

基于加权虚拟力模型的锚节点移动策略的研究

魏连锁^{1,2}, 蔡绍滨^{1,3}, 潘实¹

(1. 哈尔滨工程大学计算科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 齐齐哈尔大学计算机与控制工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 3. 华侨大学计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对现有无线传感器网络 (WSN) 锚节点移动策略不能有效避免遍历网络空洞区域时引起的移动路径过长、定位精度低等缺点, 提出一种基于改进虚拟力模型的无线传感器网络锚节点移动策略。将未知节点的邻居节点数量及其到邻居节点的距离作为自身的密集权重属性, 利用未知节点的密集度作为权值来改进传统的虚拟力模型。同时考虑测距误差 ε 的大小, 利用三边测量法分析锚节点的最优分布情况、方向选择、移动步长、回退策略。使用未知节点收到的虚拟信标数量与其到锚节点的距离计算未知节点到锚节点的虚拟力, 根据所受虚拟力的大小进行方向选择并进行移动。仿真实验表明, 该策略可使锚节点根据未知节点分布的具体情况进行移动, 有较高的定位精度, 适应性强, 成功缩短了锚节点的移动路径, 降低了虚拟信标的数量, 同时还能够有效避免锚节点进入网络空洞区域, 减少了共线虚拟信标节点的数量。

关键词: 无线传感器网络; 虚拟力; 移动锚节点; 移动策略

中图分类号: TP311

文献标识码: A

Research on mobile strategy of anchor node based on weighted virtual force model

WEI Lian-suo^{1,2}, CAI Shao-bin^{1,3}, PAN Shi¹

(1. Department of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. College of Computer & Control Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China;

3. Department of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The existing mobility strategy of the anchor node in wireless sensor network (WSN) has the shortcomings of too long moving path and low positioning accuracy when the anchor node traverses the network voids area. A new mobility strategy of WSN anchor node was proposed based on an improved virtual forces model. The number of neighbor nodes and the distance between the neighbor nodes to the anchor nodes were introduced as their own dense weight attributes. The unknown nodes intensity was used as weights to improve the traditional virtual force model. Meantime the distance-measuring error ε was taken into account. The optimal distribution, direction selection, shift step length and fallback strategy of anchor node could be analyzed by the trilateration. Using the number of virtual beacon received by the unknown node and the distance between the unknown node to the anchor node calculate the virtual force. Then according to the virtual force, the direction was chosen and the anchor nodes were moved. Simulation experiments show that the strategy can make the anchor nodes move according to the specific circumstances of unknown node distribution. It has a high positioning accuracy and strong adaptability. It can successfully shorten the path of the anchor node movement and reduce the number of virtual beacon. Moreover it can effectively avoid the anchor node to enter the network voids area and reduce the number of collinear virtual anchor nodes.

Key words: wireless sensor network, virtual force, mobile anchor node, mobile strategy

收稿日期: 2016-08-15; 修回日期: 2017-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61571150); 教育部新世纪人才支持计划基金资助项目 (No.NCET-13-0753); 教育部博士点基金资助项目 (No.20132304110031); 黑龙江省自然科学基金资助项目 (No.42400621-1-14076); 哈尔滨市科技创新人才研究专项基金资助项目 (No.2014RFQXJ012); 华侨大学科研基金资助项目 (No.16BS303)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571150), New Century Excellent Talents in University Program (No.NCET-13-0753), Doctoral Program of the Ministry of Education (No.20132304110031), The Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (No.42400621-1-14076), Specialized Research Fund for the Innovation Natural Talents of Science and Technology (No.2014RFQXJ012), Scientific Research Foundation of Huaqiao University (No.16BS303)

1 引言

随着信息技术的迅猛发展,无线传感器网络成为 IT 领域的一项热点。其中,基于移动锚节点的无线传感器网络定位技术由于其成本低、灵活性高等特点,应用越来越广泛。因此,锚节点的移动策略也吸引了众多学者的研究^[1-7]。

Bahi 等^[8]提出了一种匹配希尔伯特(Hilbert)空间填充线的锚节点移动策略,与皮亚诺(Peano)曲线进行对比,并证明了 Hilbert 路径长度相对较短。Koutsonikolas 等^[9]对 Scan、Double Scan 和 Hilbert 这 3 种锚节点移动策略进行了对比。Li 等^[10-14]提出了宽度优先和回溯式贪婪策略。在该算法中,将网络区域中的节点看成无向图的顶点,令锚节点按照策略遍历图的生成树,随着网络区域中节点分布情况的不同,图的形状也不同,此策略可以根据未知节点的具体分布来决定锚节点的移动路线。

在以上的锚节点移动策略中,许多策略为了达到一定的定位覆盖率,令锚节点的移动路径覆盖了整个网络,忽视了未知节点的实际分布密度,出现锚节点不能有效避免遍历网络空洞区域、不能提供较好的虚拟信标节点分布形状、移动路径太长、定位精度低等问题。由于虚拟力和节点分布之间有着密切的联系,文献[15]首次将虚拟力势场的概念引入到了无线传感器网络的节点覆盖问题中,提出了基于虚拟力势场的无线传感器网络节点覆盖方法。文献[16-18]对上述虚拟力势场进行了改进,提出了虚拟力算法(VFA, virtual force algorithm),该算法将虚拟引力和虚拟斥力相结合,由此决定随机分布的节点的运动路径,考虑到能耗,节点会在汇聚节点计算完各节点的最终坐标后,统一一次性进行移动。但是,当未知节点完成定位前和定位后虚拟力为 0 时,移动锚节点失去牵引不再移动,节点可能出现局部死循环导致定位失败。因此,本文将未知节点的密集度作为权值改进经典移动锚节点虚拟力模型,提出了适用于锚节点移动策略的虚拟力改进模型,同时考虑测距误差 ε 的大小,利用三边测量法分析出锚节点的最优分布情况、方向选择、移动步长、回退策略。使用未知节点收到的虚拟信标数量与其到锚节点的距离计算未知节点到锚节点的虚拟力,根据所受虚拟力的大小进行方向选择并移动。

2 虚拟力的改进模型

在节点随机分布的网络区域内,通常会出现不规则分布的网络区域,如 C 形区域,或有些区域没有节点的覆盖,即网络“空洞”区域。为了减少锚节点的移动路径,提高定位精度,锚节点的移动路径应只覆盖未知节点分布的区域,避免在网络空洞中移动。因此,未知节点对锚节点不产生斥力作用,在锚节点通信范围内的所有未知节点对锚节点都有着引力作用。该引力随着距离的增大而减小,这样可以使锚节点优先考虑距离其较近的节点的定位需求。同时,为了提高效率,锚节点应该优先向未知节点分布密集的区域进行移动,避免在节点分布稀疏区域进行过多的移动,则处于节点分布密集区域的节点对锚节点的引力相对较大。

