 当空洞边缘弧大于等于 180° 时,如果使用一个填补节点则该填补节点必与原节点重合,因此,一个填补节点的引入无法消除该空洞边缘弧. 反之易证. 证毕.

由引理 2 可知,当空洞边缘节点的空洞边缘弧大于等于 180° 的情况下,无法仅仅使用一个填补节点消除. 此时可以优先对该空洞边缘节点的空洞邻居进行优先填补. 但是需要保证这些大于等于 180° 的空洞边缘弧最终能够被填补节点消除.

引理 3. 在空洞闭合的条件下,空洞中大于 180° 的空洞边缘弧,最终能够被填补节点消除.

证明. 采用反证法. 假设按照本文中的空洞填补准则不断对小于 180° 的圆弧进行填补,假设填补到最后,仍然存在着大于等于 180° 圆弧的空洞边缘,且无法被填补,则必有当前空洞的边缘圆弧都大于等于 180° ,否则还可以继续进行填补. 那么剩余的闭合空洞边缘圆弧都大于 180° . 由于空洞是闭合的,可将当前空洞边缘节点互相连接形成一个多边形,即该多边形每个内角都大于 180° . 即多边形内角和大于 $180 \times n$, n 为边数. 由于任意多边形内角和满足 $180 \times (n-2)$,因此产生矛盾. 大于 180° 的空洞圆弧最终一定能够被算法填补. 证毕.

引理 4. 在进行空洞填补过程中,如果满足两个填补准则,那么每次填补都不会导致空洞边缘交点数量的增加.

证明. 当满足准则 1 时,每次填补节点的引入都将消除一个空洞边缘弧,即消除了至少两个空洞边缘交点,引入的空洞边缘交点最多为两个. 同时由于算法满足准则 2,填补过程中不会造成空洞的分裂,由推论 1,对于 $\forall Q_i$,消除的空洞边缘交点至少为 $n_i - 1$ 个 ($n_i > 2$),增加的空洞边缘交点为 1 个, $\forall Q_i$,空洞边缘交点都不会增加. 因此空洞边缘交点的总数不会增加. 证毕.

定理 3. 在闭合空洞的条件下,如果填补算法满足两个准则,则空洞最终会被填补.

证明. 假设在闭合空洞的条件下,填补算法满足两个准则,但是空洞无法被完全填补,则存在两种可能.

情况 1. 任意空洞边缘弧都大于等于 180° . 由引理 3,空洞中大于 180° 的空洞边缘弧,最终能够被填

补,产生矛盾.

情况 2. 对于任意空洞边缘弧,填补节点在消除空洞边缘弧的同时都将造成空洞分裂. 可以移动填补节点,在消除空洞边缘弧的条件下避免空洞分裂,因此也能够实现空洞的填补. 产生矛盾. 因此满足两个准则的填补算法一定能够实现空洞的完全填补.

证毕.

由上可知,在拥有足够多填补节点的情况下,如果一个分布式填补算法遵循以上两条准则,填补算法能够最终实现传感器网络中闭合空洞的填补. 填补节点在消除空洞边缘弧、减少了空洞区域的面积的过程中不会导致空洞边缘交点数量的增加.

3.5 问题描述

本文所解决的问题是在传感器节点没有地理位置信息的条件下,使用单位圆模型,对传感器网络中大范围覆盖空洞的填补工作. 本文在现有空洞探测研究的基础上,将提出不依靠地理位置信息对覆盖空洞进行填补的分布式算法,该算法遵循两个空洞填补准则. 使用单位圆模型对覆盖空洞进行最优填补本身是一个 NP 难问题,即不存在多项式时间内的最优解算法. 在满足空洞填补准则的条件下,本文所提出的算法将实现对覆盖空洞的近似优化填补.

4 覆盖空洞填补算法 CHH

4.1 算法概述

在遵循空洞填补准则的基础上,本文提出了空洞填补算法 CHH,算法分为以下 4 个步骤:(1)传感器网络通过节点二次移动辅助定位的方式,确定各个节点与邻居节点间的方位.(2)基于 Bejerano^[10] 中的空洞探测算法,空洞边缘节点确定空洞的边缘.(3)空洞边缘节点根据邻居节点间的方位和距离,确定各个节点到其它空洞边缘节点和空洞边缘交点的距离的方位.(4)遵循空洞填补准则,空洞边缘节点寻找填补节点进行覆盖空洞的填补,直至空洞被完全覆盖.

算法 CHH 中,网络所有的传感器节点都将执行步骤 1,以确定邻居节点相对自身的方位. 当节点确定自身为空洞边缘节点后,所有的空洞边缘节点都将执行步骤 2~4. 相对集中式算法,CHH 算法将空洞填补工作分布到空洞边缘节点执行,实现了对覆盖空洞的近似优化填补.

4.2 步骤 1:计算邻居节点方位

由假设前提,相邻传感器节点间不存在精确的

地理位置信息,节点之间只有相对距离信息,因此无法得到相邻节点的绝对位置和坐标.需要从节点之间的距离信息估算出相邻节点之间的绝对位置.本文采用单个传感器节点移动两次的方法实现相邻节点间位置的估算.

如图 4(a)所示,不失一般性,假设节点 A 有两个邻居节点 B 和 C , A 、 B 和 C 之间知道彼此之间的相对距离,节点 A 具有移动能力.对于 A 来说,仅仅通过距离无法确定 B 和 C 的具体位置.为了确定 B 、 C 的具体方位,需要让 A 进行移动.首先对于节点 A ,确定一个具体方位作为其 x 轴方向. A 向已知方位的 x 轴移动一小段距离,图中选定正东方向为 x 轴正方向,移动到 A' 位置. $L_{AA'}$ 代表 A 和 A' 之间的欧几里德距离,为了 A 在移动到 A' 后仍然能够与 B 和 C 通信,需要保证 $L_{AA'} \leq \min(R_C - L_{AC}, R_C - L_{AB})$. R_C 代表节点的通信半径. A 在移动到 A' 后能够得到三角形三边 $L_{AA'}$ 、 L_{AB} 和 $L_{BA'}$,因此可以计算出 B 在 x 轴上相对于 A 的夹角 θ_1 ,同理 C 也能够得到在 x 轴上相对于 A 的夹角 θ_2 .对于 A 来说,经过一次移动可以确定其邻居节点和空洞相对于其移动方位的夹角.但是仍然存在两种可能,即 B 和 C 位置或者 B' 和 C' 位置.为了解决图中的节点位置翻转现象, A 需要进行第二次移动,如图 4(a)所示,选定正北方向为节点的 y 轴正方向, A 向 y 轴移动一段距离,采用第一次相同的方法,这样, A 最终能够判断 B 、 C 的绝对位置.

