

无线传感器网络节点定位技术^①

秦小虎, 辛云宏, 夏海峰, 吴俊林

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 西安 710062)

摘要: 对无线传感器网络定位技术进行了深入的探讨, 从 WSN 节点的定位机制、定位算法的分类、已有的定位算法及算法性能的评价标准等方面进行分析, 并对比了质心定位算法、DV-Hop 算法、凸规划定位算法、APIT 算法等几种经典的方法。结果表明: 各种算法在不同的应用环境下所表现的性能差别较大, 没有哪种算法是最优的, 应根据最感兴趣的性能指标选择合适的算法。最后提出了无线传感器网络节点定位技术需要解决的问题和研究方向。

关键词: 无线传感器网络; 节点定位; 定位机制; 评价标准; 定位算法

Wireless Sensor Networks Node Location Technology

QIN Xiao-Hu, XIN Yun-Hong, XIA Hai-Feng, WU Jun-Lin

(College of Physics & Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: This paper presents a thorough discussion about the location technology of the sensor network that was analyzed in some aspects such as the basic principle of the localization, classification of location algorithms, the existing location algorithms, and performance evaluation criteria of the algorithms in detail. We have compared the performance of some classic algorithms, such as centroid localization algorithm, DV-Hop algorithm, convex programming localization algorithm and APIT algorithm etc. Analysis results show that the application of various algorithms in different environments have shown great differences in the performance. None of the algorithms is optimal. We should select the appropriate algorithm based on performance indicators of most interest. At last, this paper proposes the problems to be solved and the research direction of the wireless sensor network node location technology.

Key words: wireless sensor network; node localization; localization mechanism; evaluation standard; localization algorithm

1 引言

无线传感器网络(WSN)是在无线通信、数字电子技术和微机电系统发展的基础上形成的^[1], 其重要支撑技术有: 布局和覆盖、时钟同步、节点定位、网络通信协议等^[2]。节点定位是传感器网络环境监测、目标追踪、空间探测的前提, 是 WSN 最基本的功能之一。定位系统和算法的研究大体经历了两个发展阶段, 第一阶段主要偏重于紧密耦合型和基于基础设施的定位系统, 第二阶段偏重于松散耦合型和无需基础设施的定位技术, 其又可分为两类, 包括距离相关和距离无关定位算法^[3]。最新的研究主要在基于移动锚节点

的定位算法, 定位系统和算法在定位精度、节点密度、覆盖率、能耗等方面各有优势^[4]。

2 定位机制

在 WSN 中传感器节点能量有限、可靠性差、节点规模大且随机分布、无线通信的距离有限, 对定位算法和定位技术要求很高^[5], 定位算法应具备鲁棒性强、能量高效、自组织性等特点。

节点定位一般分为三个步骤: 第一步, 未知节点通过一定的测量手段获得到邻居锚节点的距离或角度, 常用的方法有 RSSI、TOA、TDOA 和 AOA, 或

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(08201021032); 陕西省自然科学基金(2006F47); 2009 年度陕西师范大学优秀科技预研项目(200902006)
收稿时间: 2011-01-23; 收到修改稿时间: 2011-02-26

者根据网络的连通信息估计节点间的距离;第二步,运用某种算法或技术实现位置估计,计算方法有三边测量法、三角测量法和极大似然估计法;第三步,对估计值进行优化^[6]。

2 性能评价指标^[7]

无线传感器网络节点定位算法的性能直接影响其可用性,以下是评价 WSN 定位性能的几项关键指标:

定位精度:这是定位技术首要的评价指标,一般用误差值与节点无线射程的比例表示。

锚节点密度:锚节点通常依赖人工部署或 GPS 实现定位,人工部署方式不仅受到部署环境的限制,还严重制约了网络和应用的可扩展性。锚节点的费用会比普通节点高两个数量级,所以应尽量减少锚节点数量。