2.1 虚拟力算法模型

在传统虚拟力算法 VFA 模型中^[15],将移动传感器节点看作带电微粒,节点间存在相互作用力,当节点间的距离小于某一阈值时,节点间产生斥力;当节点间的距离大于阈值时,节点间产生引力。节点所受的虚拟力是所有节点对其产生虚拟力的合力,合力大小与方向引导节点运动,且存在基本设定:1) 锚节点是可移动的;2) 所有的传感器节点具有全向传感器,其感知模型为布尔模型;3) 传感器节点位置信息可通过 GPS 获得,也可利用文献[19]方法,在获得 3 个或 3 个以上锚节点或虚拟信标节点的距离后,利用三边测量法或极大似然估计法计算得到未知节点位置信息。

假设区域内的传感器节点集为 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, 则第 i, j 传感器节点 $s_i(x_i, y_i)$ 和 $s_j(x_j, y_j)$ 之间的距离为

$$d_{ij} = d(s_i, s_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

那么,传感器节点 s_j 对 s_i 的作用力表达式为

$$F_{ij} = \begin{cases} (\omega_A (d_{ij} - d_{th}), \alpha_{ij}), & d_{ij} > d_{th} \\ 0, & d_{ij} = d_{th} \\ (\omega_R \frac{1}{d_{ij}}, \alpha_{ij} + \pi), & d_{ij} < d_{th} \end{cases} \quad (2)$$

其中, d_{ij} 是 s_i 和 s_j 的欧几里得距离, d_{th} 是节点间的最小距离阈值, α_{ij} 是 s_i 到 s_j 的向量角度, ω_A 和 ω_R 分别是引力系数和斥力系数。

根据式(2)可计算出锚节点对感知区域内的节点所受到的分力 F_{ij} ，这些分力 F_{ij} 的矢量和即为该锚节点所受到的虚拟力 F_1 ，锚节点将根据该虚拟力 F_1 的大小沿受力方向移动相应的距离如图 1 所示。节点 S_1 和 S_2 是锚节点 M_1 的邻居节点，并且在锚节点 M_1 的通信半径范围内， S_1 和 S_2 对 M_1 产生作用引力 F_{11} 和 F_{12} 。 S_3 、 S_4 和 S_5 不是锚节点 M_1 的邻居节点，并且不在锚节点 M_1 的通信半径范围内， S_3 、 S_4 和 S_5 对 M_1 不产生作用引力， M_1 受到的作用力矢量和为 F_1 ，在 F_1 作用下锚节点 M_1 从位置 A 移动到新位置 B 。但是，当锚节点感知范围内虚拟力为 0 时，锚节点 M_1 失去牵引不再移动，如图 2 所示。当未知节点 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 和 S_5 是锚节点 M_1 的邻居节点，并且都在锚节点 M_1 的通信半径范围内， S_1 和 S_2 对 M_1 产生作用引力 F_{11} 和 F_{12} ， M_1 受到的作用力矢量和为 F_1 ， S_3 、 S_4 和 S_5 对 M_1 产生作用引力 F_{13} 、 F_{14} 和 F_{15} ， M_1 受到的作用力矢量和为 \dot{F}_1 ，由于锚节点受到的虚拟力与通信半径范围内邻居节点个数和到其距离有关，这里令 F_1 和 \dot{F}_1 大小相等，方向相反，所以锚节点 M_1 受到未知节点 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 和 S_5 的虚拟力为 0，锚节点 M_1 失去牵引保持在原地不再移动。当锚节点 M_1 受到虚拟力被牵引到新位置时，原有的 M_1 的邻居节点会进入或离开锚节点 M_1 的通信半径范围，对 M_1 产生新的或不产生虚拟力，而新未知节点进入或离开锚节点 M_1 的通信半径范围内，作为 M_1 的邻居节点产生新虚拟力并且与原虚拟力方向相反，这样会引起移动锚节点在局部区域来回振荡进入循环移动，如图 3 所示。当节点 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 都是锚节点 M_1 的邻居节点，并且都在锚节点 M_1 的通信半径范围内， S_5 不在锚节点 M_1 的通信半径范围内， S_5 对 M_1 不产生作用引力， S_1 、 S_2 对 M_1 产生作用引力 F_{11} 和 F_{12} ， M_1 受到的作用力矢量和为 F_1 ， S_3 、 S_4 对 M_1 产生作用引力 F_{13} 、 F_{14} ， M_1 受到的作用力矢量和为 \dot{F}_1 ，这里令 F_1 的大小大于 \dot{F}_1 的大小，方向相反，在 F_1 和 \dot{F}_1 合力作用下锚节点 M_1 从位置 A 移动到新位置 B 时，此时 S_5 恰好进入锚节点 M_1 的通信半径范围，对 M_1 产生新作用引力 F_{15} ， S_3 、 S_4 对 M_1 产生作用引力 F_{13} 、 F_{14} ， M_1 受到新的作用力矢量和为 \dot{F}_1 ，这里令 \dot{F}_1 的大小大于 F_1 的大小，方向相反，则锚节点 M_1 又从点 B 向 A 移动，这样锚节点 M_1 在 A 、 B 之间来回振荡进入循环移动，直至能量耗尽。

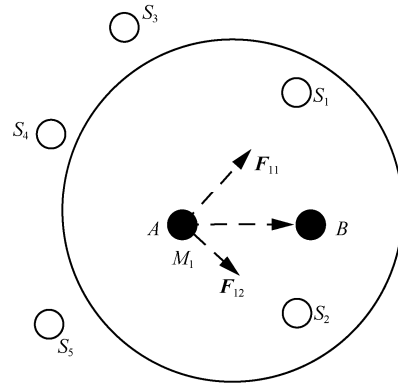


图 1 锚节点受虚拟力牵引移动示意

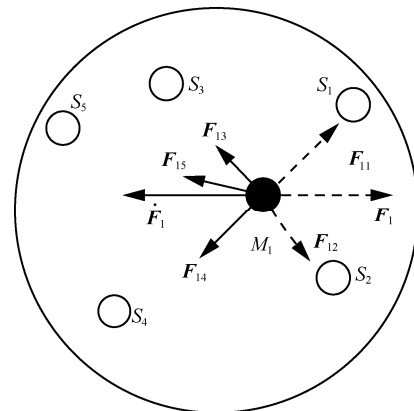


图 2 锚节点受虚拟力为 0 不移动示意

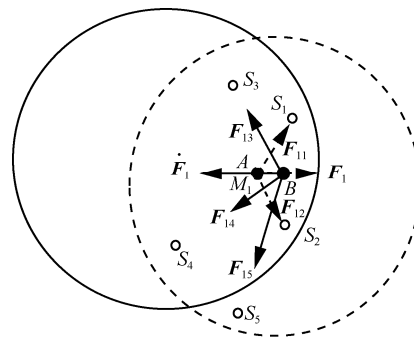


图 3 锚节点受虚拟力牵引振荡循环移动示意

2.2 感知区域内未知节点的密集度权重定义

根据上述分析，锚节点所受到的虚拟力与未知邻居节点分布之间有着密切的联系，而锚节点的动态移动策略又是根据未知节点的具体分布情况来实现。因此，虚拟力技术的引入可以令锚节点更好地收集通信范围内未知节点的相关信息，根据未知节点的密集程度进行移动。而影响感知区域内未知节点分布的密集程度有 2 个因素：一是节点与其邻居节点个数，二是节点与其邻居节点间的距离。在考虑感知区域内未知节点自身的属性的情况下，节点布放所在区域的密集程度主要研究以下 2 种情况。

