

WSN 移动信标辅助定位方法综述

崔焕庆^{1,2}, 王英龙², 吕家亮^{1,2}

(1. 山东科技大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266510; 2. 山东省计算中心山东省计算机网络重点实验室, 济南 250014)

摘 要: 根据无线传感器网络移动信标辅助定位方法的不同特点, 将其分为基于测距的和无需测距的方法、集中式和分布式方法、单一功率和多功率的定位方法、单一信标和多信标辅助的定位方法、配备定向和全向天线的定位方法、确定性和概率性定位方法进行分析。介绍静态和动态路径规划方法的典型算法, 指出其存在的不足。分析结果表明, 该类方法在保证较高定位精度的同时, 降低 WSN 能耗。

关键词: 无线传感器网络; 轨迹; 移动信标; 路径规划

Survey on Mobile Beacon Assisted Localization Methods for WSN

CUI Huan-qing^{1,2}, WANG Ying-long², LV Jia-liang^{1,2}

(1. College of Information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Computer Network, Shandong Computer Science Center, Jinan 250014, China)

【Abstract】 A survey on mobile beacon assisted localization methods for Wireless Sensor Network(WSN) is presented. According to the different characteristics of the method, it is classified to the distance and without ranging-based method, centralized and distributed method, single power and more power beacon assisted localization method, omni-directional antenna direction localization method and certainty and probabilistic localization method. It introduces the typical algorithms of static and dynamic path planning method, and points out the deficiency. Analysis results show that this method can guarantee the localization accuracy and WSN energy consumption.

【Key words】 Wireless Sensor Network(WSN); track; mobile beacon; path planning

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.02.036

1 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点, 通过无线电通信形成的一个多跳的自组织网络系统, 其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域里被监测对象的信息, 并发送给观察者。用于获取节点绝对或相对位置的定位技术是无线传感网的关键技术之一, 可分为基于信标(已知自身位置的节点)和无信标的定位方法, 前者的定位精度高, 但信标比未知节点(需被定位的节点)的成本要高很多。因此, 许多学者提出移动信标辅助的定位方法。

基于移动信标的定位方法由 3 个阶段组成: (1)信标沿一定的轨迹遍历整个网络部署区域, 并在遍历的同时广播数据包。将每个广播消息的信标位置称为虚拟信标。(2)未知节点接收虚拟信标信息, 并将其存储在一个虚拟信标信息表中。(3)未知节点利用所记录的信息估算自己的位置。基于上述内容, 本文提出移动信标辅助的无线传感器网络定位方法。

2 移动信标辅助定位方法的分类

使用移动信标进行定位的最简单方法是根据定位部分未知节点来判断, 具体是将其视为固定信标, 并辅助其他节点定位^[1]。在此过程中, 转变为信标的未知节点能量消耗很快, 会降低网络性能。因此大多数的移动信标辅助定位方法是利用移动信标产生虚拟信标, 以辅助未知节点定位, 这些方法可分为以下类别:

(1)基于测距的和无需测距的方法。基于测距的方法采用接收信号强度指示(Received Signal Strength Indicator, RSSI)、到达时间差(Time Difference of Arrival, TDoA)、到达时间(Time of Arrival, ToA)等测量移动信标与节点间的距离, 而后

使用三边测量或极大似然估计方法来估算位置^[2-3]。MAL 算法^[4]根据节点之间的距离构建全局刚性图, 实现网络节点唯一定位, 但全局刚性图的判断过程较为复杂。无需测距的方法又分为区域测量和界线测量方法, 前者需确定未知节点所在的区域, 使用交叉区域的质心或加权质心作为未知节点的估计位置^[5-6], 后者需确定未知节点所在的直线, 利用所有直线的交点作为未知节点的坐标^[7-8]。

基于测距方法的定位精度要比无需测距方法高, 如文献[2]给出的方法使用射频信号和超声波实现 TDoA 测距, 其平均定位误差约为 0.83 m, 而同样条件下文献[7]方法平均定位误差大于 5.3 m, 且随着信标信息发送时间间隔增加而增加。但是存在的问题是, 基于测距的方法受定位技术影响较大, RSSI 测距受环境因素影响, 测距误差大; TDoA 和 ToA 测距误差小, 但是需要较精确的时钟, 对硬件要求高。

(2)集中式和分布式方法。在集中式定位方法中, 移动信标负责收集所有信息并计算未知节点位置^[9]。分布式算法则由各个未知节点自主收集虚拟信标信息并计算自身的位置, 大多数移动信标辅助的定位方法采用这种策略。集中式算法由移动信标完成所有计算, 极大增加了移动信标的负担。分

