

基于组合虚拟力的传感器网络三维空间重部署算法研究

刘惠^{1,2} 柴志杰¹ 杜军朝^{1,2,3} 武波²

摘要 无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSNs) 的重部署问题是提高无线传感器网络覆盖性能的一个重要问题, 实用化的重部署算法需要充分考虑传感器资源的有限性和实际布撒情况. 本文设计了基于组合虚拟力的分布式算法, 该算法定义了传感器受到的邻居节点间的基于库仑力的斥力、目标覆盖区域的基于胡克定律的中心吸引力和边界斥力, 综合这些力的合力以及单位能耗因素求得传感器节点每次移动的目标位置. 本文算法还给出了调整的终止条件以保证传感器能够重部署至合理位置. 理论论证和仿真实验表明, 提出的基于组合虚拟力的重部署算法能使所有随机布撒的传感器节点在低能耗的情况下, 进入目标覆盖区域并在该区域内自组织成一个具有高覆盖性和重连通性的网络拓扑. 本文算法还解决了覆盖区域中存在障碍物的复杂情况.

关键词 无线传感器网络, 传感器重部署, 重连通性, 虚拟力

DOI 10.3724/SP.J.1004.2011.00713

Sensor Redeployment Algorithm Based on Combined Virtual Forces in Three Dimensional Space

LIU Hui^{1,2} CHAI Zhi-Jie¹ DU Jun-Zhao^{1,2,3} WU Bo²

Abstract The sensor redeployment problem is an important problem to improve sensor coverage in wireless sensor networks. A practical algorithm should consider the limitation of the sensor resources and the situation of the deployment. A distributed algorithm based on the combined virtual forces is designed in this paper. In this algorithm, the repulsive force from the 1-hop neighbors based on Coulomb's law, the attractive force from the sensing region center, and the repulsive force from the boundaries based on Hook's law are defined. Then the sensor position adjustment in one step is calculated by combining these forces mentioned above with the energy consumption factors. Meanwhile, the termination condition is also given in this algorithm to ensure the sensors can be redeployed to proper positions. Theoretical analysis and simulation results show that all of the sensors which are deployed in a random way will move into sensing region and self-organize a high-coverage and bi-connected network topology with low energy consumption. The obstacle problem can also be handled in this paper.

Key words Wireless sensor networks (WSNs), sensor redeployment, bi-connected, virtual forces

无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSNs) 在军事侦察、区域探测等多个领域发挥着巨大的作用. 因为在一定区域内布撒的传感器数量和能量有限, 所以在实际布撒时期望用尽可能少的传感器数目和少的能量完成工作. 由于传感器的布撒位置直接影响传感器网络的覆盖率、通讯能耗以

及传感器管理, 因此对网络中的无线传感器进行合理的部署是使其充分利用的关键. 一方面, 在实际应用中, 通常无法对区域进行实地考察并根据考察信息花费大量时间进行实地部署, 因此只能采用随机部署完成对这些区域的覆盖. 而在随机部署条件下, 网络的高覆盖率无法得到保证, 且节点最初的部署位置可能不在期望探测区域中, 因此我们期望传感器节点能从初始的拓扑通过重部署达到高覆盖率的拓扑结构. 在此过程中还必须考虑能耗因素, 这是传感器节点所携带的能量有限所要求的. 另一方面, 在重部署过程中, 还需考虑连通性问题, 这是由于重部署过程仅是用来提高网络性能以完成后续关键工作的手段, 而后续工作比如目标探测, 需要各传感器间的协同工作才能完成, 协同工作的前提即要保证整个网络的连通性. 更进一步, 考虑到部分传感器节点可能会因能量耗尽等因素无法正常工作, 因此本文提出重部署完成之后的网络拓扑结构是重连通的. 针对上述观点, 本文提出基于虚拟力的三维空间传感网络重部署算法, 对特定区域内随机部署的传

收稿日期 2010-03-19 录用日期 2011-01-20
Manuscript received March 19, 2010; accepted January 20, 2011
国家自然科学基金 (60803152), 教育部科学技术研究重点项目 (1091-44), 国家科技重大专项 (2010ZX03006-002-04), ISN 重点实验室开放基金 (ISN-9-09), 中央高校基本科研业务费 (K50510230004, 72104-238) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (60803152), Key Research Project of Ministry of Education (109144), Major National Science and Technology Project (2010ZX03006-002-04), Open Funds of State Key Laboratory of ISN (ISN-9-09), and Fundamental Research Fund for the Central Universities (K50510230004, 72104238)

1. 西安电子科技大学软件工程研究所 西安 710071 2. 西安电子科技大学软件学院 西安 710071 3. 西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071

1. Software Engineering Institute, Xidian University, Xi'an 710071 2. Software School, Xidian University, Xi'an 710071 3. State Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xi'an 710071

传感器节点进行重新部署,使其达到较为理想的覆盖状态.同时在重新部署时考虑了能量最优化,并保证重部署后的网络拓扑具有重连通性.本文结构如下:第1节介绍相关研究工作;第2节给出问题定义;第3节给出重部署控制模型,讨论重部署算法的关键步骤;第4节对算法重连通性进行理论分析;第5节通过仿真实验对算法做进一步验证;最后对本文的工作进行总结.

1 相关工作

Gage^[1]根据传感器网络功能将覆盖问题^[2]分为三类:地毯覆盖、栅栏覆盖和扫描覆盖,本文工作属于地毯覆盖范畴.重部署问题有三类研究方法,分别是基于Voronoi图的几何分析法^[3-5]、基于关键节点的整体局部分析法^[6]和基于虚拟力的物理分析法.基于Voronoi图的思想能设计简单的算法提高网络覆盖率,但其无法解决网络的连通性问题,也没有考虑覆盖区域内存在障碍物的情况.关键节点的分析方法^[6-7]主要是为了确保重部署后的网络拓扑能满足重连通的特性,它们能完成重连通条件下的高覆盖,但它们所采用的多跳信息洪泛式的广播方式很容易导致网络的阻塞.Zou等^[8]首先提出了仿照物理学中电磁力的虚拟力概念,认为距离较近的节点间存在斥力,而较远的节点间存在引力,以力的平衡状态为最终优化后的状态.仿真验证表明虚拟力算法有效地提高了网络的覆盖性能.Howard等^[9]在考虑虚拟力时引入势能的概念,以确定虚拟力与传感器位置的函数关系式,但没有考虑连通性问题,而且他们的算法还需要掌握全局信息的簇头节点,因此是一个集中式算法.Tan等^[10]为解决连通性问题,首先将节点连通,然后再在保证节点连通的前提下完成重部署,但由于其采用两步完成重部署,在能耗方面有很明显的不足.以上三种方法中,虚拟力方法以其直观性、易描述性和可证明性被广泛采用.本文采用虚拟力方法,且着重解决保证覆盖情况下的连通性以及障碍物的处理这两种必须考虑的实际因素.本文所提重部署算法与前人相关工作有以下不同之处:1)借鉴虚拟力模型,采用单跳邻居节点的信息,以确保算法的分布式特性和网络通信的安全性^[11];2)使用多次计算单次移动逐渐达到最终目标,以确保重部署的能耗有效性;3)将问题定义在三维空间中,同时考虑覆盖区域有障碍物的因素;4)考虑随机部署区域与期望覆盖区域不同的实际情况,以提高问题的实用性;5)设定通讯半径和传输半径的比例可以为任意值,以避免问题的特殊性;6)采用能耗而不是移动距离作为一个算法性能的衡量指标.