1) 当节点与其邻居节点数目相同,但是节点与邻居节点的距离不同,则节点所在区域的密集程度不同。如图 4(a)所示,节点 A 和节点 B 都有 7 个邻居节点,但是节点 A 和节点 B 与其他邻居节点的距离不同,则节点 A 所在区域节点分布更加密集。

2) 当节点与其邻居节点数目不相同,但是节点邻居节点间的距离相等或相近,则节点所在区域的密集程度不同。如图 4(b)所示,节点 A、节点 B 与它们的邻居节点间的距离相等或相近,但是邻居节点数目不同,则节点 A 处于节点分布更加密集的区域。

由此可见,判断节点分布区域的密集程度可以通过衡量每个节点的邻居节点数目以及它与邻居节点间的距离来判断。

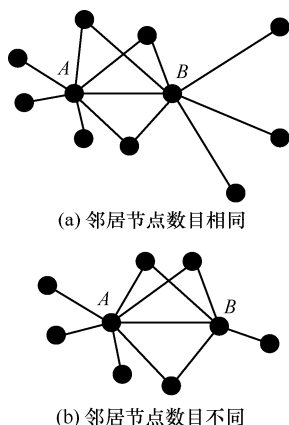


图 4 节点所在区域的密集程度示意

定义 1 密集度权重。一个节点的密集权重代表其所在区域的密集程度,其计算式如下

$$M_j = \frac{N^2}{\sum_{n=1}^N d_{jn}} \quad (3)$$

其中, N 是 S_j 的邻居节点个数, d_{jn} 为邻居节点 S_n 到 S_j 的距离。

对于一个节点来说,它的邻居节点个数越多,邻居节点到它的距离越小,这个节点的密集权重越大,表明这个节点所在区域越密集。

2.3 基于未知节点密集度权重改进虚拟力模型

锚节点根据感知区域内未知节点到其的距离以及未知节点的密集权重来计算所受到的虚拟引力 \vec{f} ,判断它的下一步能够向着节点更多、更密的方向移动。因此,采用未知节点的密集度 M_j 作为权重将 VFA 模型(式(2))中的未知节点 S_j 对锚节点 S_i 所施加的引力按式(4)计算,得到锚节点移动策

略的修正虚拟力模型,使锚节点避免在受虚拟力为 0 时,不再移动和循环振荡移动,同时也避免进入无节点分布的网络空洞区域。

$$F_{ij} = \left(\omega_A \frac{M_j}{d_{ij}}, \alpha_{ij} \right) \quad (4)$$

$$\omega_A = \begin{cases} 0, R_j \geq 3 \\ \mu, R_j = 1 \\ 1, R_j = 2 \end{cases} \quad (5)$$

其中, M_j 代表未知节点质量,为上述的密集权重, d_{ij} 为未知节点 S_j 到锚节点 S_i 的距离, α_{ij} 为锚节点 S_i 指向未知节点 S_j 的方向, ω_A 为引力系数,它与未知节点收到的虚拟信标节点的个数有关,当未知节点已经收到了 3 个虚拟信标节点时,则认为它可以进行定位,引力系数为 0,表明此节点不需要锚节点再去它的附近提供虚拟信标节点,对锚节点产生的虚拟力也为 0,当未知节点收到 2 个虚拟信标节点,即再收到一个虚拟信标后就可以定位时,锚节点应优先去这个节点的附近。因此, ω_A 的取值情况如式(5)所示,其中, R_j 为未知节点 S_j 收到的虚拟信标节点的个数, $\mu \in (0,1)$ 。

3 基于改进虚拟力锚节点的移动策略

在基于测距的定位过程中,在运用三边测量法对未知节点进行坐标估计时,只有当 3 个锚节点为非共线锚节点时才能唯一确定未知节点的坐标。但是,经研究发现 3 个锚节点的分布状况和所发送的虚拟信标节点的位置及移动路径对未知节点定位都有一定的影响。

3.1 锚节点最优分布分析

在利用三边测量法进行节点位置坐标的估计中,并没有考虑测量距离所带来的测距误差,而在实际环境中,测距误差通常是不可避免的。

定理 1 已知测距误差为 ε ,未知节点到锚节点的真实距离为 d ,其测量出的距离可能为 $d \pm \varepsilon$, $P_i (i=1,2,3)$ 为 3 个锚节点。

证明由于存在测距误差 ε 使 3 个圆环形成的一个小区域 $ABCDEF$ 面积的大小是定位误差的大小。

证明 设 P_i 坐标为 $(x_i, y_i) (i=1,2,3)$, 根据已知,以 P 为圆心、 d 和 $d+\varepsilon$ 为半径作圆,各圆分别相交于 A, B, C, D, E, F , 如图 5 所示,可以按照式(6)定义每个锚节点的误差区域,则代表误差大

小的区域 S 可由式(7)表示。

$$S_{P_i} = \{(x, y) \in R^2 \mid (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \leq (r_i + \varepsilon)^2, (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \geq (r_i - \varepsilon)^2\} \quad (6)$$

$$S = \bigcap_i^3 S_{P_i} \quad (7)$$

1) 当 3 个锚节点的测距误差都为 0, 即 $\varepsilon=0$ 时, 区域 S 只包含一个点, 这个点可以由三边测量法计算得出未知节点的准确位置。