覆盖率:覆盖率指可实现定位的未知节点与总的未知节点数之比。传感器网络中总会存在一些不可到达或连通度很低的不良节点,从而降低了节点的定位精度。

容错性和自适应性:容错性指在故障存在的情况下定位系统不失效,仍能正常工作;自适应性指复杂系统对若干不协调因素的包容和整合。定位系统和算法都需要比较理想的无线通信环境和可靠的网络节点设备,但实际应用中,外界环境中存在严重的多径传播、衰减、非视距、通信盲点等问题;网络节点失效问题;节点间点到点的通信距离变化及角度测量误差等问题都会导致定位过程十分困难或不可行,因此定位系统和算法必须具有容错性和自适应性。

功耗:功耗是对无线传感器网络的设计和实现影响最大的因素之一,决定功耗大小的因素有定位所需的计算量、通信开销、存储开销、时间复杂性等指标。

代价:时间代价包括一个系统的安装时间、配置时间、定位所需时间。空间代价包括一个定位系统或算法所需的基础设施和网络节点的数量、硬件尺寸等。资金代价包括实现一种定位系统或算法的基础设施、节点设备的总费用。

3 无线传感器网络定位算法分类^[8,9]

无线传感器网络节点定位算法的分类方法较多,可从不同的角度进行分类,没有统一的标准。

3.1 基于测距(Range-based methods)的定位和无需测距(Range-free methods)的定位

前者需要测量相邻节点间的绝对距离或方位,并利用节点间的实际距离来计算未知节点的位置;后者无需测量节点的绝对距离或方位,利用节点间的估计距离计算节点位置。Range-based 定位算法常用的测距技术有:接收信号强度测距 RSSI,到达时间测距 TOA,时间差测距 TDOA 和到达角测距 AOA。

3.2 绝对定位与相对定位

绝对定位与物理定位类似,定位结果是一个标准的坐标位置,如经纬度。而相对定位通常以网络中部分节点为参考建立整个网络的相对坐标系统。绝对定位可为网络提供唯一的命名空间,受节点移动性影响较小,有更广泛的应用领域。但是在相对定位的基础上也能够实现部分路由协议,尤其是基于地理位置的路由,而且相对定位不需要锚节点,这使相对定位有了更广的应用范围。

3.3 集中式(Centralized Computation)计算与分布式(Distributed Computation)计算

集中式计算是把所需信息传送到某个中心节点,并在那里进行节点定位计算的方法。分布式计算是依赖节点间的信息交换和协调,由节点自行计算的方法。

3.4 紧密耦合(tightly Coupled)与松散耦合(loosely Coupled)

紧密耦合定位指锚节点不仅被仔细地部署在固定的位置,并且通过有线媒介连接到中心控制器;而松散型定位系统的锚节点采用无中心控制器的分布式无线协调方式。

3.5 细粒度与粗粒度

细粒度定位是根据信号强度或时间来度量与锚节点距离的,其中又可分为基于距离和基于方向测量两类;粗粒度定位是根据与锚节点的接近度来度量的。

4 几种典型的无线传感器网络自身定位系统和算法

无线传感器网络节点定位算法很多,不同算法在不同环境下的性能表现各异。由于节点能量有限,存储能力和计算能力有限,所以要求算法是低复杂度的。在实际应用中,虽然 Range-based 定位算法定位精度较高,但其系统复杂,能耗大,不适于低功耗、低成本系统,而 Range-free 算法的定位精度对大多数应用已

经足够,在此主要介绍两种经典定位系统和几种典型的 Range-free 定位算法。

4.1 Cricket 定位系统^[10]

早期的紧密耦合型定位系统无法适用于 Ad-hoc 式网络,需要事先的网络部署或数据生成工作。为了弥补紧密耦合定位系统的不足,MIT 开发了最早的松散耦合定位系统 Cricket,它由散布在建筑物内位置固定的锚节点和需要定位的人或物体携带的未知节点组成。锚节点随机地同时发射无线电波和超声波信号,无线电波信号中包含该锚节点的位置和 ID。未知节点使用 TDOA 技术测量其与锚节点的距离,当它能够获得 3 个以上锚节点距离时就使用三边测量法进行物理定位。然而 Cricket 定位系统是应用在普适计算中的,这需要细粒度、三维的定位和方位信息。普适计算中各节点的定位信息是私有的,只能由信标节点发送这些定位信息,接收器通过被动的监听从基础设施中发射来的信标信息来定位自身。Cricket 定位系统的优点是厘米级精确度。