2 问题定义

本节定义重部署问题的三个重要衡量指标,网络整体覆盖率、重部署的移动能耗和重连通性,然后给出三维空间传感器网络重部署问题定义.

2.1 网络整体覆盖率

假设三维空间中有一传感器节点 $s_i(x_i, y_i, z_i)$,则其到空间任意点 $p(x, y, z)$ 的距离为 $d(s_i, p) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}$,即欧氏距离.采用二元探测模型可确定点 p 被传感器节点 s_i 覆盖的概率为

$$C_p(s_i) = \begin{cases} 1, & d(s_i, p) < r_s \\ 0, & d(s_i, p) \geq r_s \end{cases} \quad (1)$$

其中, r_s 表示传感器节点的传感半径.式(1)表明,若点 p 与 s_i 之间欧氏距离小于传感器半径则能被覆盖,否则不被覆盖.假设网络中有 k 个节点 s_1, s_2, \dots, s_k ,它们对点 p 的覆盖率分别为 $c_p(s_1), c_p(s_2), \dots, c_p(s_k)$,则点 p 在网络中的覆盖率为

$$c_p(A) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - c_p(s_i)) \quad (2)$$

点 p 被称为探测点,若在网络中任取 n 个探测点,通过对这些探测点的探测概率取均值,就能得到网络的整体覆盖率为

$$C(A) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i(A) \quad (3)$$

需要说明的是, $C(A)$ 是实际环境中的统计值,当 n 取足够大时,统计值与理论值就会无限接近.

2.2 重部署的移动能耗

传感器节点从随机部署到最终完成重部署的能耗损失主要涉及移动能耗和通信能耗两个方面.相对于移动能耗来说,通信能耗是一个微小量,因此在重部署算法设计时仅考虑移动能耗.先前的研究者^[10,12]假定传感器在各个方向上的移动能耗相同,即将移动能耗转化为了移动距离,而在实际情况中,这一假定是不成立的.例如由于重力因素,节点在三维空间竖直向下移动单位距离的能耗将小于向上移动的能耗.同样若部署在海底,由于洋流因素作用,顺洋流方向移动单位距离的能耗也小于其反方向能耗.故本文为更符合实际情况,不做以上假设.

定义 $\overline{L}_x, \overline{L}_{-x}, \overline{L}_y, \overline{L}_{-y}, \overline{L}_z, \overline{L}_{-z}$ 描述传感器节点在 x, y, z 正向和反向移动单位距离的能耗.节点 s_i 在任意方向上移动单位距离的能耗 \overline{L}_i 可由矢量运算得到.设节点 s_i 从随机部署到完成重部署过程

中在某个方向 dir 上移动的距离为 $|\overline{dir}_i|$, 移动的总距离为 dis_i . 则重部署中网络的整体移动能耗表示为

$$\overline{L} = \sum_{i=1}^k \sum_{\forall dir} |\overline{L}_i \times \overline{dir}_i| \quad (4)$$

其中, $\sum_{\forall dir} |\overline{dir}_i| = dis_i$, 即节点 s_i 在所有方向上移动距离的数值和为移动总距离.

2.3 重连通性

为了协同工作, 重部署完成后的网络拓扑必须是连通的. 然而, 为了确保在一些传感器无法正常工作后, 整个网络拓扑仍能保持连通状态, 本文期望重部署完成后的网络拓扑不仅是连通的, 而且是重连通的. 文献 [7] 对重连通性给出了简单清晰的定义, 即“如果网络中任意一对节点间有两条互斥的路径, 即从网络中移去任意一个节点, 网络仍连通”. 要保证容错通信, 网络至少具有重连通性的网络拓扑.

2.4 形式化定义

综合第 2.1 节至第 2.3 节的三个指标, 本文重部署问题定义如下:

$$\min |\overline{L}|, \quad \max C(A), \quad \text{s.t. } S_N = S_M \quad (5)$$

其中, 区域 A 表示目标覆盖区域, S_N 为所有节点集合, S_M 表示具有重连通性的节点集合, 显然 $S_M \subseteq S_N$. 重部署问题的初始条件为在某个区域 B 内随机部署一定数量的移动传感器节点, 其中 $A \subseteq B$. 由式 (5) 可以得到, 重部署问题实质是对某个区域内随机布撒的移动传感器, 在重连通的约束下, 以达到目标覆盖区域中最大网络整体覆盖率和最小移动能耗为目标的多目标优化问题. 在算法执行中, 先优化最大覆盖率, 再降低能耗.

3 重部署算法设计

3.1 问题假设

为简化重部署问题, 有如下假设: 所有传感器节点具有相同的传感器半径 r_s 和通信半径 r_c ; 每个传感器节点都能测量出自己的位置, 并能同通信半径范围内的邻居节点正常通信; 每个传感器节点在相同方向移动相同距离的能耗相同; 每个传感器在随机布撒后都能准确了解目标覆盖区域的中心及边界; 随机布撒的区域与目标覆盖区域相差不大. 这些假设旨在简化重部署问题, 某些假设可以放宽而不影响算法的性能. 例如随机布撒区域和目标覆盖区域可以有较大差异, 这样仅仅是增加算法的迭代次数.

3.2 基于虚拟力的控制模型

虚拟力概念来源于物理学, 当两个原子距离过近时会产生斥力使它们分离, 而当距离过远时又会产生引力. Zou 等^[8] 借鉴了这种思想并将其应用于传感器的重部署问题研究中. 本文也借鉴了虚拟力概念, 但是相比之前的研究, 本文定义的问题更具有实用性: 1) 提出将随机布撒区域和目标覆盖区域分离, 并用移动能耗作为目标替代移动距离以满足不同方向移动能耗不同的实际情况; 2) 将问题定义在三维空间中, 并考虑重部署完成之后的重连通性; 3) 对文中定义的每个虚拟力都找出具体的物理力作对应, 定义了基于库仑力的传感器间斥力, 以及基于胡克定律的目标覆盖区域中心吸引力和边界斥力, 下面分别论述.

3.2.1 基于胡克定律的区域中心吸引力

为使随机布撒的传感器能够有效地进入目标覆盖区域内, 需要在区域内设计一个吸引源. 假定目标覆盖区域的中心为 o , 将它视为区域的吸引源, 它对随机布撒的传感器节点具有吸引作用. 同时, 节点距离中心越远, 其受到的中心吸引力应当越大, 这样才能使它们更早地进入目标覆盖区域内. 上述情况与物理中的弹簧十分相似, 因此本文考虑使用胡克定律来模拟这一过程. 根据胡克定律 $\overline{F} = -k\overline{x}$, 可以得到目标覆盖区域中心对任意一个传感器节点 s_i 的吸引力可表示为

$$\overline{F}_a(s_i) = -k_a \overline{d(o, s_i)} \quad (6)$$

其中, k_a 为吸引系数, $\overline{d(o, s_i)}$ 为点 o 到 s_i 的位移, 中心吸引力 $\overline{F}_a(s_i)$ 的方向是由 s_i 指向 o .