2) 当 3 个锚节点的测距误差存在不为 0, 即 $\varepsilon>0$, 则 S 是一个有面积的区域, 即上述的 $ABCDEF$ 区域。

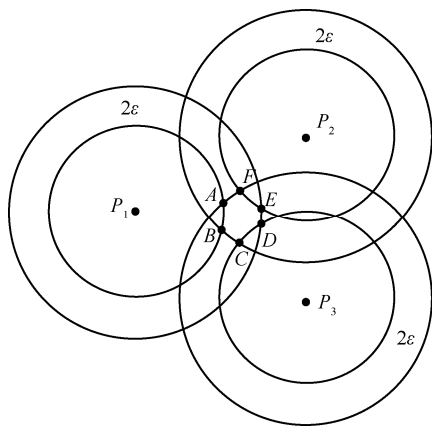


图 5 含测距误差的三边测量法

为了方便证明, 放大区域 S , 如图 6 所示, 在区域 S 中, 以 O 为圆心, ε 为半径作圆, $l_{O,i}$ 是过 O 和 l_i 的直线并与圆交于 2 点 $l_{i,1}$ 和 $l_{i,2}$ 。对于 $j=1,2$, 令 \tilde{l}_{ij} 为过点 l_{ij} 的圆的切线, 区域 \tilde{S}_O 就是 2 条切线 \tilde{l}_O^1 、 \tilde{l}_O^2 与区域 S 围成的区域。

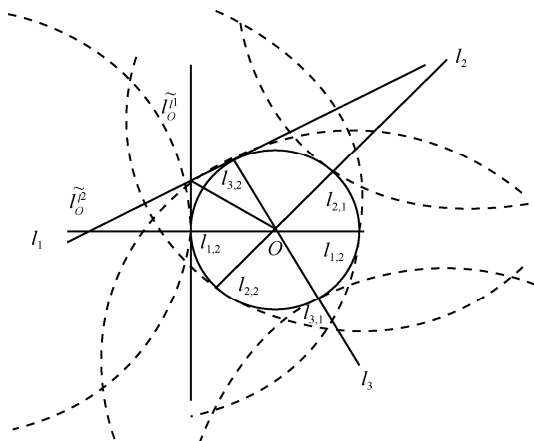


图 6 误差区域

令 \tilde{S} 为 3 组切线与区域 S 所围成的区域, 有

$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \tilde{S} = S$, 即当 3 个锚节点间的连线组成正三角形时, 定位误差最小使区域 \tilde{S} 的面积具有最小值, 则有如下定理。

定理 2 已知 α_{ij} 为向量 \vec{l}_i 和 \vec{l}_j 间的夹角, 当 $\alpha_{12}=\alpha_{23}=\alpha_{31}=\frac{\pi}{3}$ 时, 区域 \tilde{S} 的面积达到最小值。

证明 区域 \tilde{S} 的面积可看成是 6 组切线与圆组成的 6 个四边形的面积之和, 其中, 每个四边形都是由 2 个直角三角形所组成, 则该面积可以由式(8)表示。

$$\tilde{S} = 2\varepsilon^2 \left(\tan \frac{\alpha_{12}}{2} + \tan \frac{\alpha_{23}}{2} + \tan \frac{\alpha_{31}}{2} \right) \quad (8)$$

又因为 $\alpha_{12} + \alpha_{23} + \alpha_{31} = \pi$, $(\tan x)'' = 2 \tan x(1 + \tan x) \geq 0$, $0 \leq x \leq \frac{\pi}{2}$, 则可得出

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= 6\varepsilon^2 \frac{1}{3} \left(\tan \frac{\alpha_{12}}{2} + \tan \frac{\alpha_{23}}{2} + \tan \frac{\alpha_{31}}{2} \right) \\ &\geq 6\varepsilon^2 \tan \frac{\alpha_{12} + \alpha_{23} + \alpha_{31}}{6} \end{aligned} \quad (9)$$

所以, 当 $\alpha_{12}=\alpha_{23}=\alpha_{31}=\frac{\pi}{3}$ 时, 式(9)可以取到最小值, 又由于 3 个锚节点通信半径相等, 则 $\Delta P_1 P_2 P_3$ 为正三角形。

由上述分析可知, 当 3 个锚节点呈线性分布时, 定位误差最大, 呈正三角形分布时, 定位误差最小。

3.2 锚节点方向选择

由虚拟力改进模型可知, 未知节点收到 3 个不共线的虚拟信标即可进行定位, 当未知节点收到的 3 个虚拟信标呈正三角形分布且未知节点位于此三角形内时, 定位精度最高。因此, 为了获得较高的定位精度, 需要尽量让锚节点各个发送虚拟信标的点之间组成正三角形。本文将锚节点的移动方向仅分为 6 个方向, 每个方向之间的夹角为 60° , 如图 7 所示, 对应 6 个候选位置 P_1, P_2, \dots, P_6 , 若每次移动的步长 L 相同, 则各虚拟信标节点就能组成正三角形。若锚节点 S_i 当前的位置坐标为 (x, y) , 则它的下一步候选位置 (x_k, y_k) 可由式(10)得出。

$$\begin{cases} x_k = x + L \cos \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi(k-1)}{3} \right) \\ y_k = y + L \sin \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi(k-1)}{3} \right) \end{cases} \quad (10)$$

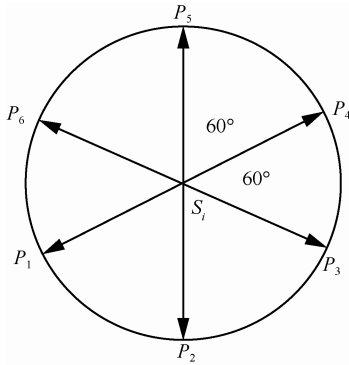


图 7 锚节点的 6 个候选移动方向及候选位置

为了使锚节点从这 6 个方向选出合适的方向进行移动，分别以这 6 个区域为中心，划分出 6 个相等区域，如图 8 所示。按照上述虚拟力模型，计算每个区域内未知节点对锚节点所施加的虚拟力，并将其映射到该区域对应的候选方向上，锚节点 S_i 在区域 k 所受的虚拟力 \vec{F}_i^k 按照式(11)计算，其中， θ 为计算出的虚拟合力与区域对应的方向的夹角， N_k 为区域 k 中未知节点的个数。虚拟力最大的区域对应方向即为锚节点的下一步移动方向，移动完成后，将该方向对应区域从候选区域中删除，避免锚节点在几个位置反复移动，出现绕圈现象。

$$\vec{F}_i^k = \sum_{j=1}^{N_k} \vec{F}_{ij} \cos \theta \quad (11)$$

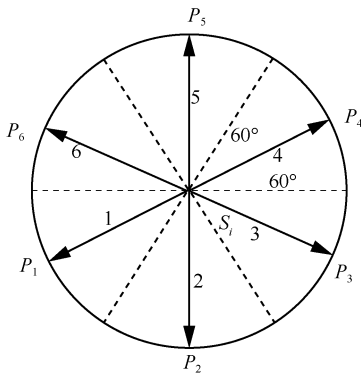


图 8 锚节点通信范围内 6 个区域的划分

3.3 锚节点移动的步长

设通信半径为 R ，步长为 L ，若 $L > 2R$ ，则不能顺利进行定位，所以 L 的范围应在 $(0, 2R)$ 。当未知节点在已收到锚节点连续发送的 2 个虚拟信标时，当 $L \leq \sqrt{3}R$ 时，未知节点在收到第 3 个虚拟信标即可定位。如图 9 所示， S_1 、 S_2 和 S_3 为锚节点发送虚拟信标的位置， P 为未知节点位置，当 P 到 P_1 、 P_2 和 P_3 的距离达到最大值 R 时， L 达到最大值，