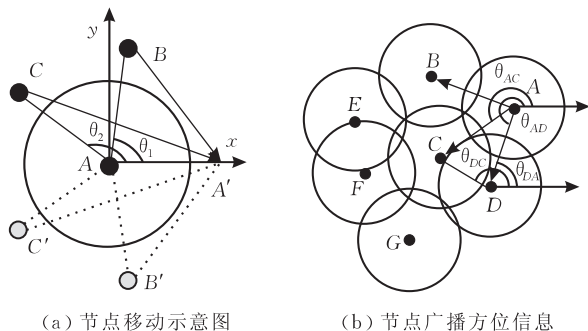


图 4 节点方位的确定

假设存在传感器节点 A 和 B ,则 B 在 A 的坐标系中的距离和方位角表示为 L_{AB} 和 θ_{AB} .当一个节点通过移动的方式得到自己相邻节点以及空洞边缘的位置后,可以将位置信息通过广播的方式散步到全网,如图 4(b)所示, A 经过两次移动得到 B 、 C 和 D 的位置, D 可以得到在自身坐标系中 A 的方位 θ_{DA} . D 与 C 通信,以确定 C 在自身坐标系中的方位 θ_{DC} .当 $\theta_{AD} > \theta_{AC}$ 时, $\theta_{DC} = \theta_{DA} + \angle ADC$;当 $\theta_{AD} < \theta_{AC}$ 时,

$\theta_{DC} = \theta_{DA} - \angle ADC$.采用 Bejerano^[10]的方法, D 能够得到其余的感知邻居节点在自身坐标系中的确切方位,并将该方位信息发送给自己的所有感知邻居节点,直至网络中所有节点都实现对自身邻居方位的确定.

由上可知,只需要一个传感器节点移动两次,并将计算结果通过广播的方式扩散到网络中的其它传感器节点.网络中大多数节点都能够根据节点间距离估算的结果,得到自己的感知邻居相对自身的距离和方位.当节点部署密度达到一定条件下,传感器网络中绝大多数节点都能够实现邻居节点方位的判断.但是在某些条件下仍然存在部分节点无法定位的情况.具体分析过程见附录 2.对于不能定位的节点,可以通过 Bejerano^[10]的方法确定其是否为一个空洞边缘节点.如果节点是空洞边缘节点,则需要再次使用移动节点的二次移动帮助节点定位.

4.3 步骤 2:确定空洞边缘

在进行覆盖空洞填补前,首先需要确定整个覆盖空洞的所有空洞边缘节点,如图 5 所示,假设 A 通过采用 Bejerano^[10]的方法确定本身是一个空洞边缘节点,并通过计算同时得到其感知邻居节点的方位, A 启动空洞探测过程. A 将空洞探测报文分别发送给自己的空洞边缘邻居 B 和 G . B 和 G 同时将空洞探测报文发送给自己的下一跳空洞边缘邻居.如果空洞满足闭合的条件,空洞探测报文最终将从两条路径返回节点 A .如果有多个空洞边缘节点启动了空洞探测过程,则在各个节点完成空洞边界探测过程后,通过选举的方式得到一个唯一的节点作为以后的计算发起者.任意一个覆盖空洞的空洞边缘节点集合,只存在一个空洞探测发起点.空洞探测发起点将通过得到的空洞边缘节点信息,确定空洞的边缘.

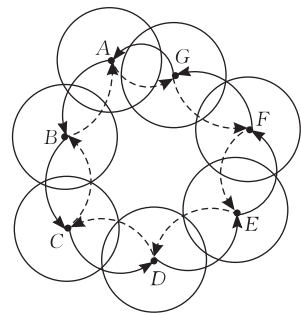


图 5 空洞边缘节点路由图

4.4 步骤 3:计算空洞边缘节点间距离

假设存在传感器节点 A 和 B ,则 B 在 A 的坐标系中的距离和方位角表示为 L_{AB} 和 θ_{AB} .每个节点都

能够计算出自身与报文传输路径上所有上跳空洞边缘节点的距离和方位. 如图 5, 对于路径 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow A$ 上的节点 C , 需要计算到 A 、 B 的距离和方位; 对于节点 D 需要计算到 A 、 B 、 C 的距离和方位, 以此类推. 如图 6 所示, B 将 A 和 B 之间的距离 L_{BA} 与 A 在自身坐标系中的方位 θ_{BA} 发送给节点 C . C 可以通过 B 和 C 之间的距离 L_{BC} 与 B 在自身坐标系中的方位角 θ_{CB} , 计算出 A 在自身坐标系中的距离 L_{CA} 与方位角 θ_{CA} . 计算结果如式(1)所示.

$$L_{CA} = \sqrt{L_{BC}^2 + L_{AB}^2 - 2L_{BC}L_{AB} \cos(\theta_{BA} - \theta_{CB} + \pi)}$$

$$\angle ACB = \arccos\left(\frac{L_{AC}^2 + L_{BC}^2 - L_{AB}^2}{2L_{BC}L_{AC}}\right)$$

$$\theta_{CA} = \theta_{CB} \pm \angle ACB \quad (1)$$

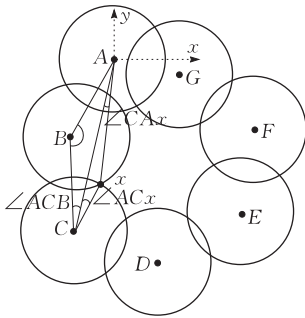


图 6 节点计算方位和距离

如果 $\theta_{CB} > \theta_{BA}$, 则第 3 项中 θ_{CA} 取“—”, $\theta_{CB} < \theta_{BA}$, 则第 3 项中 θ_{CA} 取“+”. 同理, 每个节点都计算出自身的空洞边缘交点与报文传输路径上所有上跳空洞边缘节点的距离和方位. 如图 6 所示, 对于路径 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow A$, 节点 C 将计算出自身的空洞边缘交点 x 相对 A 和 B 的距离和方位. Ax 之间的距离和方位计算过程如式(2)所示.

