

基于分子力模型的无线传感器网络定位算法

杨江峰,王万升,刘明

(云南民族大学 电气信息工程学院,云南 昆明 650500)

摘要: 无线传感器网络中利用节点发送与接收无线信号,确定物体的位置被称为无线传感器网络节点定位,它是无线传感器网络的一个重要研究领域.基于测距的无线传感器网络定位算法,其关键步骤是通过接收信号的强弱来估计信标节点与未知节点的距离.提出了一种基于分子力模型的 WSN 定位算法,本算法也是基于测距思想,其中,引入排斥力和吸引力的概念,并假设未知节点处于平衡状态,这两种力此时合力为零.算法求解使用迭代算法.论文实验证明,所提算法的时间复杂度和空间复杂度较小,且具备较好的定位精度.

关键词: 分子力模型;无线传感器网络;WSN 定位算法

中图分类号: TP 391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-8513(2024)06-0731-05

物联网作为新一代信息技术的核心构成,深度融合了多元化的信息传感设备.这一庞大体系与互联网的深度融合,构筑了一个无所不在、信息互通的巨大网络生态.在这一错综复杂的网络架构中,位置信息作为传感器网络数据采集的核心基石之一,占据着举足轻重的地位,它不仅是支撑众多应用场景运作的坚固支柱,更是其高效运转不可或缺的前提.缺乏高精度的位置信息,传感器网络的效能将遭受严重削弱,甚至在某些关键情境下,其存在价值可能变得微乎其微,这深刻彰显了物联网时代背景下,位置信息所承载的无可替代的重要性与必要性.

作为物联网的重要组成部分,无线传感器网络(WSN)是由部署在监测区域内的大量廉价微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳自组织网络.无线传感器网络的很多应用场合必须知道节点的位置,因此节点定位技术是 WSN 的关键技术和研究热点.然而,在所有节点上都配备 GPS 等定位设施成本很高.因此,一般只在部分节点通过 GPS 定位设备获得自身的精确位置,这些节点称为信标节点(beacon node);而其它未知节点(unknown node)则通过网络连接信息和节点内部相互测距、通过几何计算来估计其位置坐标^[1].

无线传感器网络作为物联网架构中不可或缺的一环,由密布于监测区域的大量低成本微型传感器节点构成,这些节点通过无线通信技术相互连接,自组织形成一个灵活多变的多跳网络体系.鉴于 WSN 在众多应用场景中均需明确节点位置信息,节点定位技术便成为了该领域的核心技术与研究焦点.然而,在全部节点上安装如 GPS 等高精度定位设备将带来高昂的成本负担,实际应用中往往采取折衷策略:仅在部分关键节点(即信标节点)上配置 GPS 定位装置以获取精确坐标,而其余未配备直接定位能力的节点(未知节点)则利用网络连接信息、节点间的相互测距数据,并通过几何算法来估算其位置坐标,从而实现了成本效益与定位精度的有效平衡^[1].

通常,WSN 的定位算法依据是否依赖节点间的距离或角度测量,被划分为两大类:基于测距的定位算法与测距无关的定位算法.基于测距的定位算法,通过精确测量节点间的距离或角度信息来实现定位,其典型代表包括:利用信号传播时间计算的到达时间(TOA,time-of-arrival)定位算法^[2,15-16]、基于信号到达时间差的 TDOA(time-difference-of-arrival)定位算法^[3]、依据信号到达角度的 AOA(angle-of-arrival)定位算

收稿日期:2022-12-26.

基金项目:国家自然科学基金(52061042).

作者简介:杨江峰(1975-),男,博士研究生,讲师.主要从事机器学习、人工智能、数字图像处理、同步定位与建模 SLAM 等研究.

法^[4,13-14],以及基于接收信号强度指示(RSSI, received signal strength indicator)的定位算法^[5-6].这些算法通常能提供较高的定位精度.