即 $L = \sqrt{3}R$ 。

$$L = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (12)$$

$$\Delta x = \int \left(v_x + \frac{F_x - f v_x}{M} t \right) dt \quad (13)$$

$$\Delta y = \int \left(v_y + \frac{F_y - f v_y}{M} t \right) dt \quad (14)$$

其中， Δx 与 Δy 为锚节点在 x 轴与 y 轴方向上的位移增量； F_x 与 F_y 分别为合力 \vec{F}_i^k 在 x 轴与 y 轴上的分力， v_x 和 v_y 节点当前的移动速度分量， f 为阻尼系数， M 为虚拟质量， t 为每轮移动的时间。

若步长太小，则定位效率会过低，造成锚节点能耗的浪费，因此，本文将步长的范围定为 $(0.4R, \sqrt{3}R)$ 。

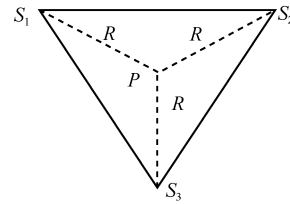


图 9 步长与通信半径间的关系

3.4 锚节点回退策略

锚节点根据虚拟力大小，按照上述方向选择策略进行移动，当感知区域内未知节点完成定位前和定位后虚拟力为 0 时，移动锚节点失去牵引，不再移动或出现局部死循环。导致这种情况的出现有 3 个可能原因：1) 锚节点进入了无未知节点分布的网络空洞区域；2) 在锚节点当前感知区域内所有未知节点均已完成定位；3) 锚节点此刻所在位置 6 个候选位置都已遍历过的情况。当遇到上述情况时，锚节点都无法继续根据虚拟力进行移动，此时应当返回到上一位置重新进行方向决策，但若直接回到上一位置则会出现冗余路径，造成资源浪费。因此，锚节点在方向选择时，将可选的虚拟力次大的区域对应候选位置存储在回退位置表中，每次移动都更新该表，在锚节点陷入上述状态时，查找回退位置表，直接移动到回退位置表中的位置处。如图 10 所示，圆圈代表可选位置， \times 代表不可选位置，假设当锚节点移动到位置 A 时， B 所在区域对锚节点施加的虚拟力最大，虚拟力次大区域为位置 C 所在区域，锚节点则移动到位置 B ，将位置 C 的坐标存入回退位

置表中, 设锚节点在位置 B 处选择位置 D , 回退位置表中仍为 C 的坐标。当锚节点移动到 D 处时, 无可选位置, 则此时锚节点查找回退位置表, 直接移动到位置 C 处, 重新进行方向选择。由于连续多次出现节点无候选位置的情况的概率很低, 为节约时间及空间, 回退位置表只存储一个回退位置的坐标, 每次移动到新的位置都将该表进行更新, 若在回退位置处仍需要回退, 即无可选位置且回退位置表中的位置与当前位置一致, 则回到虚拟信标节点位置表中倒数第 3 个的位置处 (因为最后 2 个位置一定无对应的可选位置), 然后按照次序原路回退, 直到出现可选位置。例如, 在位置 C 处仍需要回退, 则按照原来的路径, 先回退到 B 处, 再回退到 A 处。

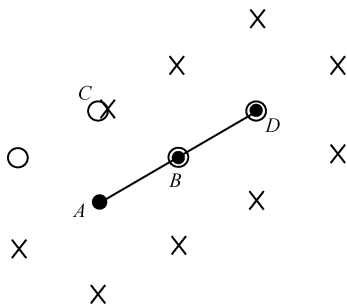


图 10 回退情况

4 基于虚拟力的无线传感器网络锚节点的移动策略具体步骤

步骤 1 将锚节点放置到初始位置, 初始化虚拟信标节点位置信息表 $beacons_postion = \{id, x_{id}, y_{id} | id = 1, 2, \dots\}$, 其中, id 为每个虚拟信标节点的标识号, (x_{id}, y_{id}) 为标识号为 id 的虚拟信标节点的位置坐标。

步骤 2 锚节点基于极坐标将感知区域划分成 6 个相等区域, 每个扇形区域的顶角为 60° , 向通信范围内的未知节点发送虚拟信标及信息收集消息, 并按照式(11)计算出各区域的候选位置, 建立候选位置的集合。

步骤 3 未知节点收集一跳范围内的邻居节点信息, 排除掉已定位过的节点, 根据未知邻居节点计算密集权重, 然后向锚节点发送含有自身密集权重的数据分组。

步骤 4 锚节点收到未知节点发来的密集权重信息, 按照式(12)分别计算各候选区域中未知节点对锚节点所施加的虚拟力, 选择虚拟力最大的区域

对应候选位置作为下一步的移动位置。

步骤 5 将虚拟力次大的区域对应候选位置作为回退位置, 将其存入回退位置表 $beacons_postion$, 若无次大虚拟力, 则不更新回退位置表。

步骤 6 若各候选位置对应区域的虚拟力为 0 或无候选位置, 则按照回退策略根据回退位置表的当前位置进行回退, 并返回步骤 2 重新进行计算。

步骤 7 锚节点移动到步骤 4 中计算出的位置, 更新 $beacons_postion$ 表。返回步骤 2 继续进行方向选择, 当定位覆盖率超过一定的阈值时, 策略终止。

5 仿真实验与性能分析

本文在 Matlab 平台上对此策略进行仿真实验, 采用三边测量法对未知节点进行定位, 同时, 选择 SCAN、LMAT 和 VFA 策略作为对比, SCAN 及 LMAT 策略为较经典的锚节点移动策略, LMAT 策略中锚节点沿正三角形移动, 定位精度较高, 用此策略作对比是为了观察本策略在定位精度上的表现。为了具有可比性, 设置 3 种对比策略的移动步长与本策略的相同, 实验主要验证了本策略在锚节点移动路径长度及全网平均定位误差率方面的性能。