$$\theta_{Cx} = \theta_{CB} \pm \arccos\left(\frac{L_{BC}}{2R_s}\right),$$

$$\angle ACx = |\theta_{Cx} - \theta_{CA}|,$$

$$L_{Ax} = \sqrt{L_{AC}^2 + R_s^2 - 2L_{AC}R_s \cos \angle ACx},$$

$$\angle CAx = \arccos\left(\frac{L_{AC}^2 + L_{Ax}^2 - R_s^2}{2L_{AC}L_{Ax}}\right),$$

$$\theta_{ax} = \theta_{ac} \pm \angle cax \quad (2)$$

如果 C 是 B 的逆时针下跳节点, 式(2)中第 1 项为“—”; 否则, 式(2)中第 1 项为“+”. 如果 $\theta_{Cx} < \theta_{CA}$, 式(2)中第 5 项为“+”; 如果 $\theta_{Cx} > \theta_{CA}$, 式(2)中第 5 项为“—”.

通过以上的计算, 每个节点都根据自己上一跳节点的计算结果获得所有上跳节点在自身坐标系中

的距离和方位以及自身空洞边缘交点相对所有的上跳节点的距离和方位. 当经过两轮报文传输后, 所有的空洞边缘节点都能够得到与其它空洞边缘节点方位和距离以及自身空洞边缘交点与其它空洞边缘节点的距离和方位. 算法如表 1 所示.

表 1 节点距离、方位计算算法

If (节点是空洞探测出发点)
将探测报文发送给自己的空洞邻居节点;
Else { 等待空洞邻居节点信息;
计算本节点与所有上跳节点的距离和方位;
计算空洞边缘交点相对所有上跳节点的距离和方位;}
保存结果并将结果传输给自己的下一跳空洞邻居节点;

设空洞边缘节点的数量为 n , 则算法需要的数据传输次数为 $O(n)$. 由于每个节点都需要计算所有上跳节点的距离和方位以及自身空洞边缘交点相对上跳节点的距离和方位, 因此算法中每个空洞边缘节点的计算复杂度为 $O(n)$.

4.5 步骤 4: 空洞填补

4.5.1 计算填补节点位置

由空洞填补准则, 每次填补节点的引入都至少消除一个空洞边缘节点的空洞边缘弧, 同时不能使空洞发生分裂. 假设空洞边缘节点 A 的空洞边缘弧小于 180° , 如图 7 所示, 其空洞边缘邻居节点为 B 和 C . 同时节点 A 空洞边缘交点的角度分别为 θ_{Aj} 和 θ_{Ak} . D 为 A 的空洞边缘弧的填补节点. 为了填补该段圆弧, D 将 A 的空洞边缘弧完全覆盖. 因此有 D 相对 A 的距离 L_{AD} 和方位 θ_{AD} 如式(3)所示.

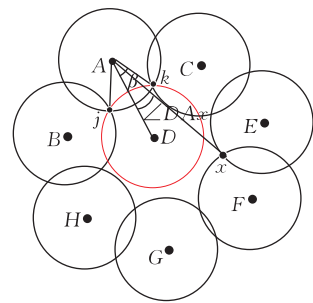


图 7 填补节点确定

$$\theta_{AD} = (\theta_{Aj} + \theta_{Ak})/2,$$

$$\beta = |(\theta_{Aj} - \theta_{Ak})/2|,$$

$$L_{AD} = 2R_s \cos \beta \quad (3)$$

4.5.2 填补节点引入的判断

如果填补节点的引入没有导致空洞的分裂, 则填补节点 D 可以移动到该位置. 否则节点 A 将不引入填补节点, 而将发送填补命令给自己的空洞边缘邻居节点, 由空洞边缘邻居节点来确定填补节点的位置. 由于每个空洞边缘节点都拥有了其它空洞边

缘节点相对自身及自身空洞边缘交点的距离和方位,节点将根据这些信息进行空洞分裂的判断.如图7所示,对于任意一个空洞边缘交点 x , A 可以向 x 所属的空洞边缘节点查询,得到 x 和自身的距离和方位角.并计算出填补节点与 x 的距离 L_{Dx} .如式(4)所示.

$$\angle DAx = |\theta_{AD} - \theta_{Ax}|,$$

$$L_{Dx} = \sqrt{L_{AD}^2 + L_{Ax}^2 - 2L_{AD}L_{Ax}\cos\angle DAx} \quad (4)$$

如果 L_{Dx} 小于感知半径 R_s ,则填补节点消除了空洞边缘交点 x ,反之填补节点感知范围与 x 不相交.根据空洞分裂的填补准则, A 能够通过填补节点与其它所有空洞边缘交点的关系,判断填补节点是否导致空洞分裂,并由此决定是否引入填补节点 D .

4.5.3 填补过程

当所有的空洞边缘节点都得到其它空洞边缘节点的距离和方位后,可以开始进行覆盖空洞的填补.填补过程中需要遵循空洞填补的两个准则.算法由空洞探测发起点开始,每个节点根据测量和计算得到的距离和方位信息,判定是否满足填补准则,从而决定是否需要引入填补节点.不失一般性,假设空洞探测发起点为 A ,如果满足填补条件, A 计算填补节点所在位置并将位置信息发送给所有的空洞边缘节点.收到信息的空洞边缘节点将填补节点的位置替换空洞边缘节点 A 的位置,并重新计算空洞边缘.计算完毕, A 将填补命令发送给自己的空洞边缘邻居 B ,由节点 B 进行空洞填补的计算.填补命令最终将回到空洞探测发起点 A ,此时满足填补准则的空洞边缘节点都计算出填补节点的位置. A 发出移动填补节点的指令,收到指令的填补节点移动到指定的空洞区域.在移动过程中需要避免多个空洞边缘节点请求同一个填补节点的情况.经过一轮的填补工作,所有满足条件的空洞边缘弧都被消除.移动到新位置的填补节点将成为新的空洞边缘节点,同时形成新的空洞边缘交点和空洞边缘弧.填补节点将重复执行步骤2~4,直至覆盖空洞被彻底填补.由定理3可知,填补算法在满足两个准则的条件下最终能够实现覆盖空洞的填补.