中心吸引力不仅能使传感器节点进入目标覆盖区域, 同时还能使原先不连通的网络达到连通状态. 假定初始条件下, 仅随机布撒两个传感器节点 s_i 和 s_j , 它们的距离大于通信半径 r_c , 因此根据连通性的定义初始网络拓扑是不连通的. 然而由于中心吸引力的存在, 在没有其他力的作用的情况下, 这两个传感器节点将会移动至目标覆盖区域中心. 此时, 它们的距离为 0, 小于通信半径 r_c , 从而使得最终的网络达到连通状态.

然而, 正如上面所述, 若仅有中心吸引力, 所有节点都将移动到区域中心, 而无法达到较高的区域覆盖率, 因此还需要一个斥力用以提高区域整体覆盖率, 这个力就是邻居节点间的斥力.

3.2.2 基于库仑定律的单跳邻居节点间斥力

邻居节点间的斥力用以保证两个相邻传感器间的距离处于最优值, 以达到最优的网络覆盖率. 文献 [13] 对节点间的最优距离进行了阐述, 假设最优距离用 d_{opt} 表示, 则当区域中的传感器节点数量较少

时, $d_{\text{opt}} = 2r_s$, 反之, $d_{\text{opt}} = \sqrt{3}r_s$. 为描述区域内的传感器是否处于较多的状态, 本文引入了极限覆盖率 $C_{\text{lim}}(A)$, 并定义极限覆盖率为网络中所有传感器能覆盖的最大体积与目标覆盖区域体积的比值, 且当比值大于或等于 1 时, 令极限覆盖率为 1, 如式 (7) 所示:

$$C_{\text{lim}}(A) = \begin{cases} \frac{4npr_s^3}{3V(A)}, & C_{\text{lim}}(A) < 1 \\ 1, & C_{\text{lim}}(A) \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中, $V(A)$ 为目标覆盖区域 A 的体积, n 为传感器的数量. 文中规定若极限覆盖率为 1 时, 区域内的传感器节点处于较多的状态, 否则处于不足状态.

下面将引入单跳邻居节点间的斥力, 用以保证传感器节点间的距离尽量达到最优值. 本文规定, 当节点间的距离小于距离的最优值时, 则会产生斥力, 否则不存在该力. 由于高覆盖率是重部署问题的首要目标, 因此相对于目标覆盖区域的中心吸引力, 该斥力应是一个较大值. 此外, 节点间距离越小其斥力应当越大, 这与电子间的斥力十分相似. 因此, 本文引入库仑定律以模拟它们间的斥力. 根据库仑定律 $\overline{F} = kq_1q_2/r^2$, 可以得到单跳节点间的斥力:

$$\overline{F_r}(s_i, s_j) = \begin{cases} k_c \left(\frac{1}{d_{ij}^2} - \frac{1}{d_{\text{opt}}^2} \right), & 0 < d_{ij} \leq d_{\text{opt}} \\ 0, & d_{ij} > d_{\text{opt}} \end{cases} \quad (8)$$

其中, k_c 为斥力的比例系数, d_{ij} 为节点 s_i 和 s_j 间的距离. 基于库仑定律, 节点 s_i 的所受斥力方向由 s_j 指向 s_i . d_{opt} 即为之前讨论的最优距离. 从式 (8) 可以看出, 当节点间的距离小于 d_{opt} 时, 就会产生斥力. 随着距离的减少, 斥力增长; 而当节点间的距离大于 d_{opt} 时, 就不存在相互斥力.

下面考虑通信半径 r_c 对节点间斥力的影响. 由于相邻节点间在计算其所受斥力前必须进行相互间的通信, 因此以上讨论的情况必须基于 $d_{\text{opt}} \leq r_c$ 的前提, 当 $d_{\text{opt}} > d_{ij} > r_c$ 时, 虽然节点 s_i 和 s_j 间的距离没有达到最优覆盖距离, 但由于它们无法完成正常通信, 其距离仍将维持 d_{ij} , 这也与实际情况相符, 因此修正最优距离为

$$d_{\text{opt}} = \begin{cases} \min(r_c, 2r_s), & C_{\text{lim}}(A) < 1 \\ \min(r_c, 3\sqrt{r_s}), & C_{\text{lim}}(A) = 1 \end{cases} \quad (9)$$

在设计节点间斥力时, 有以下选择: 来自于所有传感器节点, 来自于多跳节点, 来自于单跳节点, 或者来自于最近节点. 若斥力来自于全部节点, 整个算法就是集中式的; 若来自于多跳节点, 则大量的信息广播会造成网络的拥塞; 而来自于最近节点则无法

保证最终的重连通性. 因此本文规定节点间的斥力仅来自于单跳邻居节点. 故节点 s_i 所受斥力的合力 $\overline{F_r}(s_i) = \sum_{j \in S_k} \overline{F_r}(s_i, s_j)$, 其中 S_k 为节点 s_i 单跳邻居节点集合.

3.2.3 基于胡克定律的边界斥力

由于在本文的问题定义中, 初始随机布撒区域与最终目标覆盖区域是不同的, 因此需要保证进入目标覆盖区域的传感器节点不再逃离该区域. 为达到这个目的, 引入边界斥力的概念. 正是由于中心吸引力和边界斥力的存在, 初始布撒的传感器能最终进入目标覆盖区域, 并在区域内移动.

对于边界斥力, 同样借鉴胡克定律, 而边界斥力中的平衡位置是达到最大覆盖率时传感器与边界的距离 d'_{opt} . 显然, 若区域中的节点数量不足时, $d'_{\text{opt}} = r_s$, 而当节点数量充足时, 由于在节点间的最优距离为 $\sqrt{3}r_s$, 则计算得到节点与边界的最优距离 $d'_{\text{opt}} = r_s/2$. 综上所述, 可以得到:

$$d'_{\text{opt}} = \begin{cases} r_s, & C_{\text{lim}}(A) < 1 \\ \frac{r_s}{2}, & C_{\text{lim}}(A) = 1 \end{cases} \quad (10)$$

需要说明的是, 由于假设所有传感器节点已经事先了解到目标覆盖区域的边界情况, d'_{opt} 不需要小于 r_c . 在定义了 d'_{opt} 后, 根据胡克定律, 即可得到边界斥力为

$$\overline{F_b}(s_i) = \begin{cases} -k_b(d_i - d'_{\text{opt}}), & 0 \leq d_i < d'_{\text{opt}} \\ 0, & d_i \geq d'_{\text{opt}}, d_i < 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, d_i 表示从节点到目标覆盖区域边界的距离, $d_i < 0$ 表示节点在区域外部, 即若节点在目标覆盖区域外部, 则其不受边界力的作用.