5.1 相关参数设置

在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的区域内随机分布 150 个节点, 将设在网络部署区域仅放置一个移动锚节点, 初始位置在网络中心位置附近。图 11 中白色圆点处表示移动锚节点的初始移动位置, 即在锚节点运动前就将锚节点放置在这个位置。待定位命令开始执行后, 移动锚节点就从初始位置开始运动, 并在出发点广播包含自身位置信息的数据分组, 使锚节点通信范围内的未知节点能够接收到第一个数据分组。按照 3.2 节中锚节点所受虚拟力大小, 以图 7 规划的方向, 以边长为 R 为步长的正三角形轨迹移动, 在移动路程长度为 R 的位置上广播第 2 个数据分组, 产生第 2 个虚拟信标节点, 在这个参考节点通信半径内的未知节点能够接收到位置信息。同样, 在移动距离为 $2R$ 的位置上产生第 3 个虚拟信标节点, 并且使这个虚拟信标节点通信范围内的未知节点也能接收到信息分组。则 3 个圆交叉区域的未知节点接收到了 3 个虚拟参考节点的数据分组, 通过 RSSI 模型可计算出自身的位置坐标。

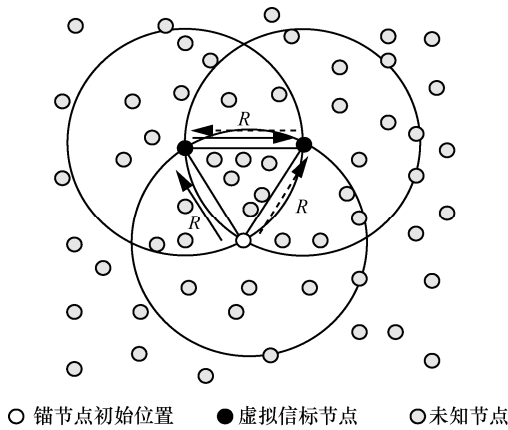


图 11 锚节点路径规划示意

令通信半径 R 为 15 m，通信模型采用 RSSI 模型，设置 $P_L(d_0)=55$ dBm， $n=4$ ， X_σ 的均值为 0，方差 δ 为 5，观察在锚节点移动 25 次时，定位误差率及定位覆盖率随着锚节点步长变化的情况，结果如图 12 和图 13 所示。可以看出，节点的定位误差率随着步长的增加逐渐下降，当步长大于通信半径时，误差较低且逐渐趋于稳定，这是由于当步长过小时，虚拟信标节点的分布过于集中，未知节点很可能收到 3 个距离很近的锚节点发来的虚拟信标，

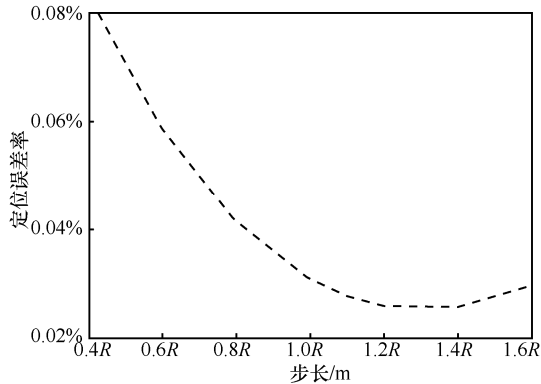


图 12 不同步长下的定位误差率的变化

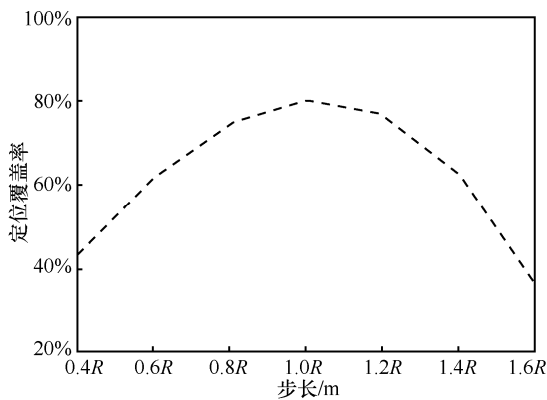


图 13 不同步长下的定位覆盖率的变化

造成较大的定位误差。而定位覆盖率则是在步长等于通信半径值时达到最大值，当步长过大时，大量未知节点收到的虚拟信标数量不足 3 个，定位覆盖率较低。因此，由此结果可看出，锚节点的步长 $L=R$ 时，效果较好，在后续的实验中，将步长 L 设置为 R 。

5.2 仿真结果

5.2.1 不同拓扑结构下的锚节点移动路径

设在矩形区域内锚节点初始位置为 $(0,0)$ ，按照上述参数设置运行 VFMS 算法，则锚节点移动路径如图 14 所示。在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的矩形区域内空出 $70\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的区域作为网络空洞，为了保证节点密度与矩形分布基本一样，在剩余区域随机分布 100 个传感器节点，形成 C 形分布的网络拓扑。为了更好地说明问题，设在 C 形区域内锚节点初始位置为 $(100, 100)$ ，在 C 形分布下运行 VFMS 算法，锚节点移动路径如图 15 所示。从图 14 和图 15 可以看出，应用 VFMS 策略可以使锚节点根据网络中节点的具体分布情况进行移动，尤其是在 C 形分布的网络拓扑下，VFMS 策略能有效避免网络空洞，只沿着网络节点分布的区域进行遍历，这是因为锚节点会按照所划分区域的虚拟力作用进行移动，无节点分布的区域对锚节点无虚拟力的作用，有效避免了锚节点向着网络空洞进行移动，减少了不必要的虚拟信标的发送，减少了锚节点的能量消耗。在实际环境中，不规则的网络分布十分常见，而在这些区域中，相比于静态路径规划算法，VFMS 算法具有更好的灵活性及实用性。