相比之下,测距无关的定位算法则不依赖于具体的距离或角度信息,而是利用网络的连通性、跳数等间接信息来估算节点位置.此类算法的典型实例有质心法^[8]、DV-HOP(distance vector hop)定位算法^[9,17]、Amorphous定位算法^[10],以及其他多种创新性的定位策略^[11-12].尽管测距无关算法在硬件要求上更为宽松,但其定位精度往往略逊于基于测距的方法.因此,在选择定位算法时,需根据具体应用场景的需求,在定位精度与硬件成本之间做出权衡.

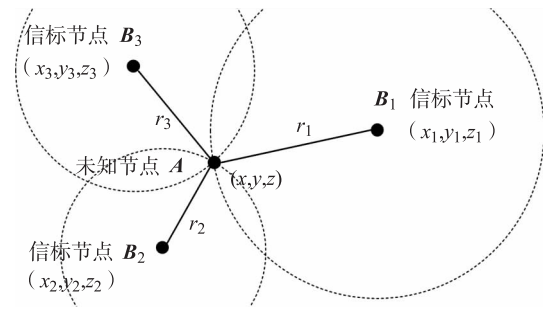


图1 基于测距的WSN定位示意图

1 RSSI定位算法

RSSI(received signal strength indicator)技术,作为WSN(wireless sensor network,无线传感器网络)定位算法中基于测距算法的核心组成部分,通过精确测量接收到的信号强度来估算信标节点与未知节点之间的距离,从而在实现节点定位时发挥着至关重要的作用.RSSI一般通过(公式1)将接收到的信号强度转化为未知节点与信标节点的距离:

$$r_i = 10^{(|RSSI| - S) / (10\rho)} \text{ (m)}. \quad (1)$$

其中, r_i 表示信标节点 B_i 与未知节点 A 的距离, $RSSI$ 表示接收信号强度, S 表示发射端和接收端相隔1米时的信号强度, ρ 表示环境衰减因子.

假设信标节点 B_i 的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, 2, \dots, N$, r_i 是 B_i 与未知信标 A 的距离,当前坐标为 (c_x, c_y, c_z) ,那么未知节点的定位问题可以转化为无约束的最小平方误差问题,其目标函数如下:

$$\min_{(c_x, c_y, c_z)} \sum_{i=1}^N (\sqrt{(x_i - c_x)^2 + (y_i - c_y)^2 + (z_i - c_z)^2} - r_i)^2. \quad (2)$$

上式中,随着平方误差逐渐减小, (c_x, c_y, c_z) 会逼近未知信标的真实位置.由于该优化问题模型是一个凸模型,通常采用梯度下降算法求解^[7].

2 基于分子力模型的WSN定位算法

2.1 分子力介绍

分子力又称分子间作用力或范德华力,是描述分子之间的相互作用.在分子间距较大的情况下,分子力主要表现为一种吸引力,其来源是一个分子被邻近分子时间动态变化的电偶极矩所诱导极化,进而引发的相互牵引效应.而当分子彼此趋近至极近距离时,力量性质发生逆转,排斥力占据主导地位,这源自于各分子外层电子云相互渗透重叠,由此产生的空间占位竞争与电荷排斥现象.

基于测距的WSN定位算法,其关键步骤是通过接收信号的强弱来估计信标节点与未知节点的距离.受自然界分子力概念的启发,本文提出一种基于分子力模型的WSN定位算法,该算法引入排斥力和吸引力的概念,以模拟自然界分子力的作用,并假设未知节点处于平衡状态,这两种力此时合力为零.所提算法只需要简单对比当前距离(迭代位置到信标节点的距离)与目标距离(未知节点到信标节点的距离),生成推力分量或拉力分量,进而求和获得向量迭代的方向,然后利用迭代算法和最小平方误差准则,最终逼近目标解(图2所示).