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60802030); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2009GQ002, ZR2010FQ014); 山东科技大学科学研究“春蕾计划”基金资助项目(2010AZZ175)

作者简介: 崔焕庆(1979—), 男, 讲师、博士研究生、CCF 会员、ACM 会员, 主研方向: 无线传感器网络, 高性能计算, Petri 网理论与应用; 王英龙, 研究员、博士、博士生导师; 吕家亮, 助理研究员、博士研究生

收稿日期: 2011-07-28 **E-mail:** smart0193@163.com

布式算法则需要未知节点具有休眠功能，只有在移动信标可以为之提供定位信息时才唤醒，从而降低能耗，延长生存期。

(3)单一功率和多功率信标辅助的定位方法。移动信标大多采用单一输出功率。多输出功率的信标可以按不同级别的功率发送数据包，以此形成大小不同的通信区域，以更精确地定位^[10]。单一功率的信标在移动过程中可以不必停顿，而只需根据预定周期广播数据包即可。而多功率的信标需要周期性地停顿，以实现不同功率广播信号的目的。

(4)单一信标和多信标辅助的定位方法。使用单一信标辅助定位，由于每个未知节点至少要获得 3 个非共线(二维)或 4 个非共面(三维)的虚拟信标才可以实现定位，因此信标必须多次经过一个未知节点，并产生多个虚拟信标。在使用多个移动信标协同定位时，只要这些信标不共线或不共面且经过一个未知节点一次，便可实现定位^[11]。多个信标必须保证其在移动过程中的位置关系，否则难以实现高精度定位。

(5)配备定向和全向天线的移动信标辅助定位方法。当全向天线的传输范围是一个圆形时，定向天线的传输范围是一个扇形。使用定向天线可以实现区域测量，而且由于定向天线的覆盖区域比全向天线小，可以提供更高精确度的定位，当波束宽度为 30°时，使用定向天线的定位精度与基于测距的定位方法非常接近^[12]。也可使用定向天线实现界线测量，即未知节点选择最初进入和最后离开的信标节点构成的边界的交点作为位置估计值^[13]。使用定向天线的信标对移动路径的要求更高，由于其覆盖范围有限，因此必须延长移动路径才可实现全区域的覆盖。

(6)确定性和概率性定位方法。上述方法均为确定性算法，其计算结果是一个带有误差的确定值，受各种因素的影响较大。采用概率性算法可以尽量减小各种因素的影响，提高定位精度。基于测距的概率性算法需要事先对测距技术进行大量试验，获得相应概率分布，在定位过程中，根据该分布函数实现位置估计^[14]。这种方法对传感器节点硬件配置要求高，成本高。非测距的概率性算法包含初始化、预测、更新和重抽样 4 个阶段，未知节点根据是否接收到虚拟信标信息进行抽样和滤波，从而实现定位，这种方法易于分布式实现，且定位精度比极大似然估计法高^[15]，但每次抽样需要足够多的样本，可能需要重复抽样。

3 典型的移动信标辅助定位方法

3.1 ADO 方法

到达离开重叠区域(Arrival and Departure Overlap, ADO)方法^[5]是一个区域测量的分布式定位方法，其利用移动信标形成到达和离开的限制区域，以此缩小未知节点所在的区域，并以该区域的质心作为未知节点的估计位置。ADO 方法原理如图 1 所示，其中，灰色区域表示 ADO。

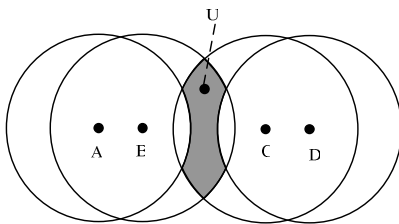


图 1 ADO 方法原理

由图 1 可知，当信标从 A 移动到 B 形成未知节点 U 的到达限制区域时，从 C 到 D 形成 U 的离开限制区域，两者的交集称为 ADO。如果移动信标采用密度较大的直线作为扫描

路径，则可以利用相邻扫描线确定 U 在 ADO 的上半部分还是下半部分。若使用高密度的直线作为扫描路径，该方法可定位所有未知节点，且标准误差在 0.1 m~0.8 m 之间。ADO 方法实现简单，对硬件要求低，但实际环境下的信标信号不会是规则的圆形，某些未知节点可能无法获得必要的信标信息而无法定位。