设空洞边缘节点的数量为 n ,空洞填补的轮数为 m ,则每轮中信息传输的总数为 $O(n^2)$,整个填补过程中信息传输次数为 $O(m \times n^2)$.算法中每个节点在收到填补节点命令后需要更新填补节点的位置信息,并且在放置填补节点的同时需要计算填补节点与所有空洞边缘交点的关系,因此算法中任意节点的计算复杂度为 $O(n)$.

5 仿真实验

仿真实验在一个 500×300 的矩形区域中随机部署300个传感器节点,传感器节点的感知半径设置为40.实验在目标区域内随机产生不同大小的闭合的覆盖空洞,实验仿真了在不同空洞条件下,算法进行空洞填补的结果.图8显示了初始条件下随机产生的一个覆盖空洞.图9显示了使用CHH算法对目标空洞进行填补后的传感器网络情况,其中图9中的灰色区域为填补节点的感知范围.

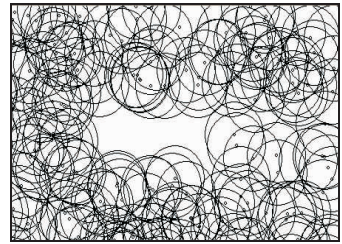


图8 初始空洞区域

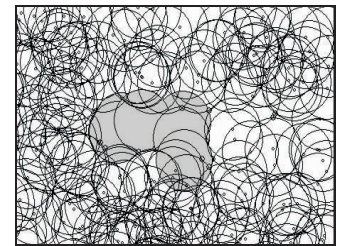


图9 算法执行后,空洞被填补

5.1 填补节点数量与空洞面积的关系

由图10可知,填补节点的数量与空洞面积存在很大的联系.在一些条件下,出现了空洞面积较小而填补节点数量较多的情况.这是由于算法所需要的填补节点数量不仅与空洞面积有关,同时与空洞边缘的形状相关.当空洞形状较不规则的条件下,可能

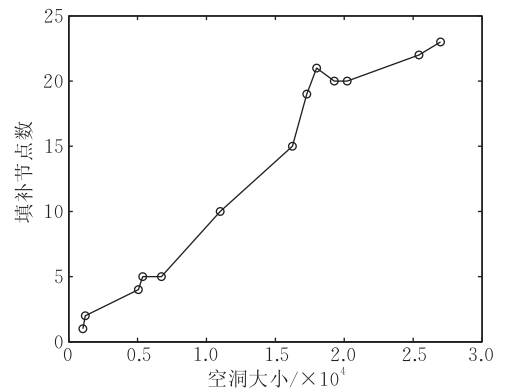


图10 填补节点数量与空洞大小关系

出现空洞面积较小而填补节点较多的情况. 但是总体上看, 算法需要填补节点的数量随着空洞面积而递增.

5.2 填补节点数量与空洞边缘弧的关系

图 11 可知, 填补节点数量与空洞边缘弧的数量存在很大的联系, 总体上看空洞边缘弧数量越大, 空洞面积往往越大, 这时, 算法需要的填补节点的数量也越多. 同时算法 CHH 中每个空洞边缘节点都对自身的空洞边缘弧进行填补, 空洞边缘弧数量越多, 所需要的填补节点也越多. 实验中出现了空洞边缘弧较多而需要的填补节点较少的情况. 这是由于存在一定数量的空洞边缘弧, 被其它节点的填补节点所覆盖, 因此不需要引入额外的填补节点, 就能够实现空洞边缘节点的消除. 总体上看, 填补节点数量随着空洞边缘弧的数量递增.

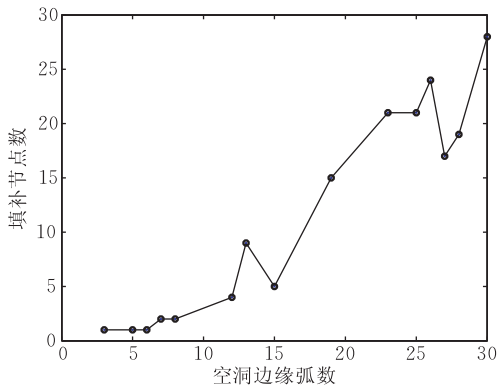


图 11 填补节点与空洞边缘弧的关系

5.3 覆盖率与算法执行轮数的关系

假设空洞面积大小为 20000, 传感器节点的感知半径分别为 20、25 和 30. 图 12 显示了在不同的节点感知半径条件下, 在算法执行的不同轮数中空洞覆盖率的变化, 随着算法轮数的递增, 空洞的覆盖率不断增加, 同时空洞面积不断减少. 当空洞的覆盖率达到 100% 时, 空洞被完全填补. 当节点感知半径为 30 时, 算法只需要执行 2 轮, 即可实现空洞的完全填补. 当节点感知半径为 25 时, 算法需要执行 3 轮. 当节点感知半径为 20 时, 算法需要执行 4 轮. 当节点感知半径较小时, 单个节点能够填补的范围较少, 因此, 相同的空洞面积条件下, 较小的节点感知半径造成算法执行轮数的增加. 同时由图可知, 在节点感知半径较小的条件下, 即使面对较大的覆盖空洞区域, CHH 算法也能够实现较快的收敛, 并以较少的执行轮数完成空洞的填补. 相对现有的空洞填补算法, CHH 算法实现了空洞填补的快速收敛, 算法执行的轮数较少.