2.2 所提算法描述

提算法中,排斥力和吸引力是推动模型迭代更新的动力,通过比较目标距离 r_i (未知节点与信标节点的距离)与当前距离 r'_i (迭代位置到信标节点的距离)生成这两种力,然后将多个力分量求代数和,确定每次迭代更新的方向 P ,经过多轮迭代更新,最终获得未知节点的位置,算法基本框架如图3所示.

具体思路如下:如果当前距离 r'_i 大于目标距离 r_i ,则产生一个引力向量 P_i ,将当前迭代位置拉向未知节点(公式6);如果当前迭代距离 r'_i 小于目标距离 r_i ,则产生一个斥力向量 P_i ,将当前迭代位置推离未知节点(公式7).比例因子 β_i 的作用:倘若 r'_i 与 r_i 相差较大,相应 β_i 也会较大,生成的引力向量或斥力向量 P_i 也会

较大;如果 r'_i 与 r_i 较为接近, β_i 则接近于 0, 生成的引力向量或斥力向量 P_i 基本不起作用. 所提算法的基本结构如图 3 所示.

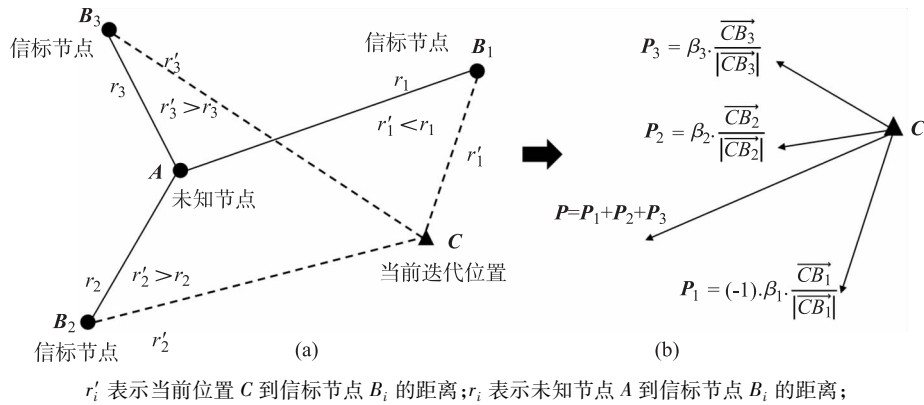


图 2 基于分子力模型的 WSN 定位算法示意图

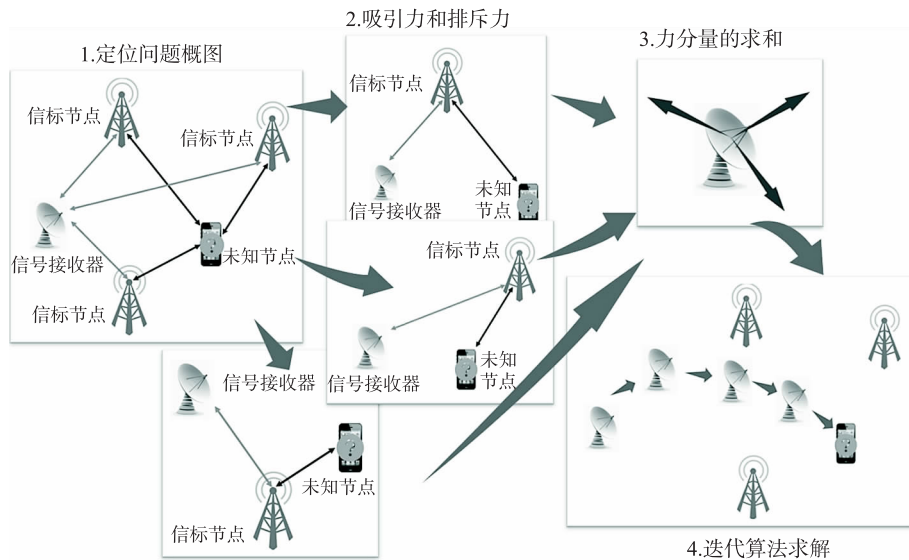


图 3 算法结构示意图

2.3 基本公式

算法利用已知信标节点的位置 $B_i = (x_i, y_i, z_i)$ 和目标距离 r_i (利用 RSSI 技术可以获取), 估计未知节点的坐标 (x, y, z) . 相关参数定义如下: 第 k 次迭代位置 $C_k = (c_1^k, c_2^k, c_3^k)$, 当前距离 r'_i , 比例因子 β_i , 以及迭代更新方向 P , 相关公式如下:

$$\overrightarrow{C_k B_i} = B_i - C_k = (x_i - c_1^k, y_i - c_2^k, z_i - c_3^k). \quad (3)$$

$$r'_i = \sqrt{(x_i - c_1^k)^2 + (y_i - c_2^k)^2 + (z_i - c_3^k)^2}, i = 1, \dots, N. \quad (4)$$

$$\begin{cases} r_i < r'_i \Rightarrow P_i = \beta_i \cdot \frac{\overrightarrow{C_k B_i}}{|\overrightarrow{C_k B_i}|}, \beta_i = \frac{r'_i - r_i}{r_i}; \\ r_i \geq r'_i \Rightarrow P_i = \beta_i \cdot \frac{\overrightarrow{C_k B_i}}{|\overrightarrow{C_k B_i}|} (-1), \beta_i = \frac{r'_i - r_i}{r_i}. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} r_i < r'_i \Rightarrow P_i = \beta_i \cdot \frac{\overrightarrow{C_k B_i}}{|\overrightarrow{C_k B_i}|}, \beta_i = \frac{r'_i - r_i}{r_i}; \\ r_i \geq r'_i \Rightarrow P_i = \beta_i \cdot \frac{\overrightarrow{C_k B_i}}{|\overrightarrow{C_k B_i}|} (-1), \beta_i = \frac{r'_i - r_i}{r_i}. \end{cases} \quad (6)$$

$$P = \sum_{i=1}^N P_i = P_1 + P_2 + \dots + P_N. \quad (7)$$

$$\min_{(x,y,z)} \sum_{i=1}^N (r_i - r'_i)^2 = \min_{(x,y,z)} (r_1 - r'_1)^2 + \dots + (r_N - r'_N)^2. \quad (8)$$

2.4 算法伪代码

下面是所提 WSN 定位算法的一般步骤:

输入参数:迭代初始位置 $C_0 = (c_1^0, c_2^0, c_3^0)$, 目标距离 $r_i, i = 1, \dots, N$, 信标节点坐标 $B_i = (x_i, y_i, z_i), i = 1, \dots, N$, 迭代步长 α , 最大迭代次数 k_{max} , 算法收敛精度 ε .

输出参数:未知节点位置估计量 C_{esti} .

1) 初始化距离平方误差 $\varepsilon_0 > 0$, 令 $k = 1$.

2) While: 如果距离平方误差 $\sum_{i=1}^N (r_i - r'_i)^2 > \varepsilon$, 或者迭代次数 $k < k_{max}$, 继续步骤 3 到步骤 8 的计算, 否则退出循环.

3) 计算迭代更新分量 P_i , 比例因子 $\beta_i, i = 1, 2, \dots, N$.

4) 计算迭代更新向量 $P = (P_x, P_y, P_z)$.

5) 更新当前位置 $C_{k+1} = (c_1^{k+1}, c_2^{k+1}, c_3^{k+1}), c_1^{k+1} = c_1^k + \alpha P_x \cdot \lambda_x, c_2^{k+1} = c_2^k + \alpha P_y \cdot \lambda_y, c_3^{k+1} = c_3^k + \alpha P_z \cdot \lambda_z$, 其中, 随机方向变量 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 服从均匀分布 $U(0, 1)$.