3.2 PI 算法

PI 算法^[8]是一个基于界线测量的非测距方法。其原理如图 2 所示。

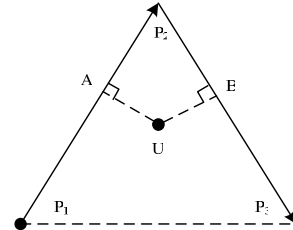


图 2 PI 算法原理

由图 2 可知，移动信标从 P₁经 P₂移动到 P₃，形成一个正三角形，在移动过程中，信标周期性广播位置信息，未知节点 U 记录边 P₁P₂和 P₂P₃上具有最大 RSSI 值的 A 和 B 的位置，则可认为 A 和 B 是 U 在边 P₁P₂和 P₂P₃上的投影点。过 A、B 做各自边的垂线，它们的交点即为 U 的估计位置。实验表明，该测距方法的定位精度高于基于测距的三边法。为获得较为精确的 A、B 点，信标移动速度不能过快，数据包发送频率要高(文献[8]中指定的移动速度为 0.1 m/s，信息发送频率为 1 Hz)。

3.3 虚拟尺方法

虚拟尺方法^[9]将 2 个信标固定在一辆车的两端，在移动过程中，面向同一方向对其发送超声波信号，测量它们到每对未知节点的距离，以此确定未知节点位置。该方法可采用集中式或分布式算法计算未知节点位置。实验表明，在室内且存在障碍物的情况下，若测距误差为 2 cm，该方法的平均定位误差为 0.50 m。由于超声波易于定向发射、方向性好，但其传输距离短，干扰因素多，因此该方法适用于室内定位。

3.4 CC 方法

CC 方法^[10]是一种多功率移动信标辅助的分布式定位方法，移动信标以不同的发射功率发射信标信号，接收到信标信号的未知节点将这些信标信息转化为一组二次不等式约束，然后通过凸优化技术求解这些不等式组，以逼近未知节点位置的最佳估计。信标在 A 点分别以 2 种通信半径为 r 和 R(r<R)的功率发射信号，若未知节点 U 恰好能接收到半径 R 的信号而不能接收到半径 r 的信号，则 r < ||U-A|| ≤ R。最后，根据未知节点 U 的多个约束来求出最佳位置估计的逼近。实验表明，在理想情况下，该方法的定位精度约为通信半径的 11.58%。该方法对未知节点的计算能力要求较高。

3.5 贝叶斯推理方法

基于 RSSI 测距和贝叶斯推理的概率定位方法^[14]首先获得 RSSI 与距离之间的概率分布函数 Pk_{RSSI}，在信标遍历网络部署区域期间，未知节点根据接收到的信标位置利用下式构造一个关于自身位置的约束：

$$C(x, y) = Pk_{RSSI}(d((x, y), (x_B, y_B))) \quad (1)$$

$$\forall (x, y) \in [(x_{min}, x_{max}) \times (y_{min}, y_{max})]$$

其中，(x, y)、(x_B, y_B)是未知节点和虚拟信标的位置；d(a, b)是 a 点和 b 点之间的距离；x_{min}、x_{max}、y_{min}、y_{max}是部署区域的边

界坐标。而后,未知节点基于原有位置估计和新构造的约束使用贝叶斯推理计算新的位置估计值,在获得最终估计位置 P 后,利用下式计算最佳估计位置:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left(\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} x P(x, y) dx dy, \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} y P(x, y) dx dy \right) \quad (2)$$

在 $P_{k_{RSSI}}$ 较准确的情况下,贝叶斯推理方法可以获得较高的定位精度。但是为获得 $P_{k_{RSSI}}$,需要在定位前进行大量实验,而且多重积分运算对未知节点的硬件要求很高。

4 移动信标路径规划方法

移动信标路径规划问题即在给定网络部署区域范围的情况下,设计最佳的信标移动轨迹,以达到最佳定位性能。一个最佳轨迹应满足:

(1)移动轨迹应使信标尽可能多地经过待定位的未知节点,以提高覆盖率^[14]。

(2)移动轨迹应保证每个未知节点能够得到足够多的虚拟信标信息^[14]。

(3)在保证定位精度的前提下,轨迹应尽可能短。

静态和动态2种路径规划方法如下:

(1)静态路径规划方法

静态路径规划方法事先确定信标的移动路径,并在定位过程中要求信标沿着指定路径移动。将不考虑网络中未知节点部署情况的方法称为独立于节点分布方法。部分学者使用随机移动轨迹如RWP(Random Waypoint)、高斯马尔科夫移动模型等^[6-7],但这种路径无法保证覆盖所有的未知节点。