3.2.4 虚拟力和移动距离间的转换

当节点随机布撒后, 其可能在目标覆盖区域内, 也可能不在. 对于前者, 需要综合使用上述的三个力以确保所有节点在覆盖区域内, 同时保证所有相邻节点间尽可能达到最佳覆盖距离. 而对于后一种情况, 为了使所有节点尽快进入区域, 所有节点仅受中心吸引力的作用. 假设用集合 S 表示在目标覆盖区域内的传感器集合, 则可得到:

$$\overline{F}(s_i) = \begin{cases} \overline{F_a}(s_i) + \overline{F_r}(s_i) + \overline{F_b}(s_i), & s_i \in S \\ \overline{F_a}(s_i), & s_i \notin S \end{cases} \quad (12)$$

由于传感器的移动需要以移动距离和方向为指标, 因此需要将上述的合力转换为移动距离. 在此之前, 我们首先引入单步最大移动距离 d_{max} , 用以表示传感器节点在一次移动过程中能移动的最大距离. 因

此节点单步的移动距离范围为 $[0, d_{\max}]$. 当 $|\overline{F}(s_i)|$ 接近于 0 时, s_i 在单步的移动距离也应当接近 0, 而随着 $|\overline{F}(s_i)|$ 的增加, s_i 的移动距离将随之增大. 当 $|\overline{F}(s_i)|$ 增加到一定值时, 其移动距离将接近 d_{\max} 而不会产生更大的增量. 因此, 借鉴 \arctan 函数的性质, 将力转换到移动距离上, 并定义:

$$d(s_i) = \arctan(|\overline{F}(s_i)|) \times \frac{2}{\pi} \times d_{\max} \quad (13)$$

s_i 移动的方向与其所受的虚拟力的合力方向一致.

下面将讨论如何将能耗因素加入移动距离中. 为讨论这个问题, 首先考虑这个事实: 若传感器节点在某个方向移动单位距离的能耗大于其在反方向上的能耗, 该节点则应减少在该方向上的移动以减少能耗损失, 而由其他节点弥补由于该节点的少移动而造成的覆盖率低下的问题. 若由于节点数量不够等原因, 其他节点无法弥补覆盖率, 则可以通过该节点的多次移动达到提高覆盖率的效果. 基于以上分析, 即可将能量因素综合到节点 s_i 的单步移动距离中, 得到:

$$d(s_i) = \arctan(|\overline{F}(s_i)|) \times \frac{2}{\pi} \times d_{\max} \times \frac{|\overline{L}_{-i}|}{|\overline{L}_i|} \quad (14)$$

$|\overline{L}_i|$ 表示节点 s_i 在虚拟力的合力方向上移动单位距离的能耗, $|\overline{L}_{-i}|$ 为其反方向移动单位距离的能耗.

式 (14) 即为本模型中考虑能耗因素下节点单步移动距离的公式化表述. 同时考虑节能, 所有节点应当以直线方式进行移动, 并最终达到期望位置. 若区域中存在障碍物, 会使直线运动出现困难, 在第 3.3 节中将重点讨论如何处理这个问题.

最后说明如何设定本模型中的四个重要参数, 即中心吸引力系数 k_a 、节点间斥力系数 k_c 、边界斥力系数 k_b 和单步移动最大距离 d_{\max} . 首先, 为了保证节点能在目标覆盖区域内部移动, 边界因素就应当首先被考虑, 因此 k_b 应设为三个参数中的最大值; 另一方面, 由于重部署的目的是达到网络整体覆盖率最大, 以提高网络性能, 因此 $k_c \gg k_a$. 最后, 由于距离的数值较小, 因此这三个参数应设置成一个较大值. 在之后的仿真中, 将 k_a , k_c 和 k_b 分别设为 10^2 , 10^6 和 10^{10} . 在设置 d_{\max} 时, 若将其设得过小, 就会造成多次移动而使通信能耗增加, 而将其设置过大, 就会造成节点在移动过程中产生来回震荡. 因此 d_{\max} 的取值需要通过多次实验来获得, 一般采用传感器半径 r_s 的 5%~10%.

3.3 障碍物处理

在目标覆盖区域中存在障碍物是常见的现象. 例如在对敌侦察区域中存在敌人的碉堡, 或在海洋探测时存在暗礁, 这些障碍物的出现会对 WSNs 产

生两类影响: 1) 由于这些障碍区域不需要被覆盖, 虚拟力模型就要被适当调整; 2) 若需要重部署, 节点的某些移动将无法以直线形式完成.

首先考虑如何解决后一种情况. 在二维空间中, Lumelsky 等^[14] 提出一种名为“BUG2”的解决方案, 该方案基于绕障碍物移动以解决障碍问题. Tan 等^[10] 在处理该问题时也采用了该方法, 但在三维空间中该方法不再适用, 因为在三维空间中, 节点无法精确地绕障碍物运动至另一交点. 为解决这一问题, 本文提出了如下算法. 首先假设区域内的障碍物为凸集的情况, 所谓凸集即集合内任两点间的连线也在集合内. 图 1 和图 2 将一幢房屋作为区域中某个具有凸集性质的障碍.

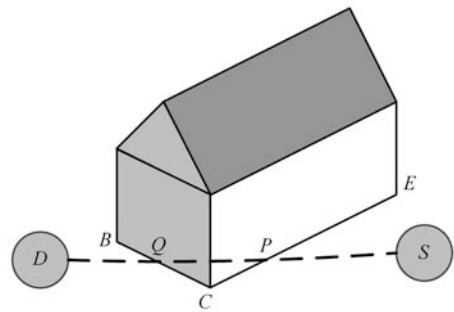


图 1 目标位置不在障碍中

Fig. 1 Target not in the obstacle

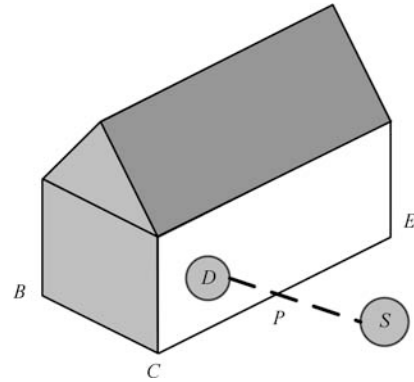


图 2 目标位置在障碍中

Fig. 2 Target in the obstacle

首先考虑图 1 的情形, 即节点移动的目标位置不在障碍中, 但障碍会影响节点的直线移动. S 为节点 A 的初始位置, D 为其目标位置, 通常节点会沿着 SD 以直线形式从 S 运动至 D . 然而由于障碍的存在, SD 被分割为 3 个部分 (DQ , QP , PS), 其中 P , Q 为线段与障碍的交点. 在“BUG2”方法中节点会在到达 P 后沿障碍运动至 Q 点再继续运动. 然而在三维空间, 这样绕障碍运动将无法保证节点能准确到达 Q . 为解决该问题, 本算法认为在节点沿直线运动至 P 后, 其将在与地面平行的面上沿顺时

针绕障碍物运动,并实时探测是否能以直线运动至 D ,如果能则不再绕障碍运动而直接以直线运动至 D ,否则继续绕障碍旋转.因此对图1的情形,节点 A 的运动轨迹应当为 $SP \rightarrow PC \rightarrow CD$.当节点 A 的目标位置 D 在障碍内部时,如图2所示,节点 A 在到达 P 后同样以顺时针绕障碍运动,并探测是否能以直线方式运动至 D ,当其重新回到点 P 后即说明目标在障碍内部,则节点 A 停留在 P 点不做进一步运动.根据三角形两边之和大于第三边的定理我们易知,本改进算法不仅解决了“BUG2”无法应用到三维的情况,同时在二维上也比“BUG2”减少了运动距离.以上讨论的情况为障碍是凸集的情况,但在很多时候,障碍可能不以凸集方式存在,如图3所示的多幢房屋组成的障碍.