6) 更新当前距离 $r'_i, i = 1, 2, \dots, N$.

7) 更新距离平方误差 $\varepsilon_0 = \sum_{i=1}^N (r_i - r'_i)^2$.

8) $k = k + 1$, 转步骤 2.

9) End.

10) $C_{esti} = (c_1^{k+1}, c_2^{k+1}, c_3^{k+1})$.

步骤 5 引入了随机方向变量 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$, 以解决距离平方误差较小时, 目标函数收敛速度过慢的问题.

3 模型验证与分析

本质上, 基于测距的 WSN 定位算法在两维与三维情况是一样的, 所以选择在两维验证所提模型. 具体讲, 为测试模型的收敛速度和定位精度, 使用不同的信标节点数目: 3 个、4 个、5 个和 6 个信标节点; 算法迭代步长设置分别为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 (图 4 所示).

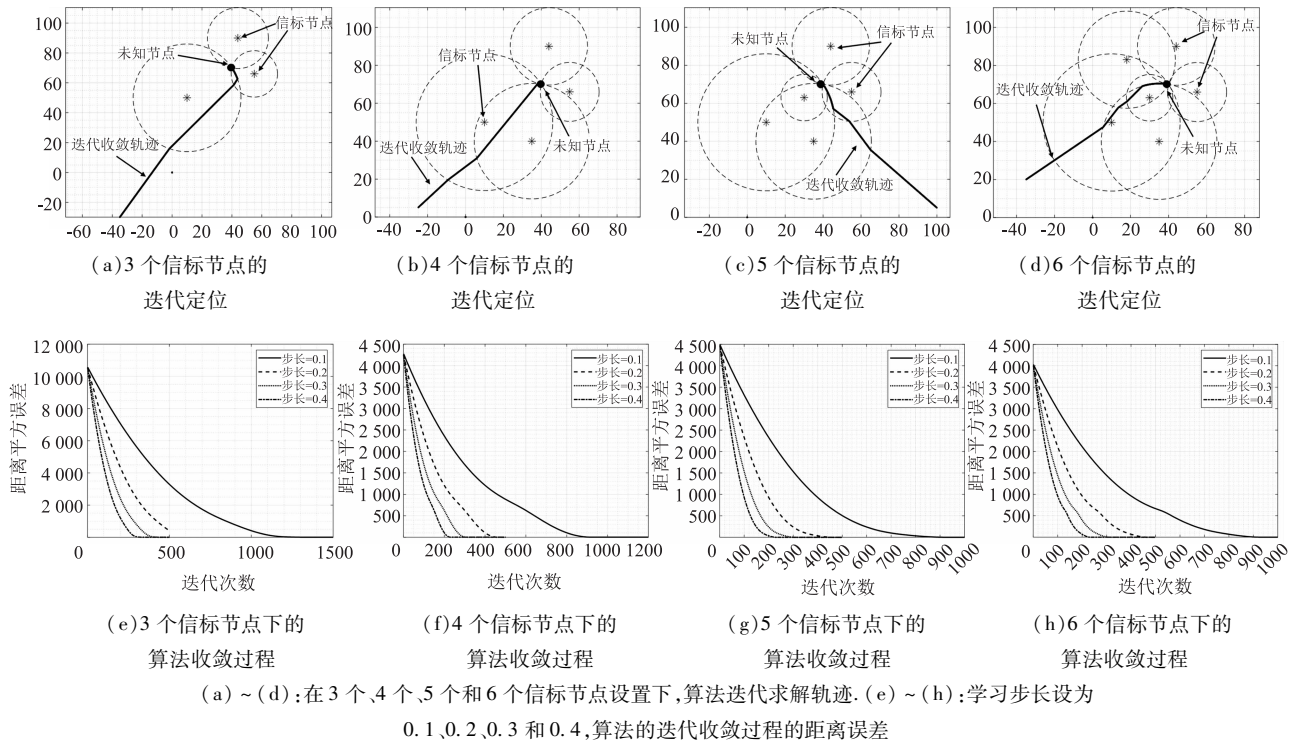


图 4 所提 WSN 定位算法性能测试

分析图4可以看出:只要迭代次数足够,所提算法能够较为准确地定位未知节点位置。

本文中最多1000次迭代,定位算法即可达到稳定收敛状态。此外,随着信标节点的增多,定位算法收敛所需要的迭代次数呈下降趋势,这个现象可以解释为:较多的信标节点能提供更加丰富的定位信息,使得定位算法的收敛过程较快。另外,迭代步长对模型收敛速度和定位精度也有影响。实验中,步长0.4收敛速度最快,步长0.1收敛速度最慢,但步长0.4的定位精度低于步长0.1的定位精度,这点已有相关理论做出解释^[7]。所以,迭代步长需要在同时考虑算法收敛速度和定位精度。

4 结语

提出一种基于分子力模型的WSN定位算法,其核心是利用目标距离与当前迭代距离的关系,生成吸引力和排斥力,用于模仿自然界分子力的作用,然后计算迭代更新方向,经过多次迭代更新,最终能较为准确地逼近未知节点位置。

参考文献:

- [1] 孙利民,张书钦. 无线传感器网络理论及应用[M]. 第1版,北京:清华大学出版社,2018.
- [2] CHAN Y T, TSUI W Y, SO H C. Time-of-arrival based localization under NLOS conditions[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(1): 17-24.
- [3] GUSTAFSSON F, GUNNARSSON F. Positioning using time-difference of arrival measurements[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Proceedings. 2003, 6: VI-553.
- [4] PENG R, SICHITIU M L. Angle of arrival localization for wireless sensor networks[C]//2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. IEEE, 2006, 1: 374-382.
- [5] BARSOCCHI P, LENZI S, CHESSA S. A novel approach to indoor RSSI localization by automatic calibration of the wireless propagation model[C]//IEEE 69th Vehicular Technology Conference. IEEE, 2009: 1-5.