对于非随机轨迹,常用有螺旋线^[11]、折线^[12]、Scan^[16]、Double-Scan^[16]和Hilbert^[16]轨迹,实验表明其可覆盖整个网络部署区域的确定性轨迹比随机移动轨迹效果要好^[16]。折线、Scan和Double-Scan容易产生共线问题,使部分接收到虚拟信标信息的未知节点也无法估算自己的位置,而高分辨率的Hilbert曲线则没有这一缺点。Circles^[17]和S-Curves^[17]是为减少共线问题而提出的移动轨迹。为减少虚拟信标数量及缩短移动路径,可利用等距三重优化覆盖方法获取虚拟信标的最佳位置,进而转换为旅行售货商问题获取最优信标移动路径^[18]。有些定位方法需要特殊的移动轨迹,如PI算法需要信标的移动轨迹为图2所示的路径。

根据网络中传感器节点的分布情况,可以设计尽可能短的信标移动轨迹。若将网络节点及其邻接关系看作一个无向图,在获取图的生成树后,利用宽度优先和回溯式贪婪算法遍历生成树可以获得移动信标的路径^[19]。还可首先将网络节点进行分簇,各个簇在独立定位后获得相对坐标位置,移动信标只需定位各个簇头节点^[20]。

(2)动态路径规划方法

静态路径规划方法不能充分利用定位过程中的实时信息,对不规则拓扑和未知的部署区域等不太适用,而动态路径规划方法在定位过程中确定信标的移动方向和移动步长,从而更具灵活性、普适性。使用配有多个定向天线的移动信标收集各个区域的未知节点信息,可确定下一步移动的方向和步长^[21]。MBAL算法^[22]初始时由移动信标产生一个三角形区域,并定位该区域内的所有未知节点,而后这些未知节点广播其位置信息,即从内向外逐渐定位其他未知节点,当某些未知节点不能被定位时,将信标移动到这些节点附近,以定位少量未知节点,再利用这些未知节点定位其他节点。

移动信标辅助定位方法通过产生一定数量虚拟信标,代替基于信标定位机制中的固定信标,此种方法既保证定位的

精度,又能降低网络成本。近年来,国内外学者提出许多移动信标辅助的定位方法,本文对这些定位方法和移动信标的路径规划方法进行综述。得出移动信标辅助定位方法还可以在以下方面进行研究:

(1)在三维空间和非理想环境下定位及路径规划的方法,在实际应用中,由于会受到地形限制或环境限制,传感器网络不可能置于绝对的二维平面,而是水下、坡地、空间等三维场景,因此仅在平面上对传感器进行二维定位是远远不够的^[23]。此外,在实际部署环境中,会存在大量障碍物或者部署区域不规则的情况,这将对目前的定位和路径规划方法提出特殊要求。

(2)移动信标辅助的安全定位方法。节点的定位过程极易受到各种攻击,在资源受限的传感器网络中,安全地获取节点位置信息是一个具有挑战性的问题^[24],目前尚没有移动信标辅助的安全定位方法。

5 结束语

本文综述移动信标辅助的无线传感器网络定位方法。该类方法使用一个或多个移动信标,在网络部署区域内移动,同时广播数据包,以产生若干虚拟信标,通过未知节点接收虚拟信标信息来实现定位。因此,该类方法既需要确定未知节点估算位置的算法,也需要确定信标的移动轨迹。分析结果表明,该类方法的定位精度比使用固定信标时要高,而且能耗更小。随着无线传感器网络应用的拓展,今后将着重研究在三维空间下的移动信标辅助定位方法。

参考文献

- [1] 姚忠孝, 俞立, 董齐芬. 基于移动信标的DV-Hop无线传感器网络定位算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(10): 1504-1509.
- [2] Zhang Baoli, Yu Fengqi. An Energy Efficient Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks Using a Mobile Anchor Node[C]//Proc. of IEEE International Conference on Information and Automation. Zhangjiajie, China: IEEE Press, 2008.
- [3] 钟森, 周小佳, 闫斌. 基于移动锚节点的无线传感器网络三边质心定位[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(7): 1438-1440.
- [4] Priyantha N B, Balakrishnan H, Demaine E D, et al. Mobile-assisted Localization in Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of IEEE INFOCOM'05. Miami, USA: IEEE Press, 2005.
- [5] Xiao Bin, Chen Hekang, Zhou Shuigeng. Distributed Localization Using a Moving Beacon in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(5): 587-600.
- [6] Lee S, Kim E, Kim C, et al. Localization with a Mobile Beacon Based on Geometric Constraints in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12): 5801-5905.
- [7] Ssu K F, Ou C H, Jiau H C. Localization with Mobile Anchor Points in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 1187-1197.
- [8] Guo Zhongwen, Guo Ying, Hong Feng, et al. Perpendicular Intersection: Locating Wireless Sensors with Mobile Beacon[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(7): 3501-3509.
- [9] Ding Yong, Wang Chen, Xiao Li. Using Mobile Beacons to Locate Sensors in Obstructed Environments[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010, 70(6): 644-656.

(下转第118页)