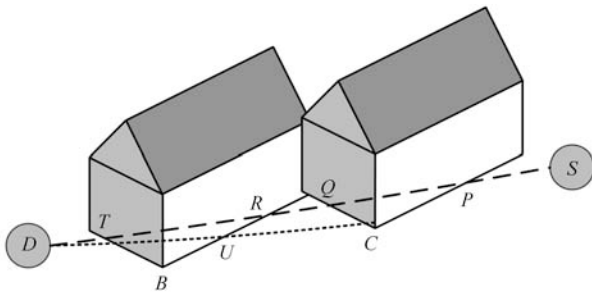


图3 障碍不为凸集的情形

Fig. 3 The case of obstacle being not a convex set

图3显示障碍由两个相连的房屋组成.对于这类情况也可以采用之前描述的算法,只是节点的直线运动会分成若干段,其运动轨迹为: $SP \rightarrow PC \rightarrow CU \rightarrow UB \rightarrow BD$.

下面讨论障碍物由于不需要覆盖对虚拟力模型造成的影响.对于该问题,可将障碍物视为目标覆盖区域的边界对问题进行转换,然而若障碍形状不规则且数量较多时会造成计算的复杂性,故本文采用第二种方法,即首先忽略障碍的影响,但当节点的最终位置与障碍的距离小于 d'_{opt} ,则强行使其运动至距离 d'_{opt} 处.这样虽然会造成不必要的移动能耗,但大大降低了计算复杂度,减少了计算能耗,同时由于 d'_{opt} 数值较小,这样的移动能耗相对于整体能耗也是一个微小量.

3.4 重部署算法设计

本节给出基于上述模型的重部署算法.当节点被随机布撒到区域后,算法开始运行,首先进入广播状态,在该状态下节点以广播形式向外发出位置信息,并等待时间 T 以获取其邻居节点信息.经过时间 T 后即进入计算状态,在该状态中节点根据获取

的所有单跳邻居节点的位置信息,采用式(14)计算调整位置,进入移动状态.在移动状态时节点采用障碍处理算法移动至计算状态得到的目标位置,等待时间 T' 后进入下一次广播状态.这些状态重复执行,直至最终状态出现.

为使节点能到达最终状态,设置一个阈值 C_{th} ,其表示往复运动次数的阈值.一次往复运动指的是同一节点相邻的两次运动间的夹角为钝角.当节点 s_i 往复运动次数超过 C_{th} 时,节点进入结束状态,不再继续运动,以减少重部署过程中的能耗.

为保证重部署结束后网络的重连通性,引入另一个阈值 F_{th} ,其表示产生随机运动的虚拟力阈值,即若节点 s_i 的虚拟力合力值小于 F_{th} ,同时 s_i 的往复运动次数不足 C_{th} 时,则 s_i 在随机方向上移动一小段距离,而不按式(14)进行移动.这样就能确保最终网络的重连通性.重部署算法如算法1所示.

算法1. 重部署算法

Algorithm: Redeployment algorithm

Procedure redeployment (L, C_{th}, F_{th}, T, T')

Begin procedure

```

1) Counter = 0;
2) While (Counter <  $c_{th}$ )
3) {
4)   broadcast location message;
5)   wait for time  $T$ ;
6)   if (get location message from 1-hop neighbors)
7)   {
8)     calculate total force  $F$  using (12);
9)     if ( $F \geq F_{th}$ )
10)    {
11)      calculate new position using (14)
12)      move to new position and wait time  $T'$ ;
13)      if (iterative moving)
14)        Counter++;
15)    }else{
16)      Make a small arbitrary move;
17)      Counter++;
18)    }
19)   }else
20)     Counter++;
21) }
```

End procedure

算法1涉及两个阈值 C_{th} 和 F_{th} .对于 F_{th} ,可将其设置为相对于虚拟力的较小量,例如10,而 C_{th} 则为一个较为重要的参数,若将其设置过小,就无法使每个传感器达到稳定状态,而将其设置过大,则会产生重部署过程中能耗的浪费.本文根据文献[12]将其设为50,当然也可根据实际模拟情况对这一阈值做适当调整.

算法1中,每个传感器以广播方式同单跳节点通信,而不需要同其他节点通信,因此其广播数据仅为自身节点位置信息,这样既降低了多跳传输时的信息冗余,也节省了通信能耗.该算法还是一个分布式算法,由于仅需同单跳节点通信,算法的时间复杂

度为 $O(c_{th}n)$.

4 算法分析

在分析算法的重连通性之前, 先定义稳定性网络. 稳定性网络具有如下两个性质: 1) 所有传感器节点基于虚拟力的合力处于平衡状态, 即节点所受合力为零或在合力作用下只进行往复运动; 2) 任何节点在任何方向做微小运动, 都不会改变平衡状态. 在重部署算法中的第 16 行中, 算法主动引入微小移动, 目的是消除瞬时平衡状态, 从而使得网络维持稳定性, 所以重部署算法执行完成之后的网络是稳定性网络. 下面本文将在两个引理后证明具有稳定性的网络必具有重连通性.

引理 1. 在三维空间中, 多于三个节点的平面拓扑网络不是稳定性网络.

证明. 对于只有一个节点的网络, 受区域中心引力作用, 节点最终稳定在区域中心位置; 对两个节点的网络, 同样受区域中心的引力, 以及它们间的相互斥力, 两个节点最终稳定在一种状态, 即区域中心是它们的交点; 同样, 对三个节点的情况也有一个稳定的网络状态, 这三个节点组成一个稳定的平面, 区域中心在它们交汇的中心. 对多于三个节点的网络, 我们采用反证法证明本引理. 首先假设稳定性网络的所有节点均位于平面 P 中, 并且每个节点根据虚拟力的定义处于暂时平衡状态, 如图 4 所示. 假设 O 为区域的中心, 不失一般性, 下面将对其中的节点 A 进行分析. 由于 A 受到中心点 O 的吸引力, 为平衡节点 A 所受的虚拟力, 需要有节点 B, C 或 D 和中心 O 相反的斥力. 如果将节点 A 向平面外做微小移动, 例如箭头方向. 由于所有在平面上的传感器节点无法对平面 P 外的节点产生拉回到平面中的虚拟力, 而由中心 O 产生的虚拟力也无法使 A 做往复运动并回到平面 P 中的原先位置, 因此 A 的平衡状态必被打破. 同时由于 A 的脱离, 整个网络的平衡状态也将被打破, 同时改变平面网络拓扑. 这个结果与稳定性的第二个性质相矛盾. 因此假设不成立, 即稳定性网络中所有节点不可能同处于一个平面内, 也就是说, 多于三个节点的平面拓扑网络不是稳定性网络. \square

引理 2. 若网络具有稳定性, 则任意节点都应处于环绕区域中心的不规则球形区域内.