4.2 RADAR 系统^[11]

RADAR 定位系统是由 MicroSoft 公司开发的基于 IEEE802.11 无线网络技术,属于射频场景信息的室内定位系统,它提供了场景分析和三边测量两种实现方式。RADAR 定位系统分为两个部分:一部分是位置-场景数据库,一部分是匹配定位功能模块。系统的工作过程也相应分为两步,第一步首先离线完成建库的工作,即把节点处于各种位置时的场景参数记录下来,通常是由一个节点在定位范围内漫游,由一些固定的节点记录下接收到的漫游节点信号强度或角度等,再把这些信息和当前漫游节点位置配对记入数据库;第二步则是在线的位程匹配定位,当接收到一个待定位节点发出的信号,立即使用该信号和数据库中已有的场景参数配对,选取场景参数中最接近元组的位置信息作为此节点当前的位置。在三边测量定位方式下,未知节点根据 RSSI 计算与多个基站的距离,然后使用三边测量法定位,系统能够以 50% 的概率获得 4.1 米的精度。系统最少仅需要三个无线网基站就可以实现。虽然场景分析的定位精度很高,但被定位目标必须支持无线网连接,这对于小型或能源受限的设备是不现实的,且该系统易受外界因素影响。

4.3 质心定位算法^[12,13]

此算法是南加州大学 Nirupama Bulusu 和 J.Heide-

mann 等提出的一种 range-free 的粗精度定位法,同时也奠定了 range-free 定位算法的基石。该算法思想是:未知节点以所有在其通信范围内的锚节点构成的多边形的几何质心作为自己的估计位置。锚节点周期性地向邻近节点广播锚节点分组,这个分组包含了节点自身 ID 和位置信息。当未知节点接收到来自不同锚节点的分组数量超过某一个门限值 K 或接收一定时间后,便利用下述质心公式确定自身位置为这些锚节点组成的多边形的质心:

$$(X_0, Y_0) = [(X_1 + X_2 + \dots + X_n) / n, (Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n) / n] \quad (1)$$

其中 $(X_1, Y_1) \dots (X_n, Y_n)$ 为未知节点能够接收到其他分组的锚节点坐标。

该算法最大的优点是完全基于网络的连通性,实现较为简单且计算量较小。但该算法仅提供粗粒度的定位,定位精度不高,且与锚节点的密度、分布有很大关系。后来 N.Bulusu 用著名的密度自适应算法 (HEAP) 来改进了这一算法,通过放置额外的锚节点减少定位误差。

4.4 DV-Hop 算法^[14,15]

美国路特葛斯大学(Rutgers University)的 Dragos Niculescu 等利用距离矢量路由(distance vector routing)和 GPS 定位原理提出了一系列分布式定位算法,合称为 APS(Ad hoc Positioning System,包括 DV-hop, DV-distance, Euclidean, DV-Coordinate, DV-Bearing 和 DV-Radial 等 6 种算法),DV-Hop 算法就是其中之一。

DV-Hop 算法的基本思想是将未知节点到参考节点之间的距离用网络平均每跳距离和两者之间最短路径跳数乘积表示,然后使用三边测量法获得节点位置信息。DV-hop 算法由三个环节组成:

第 1 步,通过采用经典的距离矢量交换协议使得网络中的所有节点都获得距离锚节点的跳数(distance in hops)。每个节点都将所有锚节点的坐标以及距离它们的跳数记录下来,并把该信息与邻居节点交换以更新信息。

第 2 步,对于任意一个锚节点可以利用它们之间的欧几里得距离之和除以它们间的跳数之和来计算该锚节点在网络中的平均每跳距离,并将其作为一个校正值(Correction)广播至网络中。锚节点向网络广播一个信标,信标中包含有此锚节点的位置信息和一个初始值为 1 的表示跳数的参数。此信标在网络中被以泛