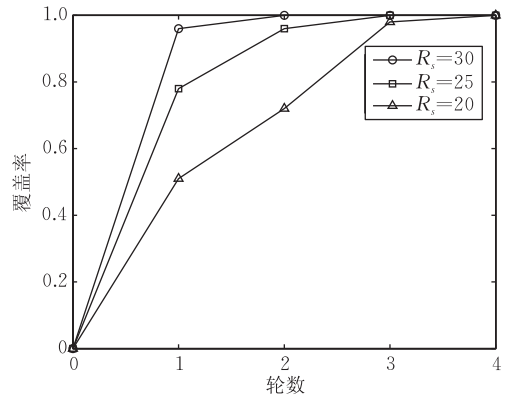


图 12 覆盖率随算法轮数的变化

5.4 空洞边缘节点数量与算法执行轮数的关系

假设空洞面积大小为 20000, 传感器节点的感知半径分别为 20、25 和 30. 图 13 仿真了在不同的节点感知半径条件下, 在算法执行的不同轮数中空洞边缘节点数量的变化, 随着算法轮数的递增, 空洞边缘节点不断减少, 同时空洞面积不断减少. 由引理 4, 随着算法的执行, 空洞边缘交点不会增加, 因此空洞边缘节点数量满足非递增的性质. 当节点的感知半径较小时, 空洞边缘节点的数量也越多, 算法需要执行的轮数也越多. 当空洞边缘节点的数量为 0 时, 空洞被完全填补.

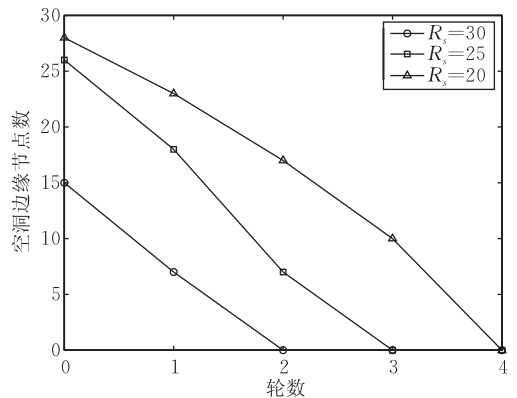


图 13 空洞边缘节点随轮数的变化

5.5 不同算法之间的比较

(1) 覆盖率比较

本小节比较 CHH 算法与文献[5]中的空洞填补算法. 实验在与文献[5]相同的条件下进行了仿真. 图 14 显示了 CHH 算法与 VEC、VOR 和 Minimax 在不同算法执行轮数条件下的覆盖率. CHH 算法实现了对目标空洞区域的全覆盖, 而算法 VEC、VOR 和 Minimax 无法实现对目标空洞区域的全覆盖. 从图 14 可以看出, 算法 CHH 具有更快的收敛速度. 仅仅经过 3 轮, CHH 算法就实现了目标空洞

的完全填补,而其他算法则经过了 10 轮以上的填补时间. CHH 算法相对其他算法实现了更加快速的收敛.

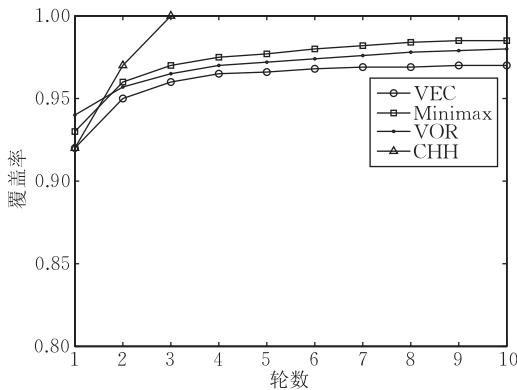


图 14 算法覆盖率的比较

(2) 平均累积移动距离

实验在目标区域中部署一定比例的移动传感器节点. 移动传感器节点的比例分别为 20% 和 40%, 从图 15 可以看出, CHH 算法中移动节点的平均累积移动距离大于 VOR、VEC 和 Minimax 算法. 然而, VOR、VEC 和 Minimax 算法需要全网络所有节点的移动, 而 CHH 算法仅仅需要少量节点的移动, 因此 CHH 算法的平均累积移动距离大于其他算法. 同时从图 15 可以看出移动节点的比例越高, 节点的累积平均移动距离也越小. 这是由于移动节点比例越高, 靠近空洞边缘的可用于空洞填补的移动节点数量也越高, 节点累积平均移动距离也越小.

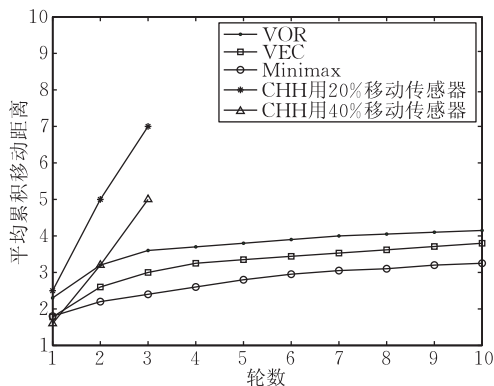


图 15 平均累积移动距离的比较

(3) 移动距离总和

图 16 显示出 CHH 算法的移动距离总和与 VOR、VEC 和 Minimax 算法大致相当, 由于 CHH 算法中移动节点的数量远小于其他算法, 因此 CHH 算法的累积平均移动距离要大于其他算法. 同时, 从实验可以看出, 移动节点所占比例越大, 移动距离总和越小. 这是由于移动节点比例越高, 靠近

空洞边缘的可用于空洞填补的移动节点数量也越高, 节点移动距离总和也越小.