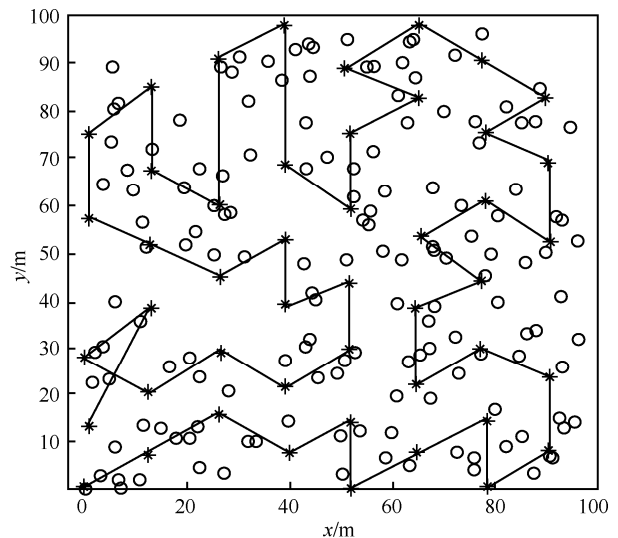


图 14 矩形区域的锚节点移动路径

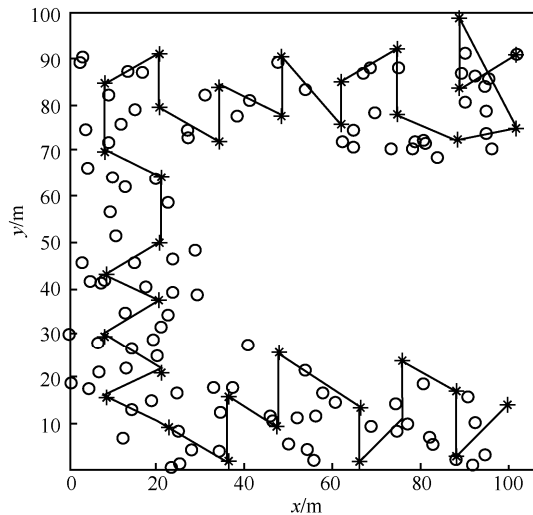


图 15 C 形区域的锚节点移动路径

5.2.2 不同拓扑结构下的锚节点移动路径长度

当通信半径为 15 m 时，观察 VFMS 策略与 SCAN、LMAT、VFA 这 3 种策略在矩形拓扑及 C 形拓扑下的移动路径长度，运行各策略 100 次，取平均值，结果如图 16 所示。从图中可以看出，SCAN 策略在 2 种拓扑下，锚节点主要沿着一个维度进行扫描（即沿 x 轴或 y 轴），锚节点的移动路径都固定不变，能够为整个网络区域提供均匀的覆盖，但是这种移动方式会使许多虚拟信标节点共线，降低了定位的准确性。LMAT 策略在 2 种拓扑下，锚节点的移动路径都固定不变，但是锚节点一直沿着正三角形路径进行折线运动，并穿过网络空洞进行移动，整体路径长度比 SCAN 策略路径长，尤其是在 C 形拓扑下，应用这种策略浪费了很大的能量。VFA 在 2 种拓扑下，锚节点受虚拟力牵引优先向未知节点分布密集的区域进行移动，避免在节点分布稀疏区域进行过多的移动，所以在矩形分布下的路径长度要高于 C 形分布下的长度，又由于锚节点只在有节点分布的区域移动，使移动路径整体路径长度比 SCAN 策略路径短。VFMS 策略在 2 种拓扑下，主要采用未知节点的密集度作为权值来改进传统的虚拟力模型，克服了 VFA 由于锚节点所受未知邻居节点的虚拟力的不同而引起的移动锚节点失去牵引不再移动和局部循环振荡移动问题，同时，考虑测距误差 ε 的大小，结合三边测量法分析出锚节点的最优分布情况，降低了 3 个锚节点共线的可能性，提高了 3 个锚节点呈正三角形分布的概率，成功缩短了锚节点的移动路径，所以整体路径长度比 VFA 策略路径长度短。另外，VFMS 策略在矩形分布下

的路径长度要高于 C 形分布下的长度，这是因为锚节点根据节点的分布情况进行移动，在 C 形分布下，有较大面积的无节点分布的网络空洞区域，锚节点在移动到此区域边缘时，由于无节点即无虚拟力存在，锚节点不会向网络空洞区域遍历。由此可见，VFMS 策略在节点不规则分布时，在路径长度方面有着较优表现。

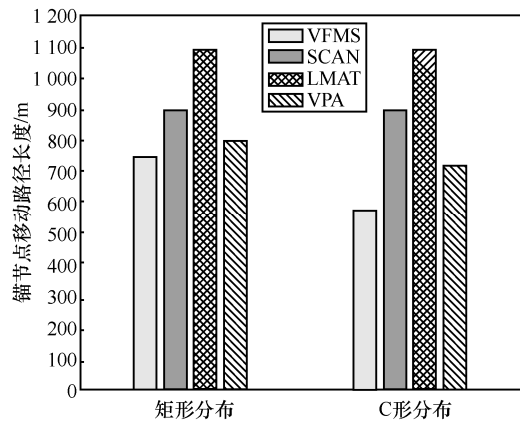


图 16 不同策略在 2 种拓扑下的移动路径长度

5.2.3 定位误差分析

在通信半径 R 为 15~20 m 时，在矩形网络拓扑下分别对 VFMS 策略和 SCAN、LMAT、VFA 策略进行性能分析，其主要指标为定位误差率，即平均定位误差与通信半径的比值。从图 17 中可以看出，在 VFMS 策略下的定位误差率要低于 SCAN 策略和 VFA 策略，但要略高于 LMAT 策略。这是由于未知节点都能收到较多数量的虚拟信标节点，当测距误差一定时，SCAN 策略的虚拟信标节点共线的情况较多，导致 SCAN 策略定位误差率最高，VFA 策略减少了一定的虚拟信标节点共线情况，定位误差率

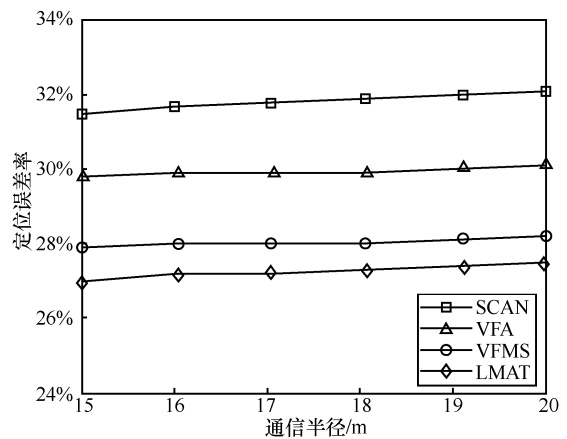


图 17 不同通信半径下的定位误差率

相对较低, LMAT 策略是令锚节点沿着正三角形路径进行移动, 因此, 定位误差率最低, 而 VFMS 算法采用 60° 角划分每一步的移动方向, 有效减少了 3 个锚节点共线的问题, 并且提高了锚节点呈正三角形分布的可能性, 所以定位精度较高, 与 LMAT 接近, 但是由于锚节点在移动过程中也会存在非正三角形分布的情况, VFMS 策略与 LMAT 策略相比, 有着接近的定位精度, 但是有较短的锚节点移动路径长度。

下面进一步对比 VFMS 和 VFA 策略中测距误差与定位误差的关系, 如图 18 所示。设锚节点占所有节点比例的 10%, 节点测距误差变化范围为 0~30%, 比较 VFMS 和 VFA 这 2 种算法的定位精度。从图 18 中可以看出, 2 种算法在测距误差增大时, 定位误差都出现了较大的增长, 但 VFA 算法的定位误差增加幅度比 VFMS 大, 这是由于 VFA 算法中, 虚拟力的计算主要依赖节点间的测距, 所以当测距误差增大时, 它的定位误差就会快速增加。而 VFMS 算法通过引入密集度权重作为加权因子对虚拟力模型进行改进, 同时考虑测距误差 ε 的大小, 结合三边测量法分析出锚节点的最优分布情况, 利用未知节点收到的虚拟信标节点数量与其到锚节点的距离计算未知节点到锚节点的虚拟力, 根据所受虚拟力的大小进行方向选择并进行移动, 在一定程度上减小了测距误差对定位精度的影响。因此, VFMS 算法比 VFA 算法更加适用于测距精度不高的无线传感器网络。