证明. 假设目标覆盖区域中心为 $O(x_o, y_o, z_o)$, 并且以节点 $A(x_a, y_a, z_a)$ 作为讨论对象. 根据引理 1 可以得到, 要使节点 A 处于平衡状态, 至少需要在两个不同平面上的传感器节点给予斥力用于平衡中心吸引力. 并且在 x, y, z 任意方向上至少有一个节点较 A 更靠近中心 O . 我们以 x 方向作为讨论方向, 并假设在 x 方向, 相比于 A 节点, $B(x_b, y_b, z_b)$

与 O 的距离更近. 同样对于节点 B 来说, 必有节点 C 在 x 方向与 O 距离更近. 由于网络中的节点数量有限, 则这些节点在 x 方向必构成一个以 O 为中心的环 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow \dots \rightarrow A$. 同样, 对于节点 A 必有一个集合的传感器与之在 y 方向和 z 方向构成以 O 为中心的环. 定义这些与节点 A 相关的传感器集合为 $S_A (B, C, \dots \in S_A)$. 因此, 对任意节点 A 而言, 这些与其在 x, y, z 方向成环的传感器集合 S_A , 及与之相关的集合 S_B, S_C, \dots , 必能构成以 O 为中心的球形区域. \square

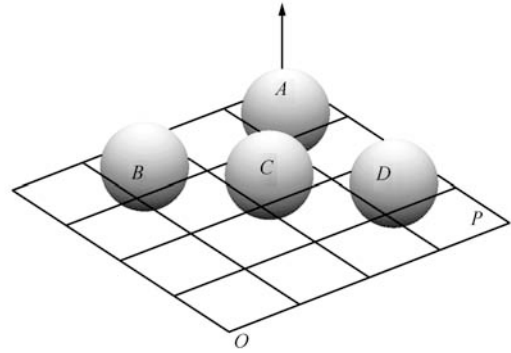


图 4 平面网络拓扑

Fig. 4 Plane topology

定理 1. 若网络具有稳定性, 则其具有重连通性.

证明. 首先证明在同一不规则球形区域内的节点具有重连通性, 其次证明在不同的球形区域内的节点也具有重连通性. 根据基于虚拟力的重部署模型, 若两个节点间存在斥力, 则其必能相互通信. 因此, 在引理 2 中的环具有重连通性. 对于以 A 为研究对象构成的不规则球形区域内的节点, 其均能同 A 进行通信. 另一方面, 由于这些节点构成的环相互交叉, 即能找到另一节点 B 以保证两个环的连通性, 则在 A 所处的球形区域中, 所有传感器具有重连通性.

不同球形区域若存在公共区域, 则这些球形区域中的节点可通过公共区域实现重连通性. 下面讨论另一种情况, 即不同球形区域不存在公共区域, 如图 5 所示, S_1 与 S_2 为不存在公共区域的两个球形区域. 假设 S_1 为在区域 S_1 中的所有节点集合, S_2 为在区域 S_2 中的所有节点集合. 则 S_1 与 S_2 具有重连通性当且仅当:

$$\begin{aligned} \exists s_i \exists s_j (s_i \in S_1 \wedge s_j \in S_2 \wedge i \neq j \wedge \\ (\min\{d(s_i, S_2)\} < r_c) \wedge \\ (\min\{d(s_j, S_1)\} < r_c)) \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $\min\{d(s_i, S_2)\}$ 表示 s_i 和节点集合 S_2 中所有节点距离的最小值. 根据中心吸引力式 (6) 的定义,

必存在一个系数 k_a 能使式 (15) 成立, 即两个球形区域的次短距离小于通信半径. 在此情况下, S_1 与 S_2 中的节点集合具有重连通性. 综上所述, 同时根据引理 2, 即可得到, 若网络拓扑具有稳定性, 网络内的集合必具有重连通性. \square

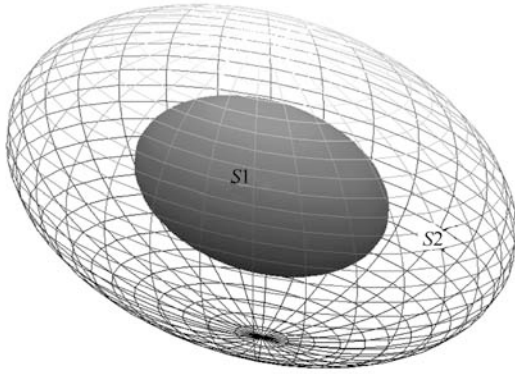


图 5 球形拓扑

Fig. 5 Spherical topology

最后考虑边界斥力对于连通性的影响. 根据式 (11) 发现, 边界斥力作用于传感器上, 仅能减少目标覆盖区域内节点间的距离. 因此若在不考虑边界斥力下的网络拓扑具有重连通性, 则加上边界因素, 网络依然具有重连通性.

5 算法仿真

本节对所提重部署算法在不存在障碍物与存在障碍物两种情形下进行仿真, 给出初始状态节点部署图、最终状态节点部署图、覆盖率变化曲线和重连通节点数量变化曲线.

5.1 不存在障碍物情况下的仿真

在 Matlab 上进行仿真, 采用的模拟数据如下: 30 个节点被随机部署在 $50 \times 50 \times 50$ 的空间中, 目标覆盖区域位于随机覆盖区域的一角, 大小为 $30 \times 30 \times 30$; 通信半径 r_c 与传感半径 r_s 分别为 10 和 5; 假设单位能耗 $L_z = 1.5$, $L_{-z} = 0.5$, $L_x = L_{-x} = L_y = L_{-y} = 1$; 阈值 C_{th} 为 $50^{[12]}$, F_{th} 为 10; k_a , k_b 和 k_c 分别为 10^2 , 10^6 , 10^{10} ; d_{max} 为传感半径的 5%. 图 6 和图 7 分别给出了节点的初始覆盖状态和最终部署状态.

在图中, 目标覆盖区域由黑色矩形框实线描出, 它位于随机部署区域的一角. 随机布撒的传感器传感范围用实体球表示, 它们随机位于部署区中. 采用式 (3) 进行计算, 得到初始条件下目标覆盖区域的覆盖率为 7.68%. 当运行完重部署算法后, 从图 7 发现, 所有节点最终都处于目标覆盖区域内部, 这是由于区域的中心吸引力和边界斥力产生的结果, 可从

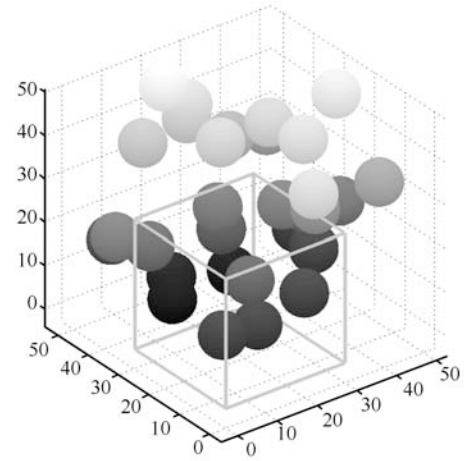


图 6 无障碍物情况下的节点初始部署图

Fig. 6 The initial deployment of nodes without obstacle

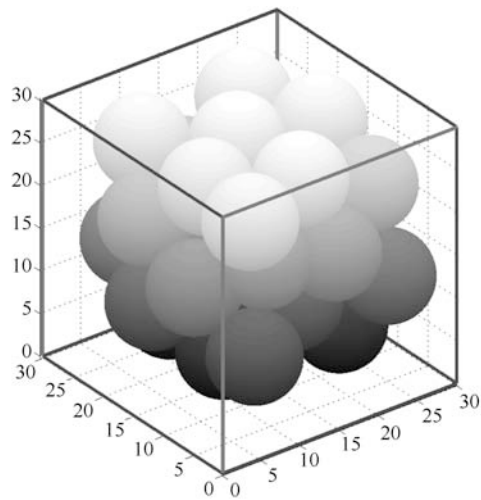


图 7 无障碍物情况下的节点最终部署图

Fig. 7 The final deployment of nodes without obstacle

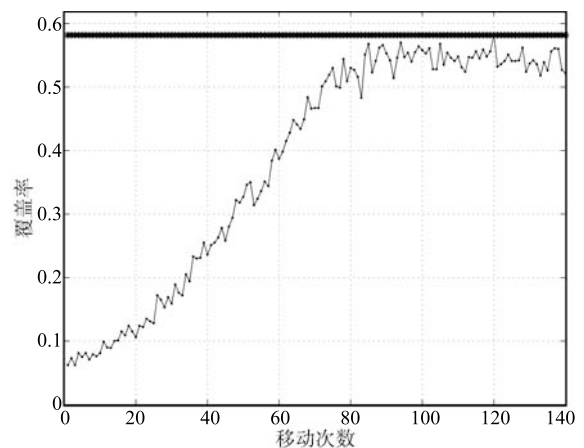


图 8 重部署过程中目标覆盖区域覆盖率变化过程

Fig. 8 The variation of coverage ratio for the target area during redeployment procedure