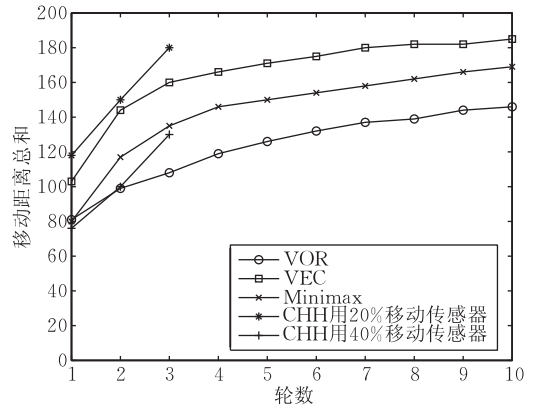


图 16 移动距离总和的比较

5.6 测距误差的影响

由于 CHH 算法采用节点间精确测距进行覆盖空洞的探测, 并基于空洞探测的结果实现覆盖空洞的填补. 因此节点间测距的误差将在一定程度上影响到算法的性能. 假设 $d_{u,v}$ 代表传感器节点 u, v 之间的实际距离. $Eval_Dis_{u,v}$ 代表传感器节点 u, v 之间的实际测量距离. 在实验中有

$$Eval_Dis_{u,v} = d_{u,v} (1 + X \times Error_Index),$$

$Error_Index$ 是误差参数, X 是满足 $(0, 1)$ 正态分布的随机变量. 当误差参数较大的条件下, 节点测量得到的距离误差较大, 反之误差较小. 实验仿真了在不同误差参数条件下使用 CHH 算法实现对目标空洞的填补性能. 图 17 显示了在不同误差参数条件下 CHH 算法得到的空洞直径与实际结果的差异. 空洞直径为空洞边缘交点的最大距离. 横坐标是误差参数 $Error_Index$, 纵坐标是空洞直径的计算误差率 E . 假设空洞直径为 HD , 经过计算得到的空洞直径为 RD , 则有 $E = \frac{|HD - RD|}{HD}$. 当误差参数为 10% 时, 空洞直径的计算结果的误差率在 5% 以内.

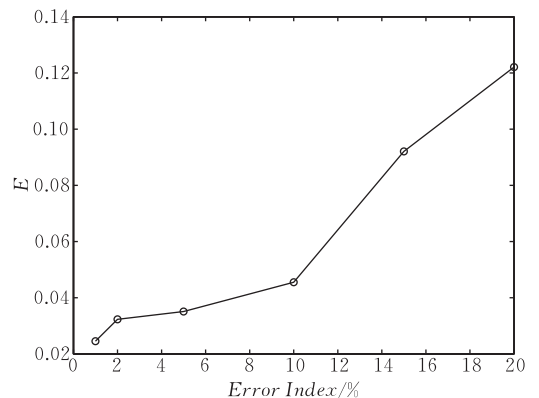


图 17 测距误差对空洞直径的影响

由实验可知,在误差参数较小时,空洞直径的误差率也能够控制在较小范围内.图 18 显示了在不同误差参数条件下 CHH 算法对空洞填补的覆盖性能.横坐标是误差参数,纵坐标是覆盖空洞的覆盖率.由图 18 可知,在误差参数为 0 的条件下,即节点间不存在测距误差的条件下,CHH 算法对覆盖空洞实现了 100% 的完全填补.当误差参数在 5% 范围内,CHH 算法的覆盖性能达到 95% 以上.此后 CHH 覆盖性能随误差参数的增加而下降.当误差参数在 10% 以上,CHH 算法对覆盖空洞的填补覆盖率降低到 80% 左右.

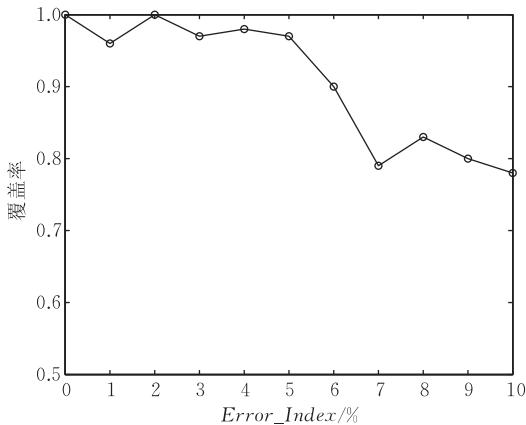


图 18 测距误差对空洞覆盖率的影响

因此,在控制误差参数的前提条件下,CHH 算法能够实现对目标空洞的近似全覆盖.本文提出的空洞填补算法可以应用于闭合覆盖空洞的填补,当覆盖空洞非闭合的条件下,算法可以扩展应用到非闭合空洞的填补,本文不再详述.

6 结 论

本文基于现有的空洞探测方法,在传感器网络没有地理位置信息的条件下,针对大范围闭合空洞问题,提出了分布式的空洞填补算法 CHH.本文提出的分布式算法,简单且实现了在传感器网络出现大范围覆盖空洞时传感器网络的自愈合.算法在空洞闭合且测距误差较低的条件条件下,空洞填补性能较好.本文的下一步工作是进一步降低测距误差对于空洞填补算法性能的影响.

参 考 文 献

- [1] Shakkottai S, Srikant R, Shroff N. Unreliable sensor grids: Coverage, connectivity and diameter//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications. San Francisco, USA, 2003; 1073-1083
- [2] Kumar S, Lai T H, Balogh J. On k -coverage in a mostly sleeping sensor network//Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Philadelphia, PA, USA, 2004; 144-158
- [3] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, Srivastava M B. Coverage problems in wireless Ad-hoc sensor networks//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications. Anchorage, Alaska, 2001; 1380-1387
- [4] Fang Q, Gao J, Guibas L. Locating and bypassing routing holes in sensor networks//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications. Hong Kong, China, 2004; 2458-2468
- [5] Wang G, Cao G, La Porta T. Movement-assisted sensor deployment//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications. Hong Kong, China, 2004; 2469-2479
- [6] So Man Cho A, Ye Y. On solving coverage problems in a wireless sensor network using voronoi diagrams//Proceedings of the International Workshop on Internet and Network Economics (WINE). LNCS 3828. Hong Kong, China, 2005; 584-593
- [7] Rao A, Ratnasamy S, Papadimitriou C, Shenker S, Stoica I. Geographic routing without location information//Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. San Diego, CA, USA, 2003; 96-108
- [8] Lederer S, Wang Y, Gao J. Connectivity-based localization of large scale sensor networks with complex shape//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications. Phoenix AZ, USA, 2008; 789-797
- [9] Li X, Hunter D K, Yang K. Distributed coordinate-free hole detection & recovery//Proceedings of the IEEE GlobeCom. San Francisco, USA, 2006; 1-5
- [10] Bejerano Y. Simple and efficient k -coverage verification without location information//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications. Phoenix AZ, USA, 2008; 291-295
- [11] Lam M L, Liu Y H. Two distributed algorithms for heterogeneous sensor network deployment towards maximum coverage//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, California, USA, 2008; 3296-3301
- [12] Sekhar A, Manoj B S. Dynamic coverage maintenance algorithms for sensor networks with limited mobility//Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Hawaii, 2005; 51-60
- [13] Ghosh A. Estimating coverage holes and enhancing coverage in mixed sensor networks//Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks. Washington DC, USA, 2004; 68-76