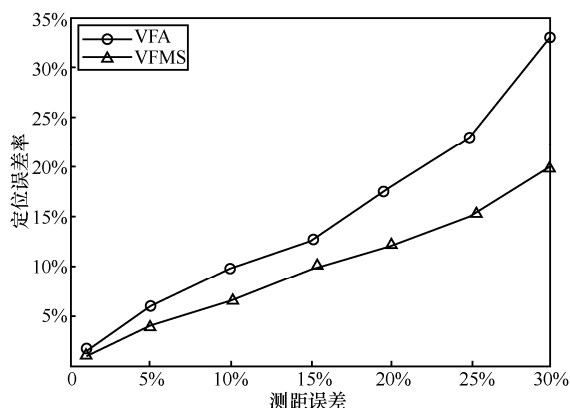


图 18 测距误差与定位误差的关系

综上仿真和分析, 该定位算法在定位覆盖率、定位误差率、定位精度和锚节点移动路径长度等方面具有较好的性能, 充分体现了该算法的有效性。

6 结束语

本文针对移动锚节点所受未知邻居节点的虚拟力不同, 可能出现移动锚节点失去牵引不再移动、局部振荡循环移动、不能有效避免遍历网络空洞区域情况时引起的移动路径过长、定位精度低等问题, 提出一种基于改进虚拟力模型的无线传感器网络锚节点移动策略。将未知节点的邻居节点数量及到其他邻居节点的距离作为自身的密集权重属性, 利用未知节点的密集度作为权值来改进传统的虚拟力模型。同时考虑测距误差大小, 结合三边测量法分析出锚节点的最优分布情况, 根据所受虚拟力的大小进行方向选择并进行移动, 降低了 3 个锚节点共线的可能性, 提高了 3 个锚节点呈正三角形分布的概率, 成功缩短了锚节点的移动路径, 降低了虚拟信标的数量, 同时还能够有效避免锚节点进入网络空洞区域, 有着较高的定位精度。仿真实验表明, 该策略可以在多种网络拓扑下有着较高的定位覆盖率与定位精度, 具有较强的实用性与网络自适应性。

参考文献:

- [1] KOUTSONIKOLAS D, DAS S M, HU Y C. Path planning of mobile landmarks for localization in wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2007, 30(13):86-86.
- [2] CARLI M, PANZIERI S, PASCUCCHI F. A joint routing and localization algorithm for emergency scenario[J]. Ad Hoc Networks, 2014, 13: 19-33.
- [3] AHMAD EI A, SLIM Z, SOFIENE A, et al. Low-cost localization for multi-hop heterogeneous wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2015, 13(7): 1199-1212.
- [4] XIAO F, SHA C H, CHEN L, et al. Noise-tolerant localization from incomplete range measurements for wireless sensor networks[C]//International Conference of the IEEE Computer Communication (IN-FOCOM). Hong Kong, China, 2015: 2794-2802.
- [5] WANG X H, QIU J, FAN J, et al. MDS-based localization scheme for large-scale WSNs within sparse anchor nodes[C]//International Conference on Communications (ICC). London, UK, 2015: 6609-6614.
- [6] GIORGIO Q, RICCARDO M, GIANLUIGI P, et al. Sensing, compression and recovery for WSNs: sparse signal modeling and monitoring framework[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(10): 3447-3461.
- [7] BAHI J, MAKHOUL A, MOSTEFAOUI A. A mobile beacon based approach for sensor networks localization[C]//The 3rd IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. 2011:44-51.
- [8] KOUTSONILAS D, DAS S M, HU Y. Path planning of mobile landmarks for localization in wireless sensor networks[J]. Computer Communication, 2010, 30(13): 2577-2592.

- [9] LI N, BECERIK-GERBER B, KRISHNAMACHARI B, et al. A BIM centered indoor localization algorithm to support building fire emergency response operations[J]. Automation in Construction, 2014, 42: 78-89.
- [10] OU C H, HE W L. Path planning algorithm for mobile anchor-based localization in wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(2):466-475.
- [11] QI R B, LI S J, MA T Y. Iteration-based localization algorithm for wireless sensor network in three-dimensional space[J]. Chinese Journal of Sensors & Actuators, 2012, 25(5): 644-650.
- [12] REZAZADEH J, MORADI M, ISMAIL A S, et al. Superior path planning mechanism for mobile beacon-assisted localization in wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(9): 3052-3064.
- [13] SEO K H, SUH J H. Path planning of mobile robot in partitioned wireless sensor networks[C]// International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence. 2012:619-622.
- [14] HOWARD A, SIDDIQI S, SUKHATME A G S. An experimental study of localization using wireless ethernet[C]// International Conference on Field & Service Robotics. 2003:145-153.
- [15] LIN Z L, FENG Y J, LI Y U. Coverage strategy of virtual material force-directed particle swarm optimization in wireless sensor networks[J]. Computer Engineering, 2010, 36(20):116-118.
- [16] 金仁成, 韦宁, 徐浩, 等. 基于虚拟力的无线传感器网络分簇部署策略[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(5):640-644.
JIN R C, WEI N, XU H, et al. Clustering dynamic deployment strategy based on virtual force in wireless sensor networks[J]. Journal of Northeastern University, 2014, 35(5):640-644.
- [17] 李婧, 李艳萍, 王华奎, 等. 基于加权虚拟力的无线传感器网络定位算法[J]. 太原理工大学学报, 2014, 45(3): 334-338.
LI J, LI Y P, WANG H K, et al. Research on weighted virtual force localization algorithm for wireless sensor network[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2014, 45(3): 334-338.
- [18] 曹楚裙, 单志龙. 一种虚拟力导向的移动节点定位算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(5): 934-938.
CAO C Q, SHAN Z L. Research on virtual force-oriented mobile node positioning algorithm[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2015, 36(5): 934-938.

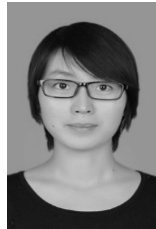
作者简介:



魏连锁(1975-), 男, 黑龙江讷河人, 哈尔滨工程大学博士生, 齐齐哈尔大学副教授, 主要研究方向为无线传感器网络定位技术、数据融合、路由算法。



蔡绍滨(1973-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机网络安全、路由、定位和数据可靠传输等。



潘实(1989-), 女, 黑龙江大庆人, 哈尔滨工程大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络定位技术。