理论上分析得出此种情况下理想覆盖率为 58.18%.

图 8 和图 9 分别给出了本算法在执行过程中覆盖率及重连通节点数随移动次数的变化曲线。

由图 8 看到, 在初始条件下, 由于许多传感器节点位于目标覆盖区域外部, 网络的整体覆盖率低下, 此后目标覆盖区域内的覆盖率近似线性增长, 在运行了约 80 次后, 网络的整体覆盖率接近理想覆盖率, 并在理想覆盖率附近震荡, 最后在往复运动阈值到达设定值后停止. 由图 9 看出, 在初始情况下, 根据重连通的定义, 网络不具备重连通性, 这是因为在重部署刚开始时, 由于初始布撒下各节点间距离较远, 具有重连通性的节点数量较少, 但随着运行次数的增加, 具有重连通性的节点不断增多, 并在约 90 次移动后整个网络达到重连通.

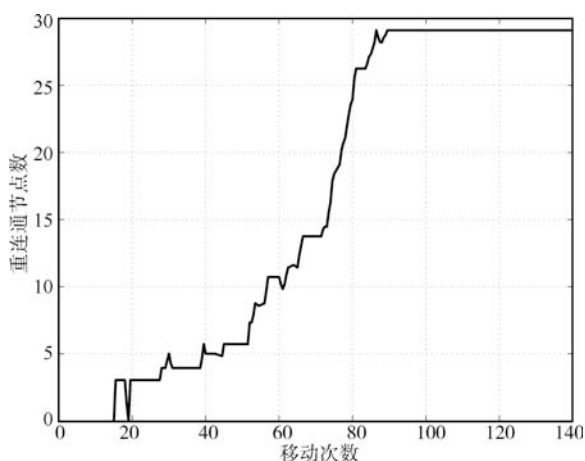


图 9 重连通节点数随移动次数的变化曲线

Fig. 9 The variation of the number of bi-connected nodes with the nodes' movement times

此外, 当 C_{th} 为 50 时, 整个网络的移动能耗为 1084.9, 单个传感器节点的移动能耗仅为 36.16. 根据对覆盖率和重连通性的分析, 在大致 90 次移动后整个网络不仅具有重连通性, 而且还是高覆盖的. 因此可以减少往复移动阈值 C_{th} , 以节省能耗.

5.2 存在障碍物情况下的仿真

本节参数设置与第 5.1 节一致, 仅在目标覆盖区域中添加了一个 $10 \times 10 \times 10$ 的障碍区域. 由于在三维示意图中, 处于中心区域的障碍较难被显示, 不失一般性, 将障碍区域设置于目标覆盖区域的一角. 图 10 和图 11 分别给出了存在障碍情况下的初始状态和最终状态部署图. 其中, 示意图角落的深色实体区域为障碍物. 此时, 随机布撒的节点不仅位于目标覆盖区域内部, 而且其传感区域与障碍区域不存在交叉. 而此时的目标覆盖区域整体覆盖率为 9.72%. 从图 11 发现所有节点最终均处于目标覆盖区域内部, 并与障碍区域不交叉. 图 12 和图 13 给出了在

此过程中目标覆盖区域整体覆盖率和障碍区域覆盖率的变化曲线.

从图 12 和图 13 可以发现, 最终的网络整体覆盖率和理论覆盖率相似, 而障碍区域覆盖率为 0. 对于存在障碍物区域的情况下, 本算法能有很好的执行效果.

通过上述的仿真实验, 重部署算法可将初始情况下随机布撒的传感器节点移动进入目标覆盖区域内, 并达到高覆盖性和重连通性, 同时能很好地处理具有障碍物区域的情形.

5.3 能耗仿真与分析

根据式 (4) 可以计算出每一次移动所有节点消耗的能量. 图 14 给出了目标覆盖区域网络整体覆盖率随节点移动能耗变化的曲线.

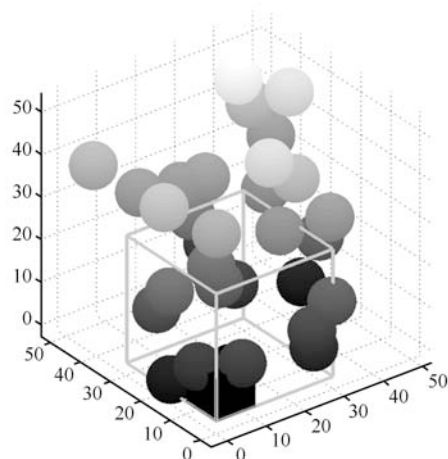


图 10 存在障碍物情况下的节点初始部署图

Fig. 10 The initial deployment of nodes with obstacle

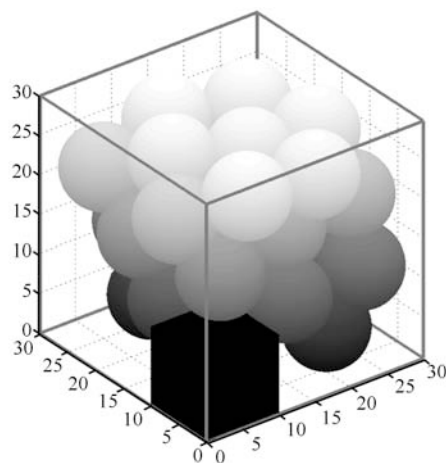


图 11 存在障碍物情况下的节点最终部署图

Fig. 11 The final deployment of nodes with obstacle

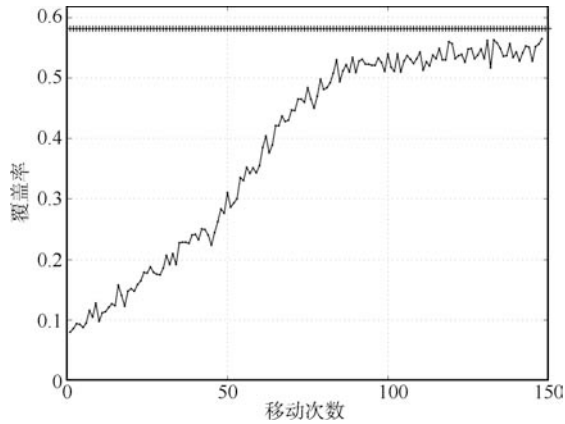


图 12 目标覆盖区域整体覆盖率随移动次数变化

Fig. 12 The variation of coverage ratio for the whole target area with the nodes' movement times