- [6] YANG Z, ZHOU Z, LIU Y. From RSSI to CSI: Indoor localization via channel response[J]. ACM Computing Surveys, 2013, 46(2): 1-32.
- [7] 张光澄,王文娟. 非线性最优化计算方法[M]. 第1版. 北京:高等教育出版社,2005.
- [8] WANG J, URRIZA P, HAN Y. Weighted centroid localization algorithm: theoretical analysis and distributed implementation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(10): 3403-3413.
- [9] CHEN Y, LI X, DING Y. An improved DV-Hop localization algorithm for wireless sensor networks[C]//IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2018: 1831-1836.
- [10] SAFA H. A novel localization algorithm for large scale wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2014, 45: 32-46.
- [11] JING F, QIONG W, JUNFENG H. Optimal deployment of wireless mesh sensor networks based on Delaunay triangulations[C]//IEEE International Conference on Information, Networking and Automation, 2010, 1: VI-370-VI-374.
- [12] FAN J, YIN S, WU Q. Study on refined deployment of wireless mesh sensor network[C]//IEEE 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing, 2010: 1-5.
- [13] SUN W J, LU C W. AoA-based positioning techniques in WSNs: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19: 128-154.
- [14] WANG Y, ZHU H P, LIU X R, et al. Efficient AoA-based localization method for WSNs using antenna arrays[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(9): 435-467.
- [15] LIU J, JIANG C, LIU Y. ToA-based real-time positioning in wireless sensor networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 15(6): 77-84.
- [16] ZHU W, WU J, CHEN H. Improved ToA-based no-de localization for WSN[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 2492-2500.
- [17] YANG C, LIU X. Adaptive DV-Hop localization algorithm in wireless sensor networks[J]. IEEE Access, 2018(6): 35343-35350.

(下转第752页)