- [14] Shiu L C, Lee C Y, Song T W. On-demand deployment algorithm for a hybrid sensor network//Proceedings of the IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing. Shanghai, China, 2008: 697-702
- [15] Wang G, Cao G, Porta T L, Zhang W. Sensor relocation in mobile sensor networks//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications. Miami, USA, 2005: 2302-2312
- [16] Kumar N, Gunopulos D, Kalogeraki V. Sensor network coverage restoration//Proceedings of the International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems DCOSS.

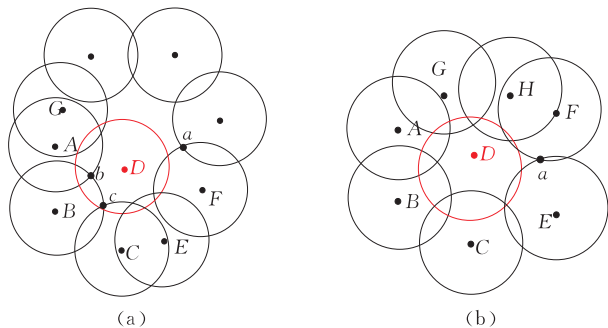
- Marina Del Rey, 2005: 3560-3570
- [17] Guo L X, Wang X. Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks. ACM Transactions on Sensor Network, 2005, 1(1): 36-72
- [18] Alavi B, Pahlavan K. Modeling of the TOA-based distance measurement error using UWB indoor radio measurements. IEEE Communications Letters, 2006, 10(4): 275-277
- [19] Wen C Y, Morris R D, Sethares W A. Distance estimation using bidirectional communications without synchronous clocking. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 5(5): 1927-1939

附录 1.

推论 1. 当且仅当 $\forall Q_i$, 填补节点消除的空洞边缘交点个数大于等于 $n_i - 1$, 空洞不会分裂.

证明. 填补节点填补了一段空洞边缘弧的条件下, 同时与若干个空洞边缘节点的空洞边缘弧相交, 这些节点按照彼此间的邻居关系可以划分为若干个节点集合 Q_i . 由定理 2, $\forall Q_i$ 当消除的空洞边缘交点个数为 n_i 时, 空洞被完全填补, 不存在空洞分裂. $\forall Q_i$, 只需考虑消除的空洞边缘交点个数为 $n_i - 1$ 的情况. 如果 $n_i - 1$ 个空洞边缘交点被填补节点消除, 则剩余一个交点未被填补, 存在两种可能.

情况 1. 未被填补的空洞边缘交点属于 Q_i 集合中最边缘的空洞边缘节点. 如附图 1(a) 所示, 不失一般性, 假设填补节点消除了 A 的空洞边缘弧, 并将相交的空洞边缘节点分为两个集合 $Q_1 = \{G\}$ 和 $Q_2 = \{B, C, E, F\}$. 对于 Q_2 未被填补的空洞边缘交点 a 属于集合中最边缘一侧的节点 F . 而 Q_2 的另一侧节点 B 的空洞边缘交点 b, c 被填补节点覆盖, 即 Q_2 集合的另一侧的空洞边缘节点 B 必是 A 的空洞边缘邻居, 因此在节点 B 周围不会出现空洞区域, 空洞区域只存在节点 F 一侧. 空洞没有被分裂. 对于集合 Q_1 同样可证.



附图 1 空洞填补示意图

情况 2. 未被填补的空洞边缘交点属于 Q_i 集合中间一个空洞边缘节点. 如图 3(b) 所示, 不失一般性, 假设填补节点消除了 A 的空洞边缘弧, 只存在一个节点集合 $Q_1 = \{B, C, E, F, H, G\}$. 同理可得, Q_1 集合的两侧 B 和 C 都是节点 A 的空洞边缘邻居, 即 Q_1 集合的两侧都不存在覆盖空洞, 而未被填补的空洞边缘交点 a 属于节点集合中间的两个节点 E 和 F , 那么在交点 a 的周围存在一个空洞区域. 由此空洞区域仍然为一个, 空洞没有产生分裂.

同理, 当空洞没有分裂时, 与填补节点相交的节点集合为 1 或 2 个, 在两种不同情况下, 对于任意一个节点集合 Q_i 都有: 由于填补节点的引入消除的空洞边缘交点大于等于 $n_i - 1$ 个. 证毕.

推论 2. 当且仅当 $\exists Q_i$, 填补节点消除的空洞边缘交点个数小于 $n_i - 1$, 空洞被分裂.

证明. 填补节点在填补了一段空洞边缘弧的条件下, 同时与若干个空洞边缘节点的空洞边缘弧相交, 这些节点按照彼此间的邻居关系可以划分为若干个节点集合 Q_i . 如果 $\exists Q_i$, 消除的交点个数小于 $n_i - 1$, 那么对于 Q_i , 存在两个或者两个以上的交点未被填补. 如图 3(c), 不失一般性, 假设填补节点消除 A 的空洞边缘弧同时将相交的空洞边缘节点分为 3 个集合分别为 $Q_1 = \{E\}$ 、 $Q_2 = \{F\}$ 和 $Q_3 = \{B, C\}$. 对于集合 Q_3 , 未被填补的交点为 c 和 e . 由图 3(c) 可知, 未被填补的空洞边缘交点不属于同一个节点, 否则该集合一定会被分裂. 在未被填补的交点周围存在空洞区域, 而这些空洞边缘交点互不相邻, 因此空洞区域无法相连. 空洞产生分裂.