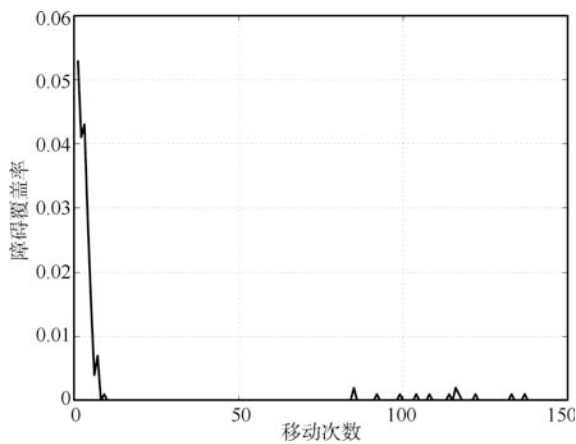


图 13 障碍物区域覆盖率随移动次数变化

Fig. 13 The variation of coverage ratio for the obstacle area with the nodes' movement times

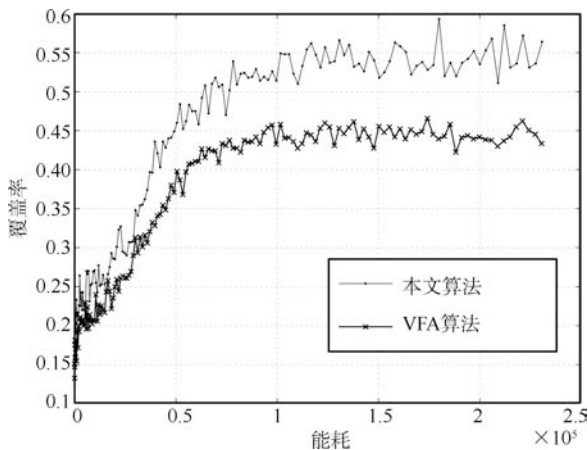


图 14 目标覆盖区域整体覆盖率随节点移动能耗变化

Fig. 14 The variation of coverage ratio for the whole target area with the nodes' movement energy consumption

从图 14 可以看出,随着移动能耗的增加,网络整体覆盖率开始呈直线增长,直到能耗为 10^5 之后趋于平衡,而且本文提出的算法在消耗相同能量的条件下能够达到比 VFA 算法^[8] 更高的覆盖率。

6 结论及今后工作

传感器网络的重部署问题是传感器网络的一个重要研究问题,本文在分析了当前的研究工作后提出了一种基于虚拟力的重部署算法.该算法是一个仅需在单跳邻居节点间广播信息的分布式算法,可将初始随机布撒形成的低覆盖率、低连通性的网络拓扑通过移动节点自组织重新构成一个具有高覆盖率、重连通性的网络拓扑,并在此过程中力求达到能耗最小化目标.算法设计时还对区域内部障碍物因素进行了充分考虑,仿真实验表明,障碍物处理算法可以达到较好的效果。

本文对能耗因素的论述略有不足,虚拟力的参数设置仅给出了定性分析,仅从多次实验和先前相关工作两方面对其设定,没有从理论上给出定量的说明,这也是下一步研究工作的重点.今后我们将在完善算法的同时用物理实验验证算法的有效性。

References

- 1 Gage D W. Command control for many-robot systems. In: Proceedings of the 19th Annual AUVS Technical Symposium. Huntsville, USA: Unmanned Systems, 1992. 28–34
- 2 Shi Wei-Ren, Yuan Jiu-Yin, Lei Lu-Ning. Research on wireless sensor network coverage control algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(5): 540–545
(石为人, 袁久银, 雷璐宁. 无线传感器网络覆盖控制算法研究. *自动化学报*, 2009, **35**(5): 540–545)
- 3 Wang G L, Cao G H, Porta T F L. Movement-assisted sensor deployment. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, **5**(6): 640–652
- 4 Cortes J, Martinez S, Karatas T, Bullo F. Coverage control for mobile sensing networks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, **20**(2): 243–255
- 5 Heo N, Varshney P K. Energy-efficient deployment of intelligent mobile sensor networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2005, **35**(1): 78–92
- 6 Jorgic M, Stojmenovic I, Hauspie M, Simplot-Ryl D. Localized algorithms for detection of critical nodes and links for connectivity in ad hoc networks. In: Proceedings of the 3rd Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop. Bodrum, Turkey: IEEE, 2004. 360–371
- 7 Das S, Liu H, Nayak A, Stojmenovic I. A localized algorithm for bi-connectivity of connected mobile robots. *Telecommunication Systems*, 2008, **40**(3–4): 129–140

- 8 Zou Y, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces. In: Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer Communications. Washington D. C., USA: IEEE, 2003. 1293–1303
- 9 Howard A, Mataric M J, Sukhatme G S. Mobile sensor network deployment using potential field: a distributed scalable solution to the area coverage problem. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems. Fukuoka, Japan: Springer, 2002. 299–308
- 10 Tan G, Jarvis S A, Kermarrec A M. Connectivity-guaranteed and obstacle-adaptive deployment schemes for mobile sensor networks. In: Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems. Washington D. C., USA: IEEE, 2008. 429–437
- 11 Du Jun-Zhao, Liu Hui, Chen Ping, Wu Bo. Building the best reliable routing tree using link quality services in WSNs. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(12): 1268–1274
(杜军朝, 刘惠, 陈平, 武波. 无线传感器网络中基于链路层服务的最可靠路由路径建立算法. *自动化学报*, 2007, **33**(12): 1268–1274)
- 12 Liu H, Chu X W, Leung Y Y, Du R. Simple movement control algorithm for bi-connectivity in robotic sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, **28**(7): 994–1005
- 13 Li X, Frey H, Santoro N, Stojmenovic I. Localized sensor self-deployment with coverage guarantee. In: Proceedings of the ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review. New York, USA: ACM, 2008. 50–52
- 14 Lumelsky V J, Stepanov A A. Path-planning strategies for a point mobile automaton moving amidst unknown obstacles of arbitrary shape. *Algorithmica*, 1987, **2**: 403–430



刘 惠 西安电子科技大学软件学院副教授. 主要研究方向为移动计算, 多核计算和互联网技术.

E-mail: liuhui@xidian.edu.cn

(LIU Hui Associate professor at the Software School, Xidian University. Her research interest covers mobile computing, multi-core computing, and internet computing.)



柴志杰 西安电子科技大学软件工程研究所硕士研究生. 主要研究方向为计算机网络.

E-mail: s_czj.student@sina.com

(CHAI Zhi-Jie Master student at the Software Engineering Institute, Xidian University. His research interest covers computer networks.)



杜军朝 西安电子科技大学软件学院副教授. 主要研究方向为无线传感器网络和软件中间件. 本文通信作者.

E-mail: dujz@xidian.edu.cn

(DU Jun-Zhao Associate professor at the Software School, Xidian University. His research interest covers wireless sensor networks and software middleware. Corresponding author of this paper.)



武 波 西安电子科技大学软件学院教授. 主要研究方向为算法设计.

E-mail: bowu@xidian.edu.cn

(WU Bo Professor at the Software School, Xidian University. His main research interest is design of algorithms.)