同理, 当空洞被分裂时, $\exists Q_i$ 有两个或两个以上的空洞边缘交点未被填补节点覆盖, 同时这些空洞边缘交点不相邻, 消除的空洞边缘交点个数必小于 $n_i - 1$. 证毕.

推论 3. 当且仅当 $\forall Q_i$, 被消除的空洞边缘交点个数为 $n_i - x$, 集合 Q_i 内的节点与填补节点造成的空洞个数为 x .

证明. 填补节点在填补了一段空洞边缘弧的条件下, 同时与若干个空洞边缘节点的空洞边缘弧相交, 这些节点按照彼此间的邻居关系可以划分为若干个节点集合 Q_i . $\forall Q_i$, 当消除的空洞交点个数为 $n_i - 1$ 时, 空洞个数保持不变为 1 个; 当消除的空洞交点个数为 $n_i - 2$ 时有空洞个数变为 2 个, 由数学归纳法, 假设填补节点消除的空洞交点个数为 $n_i - k$ 时, 空洞个数为 k , 则有: 当填补节点消除的空洞交点个数为 $n_i - k - 1$ 时, 即少消除了一个空洞边缘交点. 该交点与现有的交点互不相邻, 必有空洞个数会增加一个为 $k + 1$ 个. 因此对于集合 Q_i 内的节点, 当消除的空洞交点个数为 $n_i - x$ 时, 造成的空洞个数为 x . 反之亦成立. 证毕.

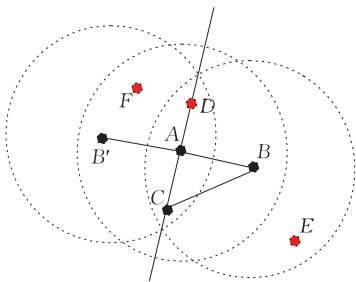
附录 2.

假设网络满足全连通. 算法通过移动节点移动两次的方

法实现邻居节点的定位,并将方位信息扩散到全网.假设所有已定位的节点属于集合 H ,所有未定位节点都属于集合 G ,如果一个节点与 H 集合内的节点确定了彼此之间的方位关系,则将该节点加入已定位节点集合 H .初始条件下,集合 H 包含移动节点和它的所有邻居节点,其余节点属于集合 G .随着方位信息的不断扩散,集合 H 的节点数量不断增加,集合 G 中的节点数量不断减少.

定理 4. 在 2 维平面中,对一个节点进行定位的时候,该节点通信范围内至少存在两个已在 H 集合内的节点.

证明. 当节点的通信范围内只存在一个 H 集合内的节点,节点的位置存在无穷多种可能,节点无法实现定位.当节点通信范围内存在两个 H 集合内的节点,如附图 2 所示,设节点 A, C 属于集合 H ,节点 B 是未定位节点,则节点 B 可



附图 2 节点定位的位置关系

以通过和 AC 之间的距离确定和 A, C 之间的相对位置,但是存在位置翻转的情况,即节点 B 位于 B' 的位置, B' 为节点 B 的对偶位置.此时,如果在 B' 为圆心的通信区域中,存在一个节点 F 也属于集合 H ,通过节点 F 的判断,节点 B 的位置可以唯一地确定.如果不存在这样的节点 F ,则节点 B 的位置无法确定.因此当节点的通信范围内存在两个已在 H 集合内的节点时,节点有可能实现邻居方位的确定.当节点的通信范围内只存在一个 H 集合内的节点时,节点无法实现定位. 证毕.

定理 5. 在 2 维平面中,对一个节点进行定位的过程中,如果该节点的通信范围内至少存在 3 个不共线的 H 集合内的节点,则该节点必能实现定位.

证明. 由三角定位的原理,结果易证.如附图 2 所示,如果节点 B 的通信范围内存在 3 个节点 A, C, D ,且 A, C, D 共线,则 B 的位置可能无法判断,即 B 位于 B' 的位置.如果节点 B 的通信范围内存在 3 个节点 A, C, E ,且 A, C, E 不共线,则 B 的位置可以确定.

定理 4 给出了节点能够实现定位的必要条件,定理 5 给出了充分条件.当节点部署密度较大时,节点不能定位的概率很低.如果经过定位信息扩散后,网络内仍然存在不能定位的节点,对于不能定位的节点,可以通过 Bejerano^[10]的方法确定其是否为一个空洞边缘节点.如果节点是空洞边缘节点,则需要再次使用移动节点的二次移动帮助节点定位.



SU Han, born in 1979, Ph. D. candidate. He is currently working on wireless sensor network.

WANG Yun, born in 1967, professor, Ph. D. supervisor. Her research interests include distributed computing and fault tolerant network.

Background

In a WSN, if no sensor node is available in an area due to used up energy or network destruction, the area forms a coverage hole where no monitoring is applied. How to verify the boundary of the hole is a hot research topic in sensor network. There are so many works which focus on hole boundary detection in 2D environment and some of them achieve outstanding performances. In recent years, some researches begin to work on hole boundary detection in 3D environment. Based on the techniques of coverage hole verification, the self-healing of the WSN can be achieved. There are also many works focus on healing holes. However, all of them suppose that the position information can be obtained. At the same time, these works only deal with holes with small sizes and can not achieve full coverage to the target holes. Most of them are time wasting.

This paper provides a novel algorithm CHH which achieve full coverage to the target holes in 2D sensor networks. Compared with some current state-of-the-art algorithms, CHH outperforms in coverage and convergence rate without location information. The research is partially supported by National Basic Research Program of China (973 Program) of China under grant No. 2009CB320705 and Aeronautical Science Foundation under grant No. 20080769004. The former project aims to provide better service guarantees for applications in various environments. The latter project is to build a platform to integrate services in mobile environment. The research work in this paper addresses the coverage guarantee issue in wireless sensor networks, which is an essential concerning point of both projects.