洪的方式传播出去，信标每次被转发时跳数都增加 1。接收节点在它收到的关于某一个锚节点的所有信标中保存具有最小跳数值的信标，丢弃具有较大跳数值的同一锚节点的信标。通过这一机制，网络中所有节点(包括其他锚节点)都获得了到每一个锚节点的最小跳数值。

当接收到校正值之后，节点根据跳数计算与锚节点之间的距离，如下式：

平均每跳距离：

$$C_i = \frac{\sum_{j \neq i} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum_{j \neq i} h_{ij}} \quad (2)$$

$$d_i = C_i \times h_{ij} \quad (3)$$

其中 h_{ij} 表示参考节点 i 到参考节点 j 的跳数。

第 3 步，当未知节点求得与三个或更多锚节点的距离时，则利用三边测量法进行定位。

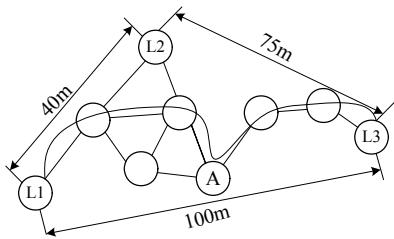


图 1 DV-HOP 算法

如图 1 所示，已知锚节点 L1 与 L2、L3 之间的距离和跳数。计算得到校正值（即平均每跳距离）： $(40+75)/(2+5)=16.42$ 。在上例中，假设 A 从 L2 获得校正值，则它与 3 个锚节点之间的距离分别为 L1: 3×16.42 ，L2: 2×16.42 ，L3: 3×16.42 ，然后使用三边测量法确定节点 A 的位置。

DV-hop 算法在网络平均连通度为 10，锚节点比例为 10% 的各向同性网络中定位精度约为 33%。其缺点是对网络的锚节点密度要求较高。

4.5 凸规划定位算法^[16]

加州大学伯克利分校的 Doherty 等人提出的一种完全基于网络连通性诱导约束的定位算法，将节点间点到点的通信连接视为节点位置的几何约束。例如，如果节点间的通信半径是 15m，则两个相互通信的节

点间的距离就小于等于 15m，这样产生一系列相邻的约束条件就能确定节点可能存在的位置区域。

该算法把整个网络模型化为一个凸集，从而将节点定位问题转化为凸约束优化问题，然后使用半判定规划 (SDP) 或线性规划 (LP) 方法得到一个全局优化的解决方案，确定节点位置。同时也给出了一种计算未知节点有可能存在的矩形区域的方法。

如图 2 所示，根据未知节点与锚节点之间的通信连接和节点无线射程，计算出未知节点可能存在的区域(图中红色部分)，并得到相应矩形区域，然后以该区域的质心作为未知节点的位置。

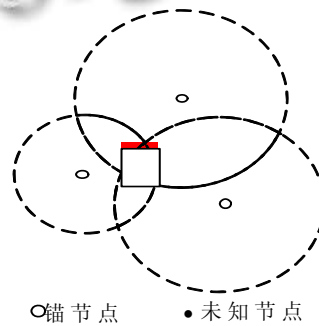


图 2 凸规划定位算法

凸规划是一种集中式定位算法，锚节点比例为 10% 的情况下，定位误差约等于节点的通信半径。锚节点应被部署在网络的边缘，可减少定位误差。

4.6 APIT 算法^[17]

弗吉尼亚大学的 HeT 等人提出的 APIT 算法，其理论基础是 Perfect Point-In-Triangulation Test Theory (PIT)。该算法的主要思想是首先未知节点收集所有邻居锚节点的信息，并测试未知节点是否位于不同的三个锚节点组成的三角形内，重复测试，直到穷尽所有组合或达到所需定位精度。如图 3 计算所有包含该未知节点的三角形的重叠区域，用该区域的质心作为未知节点的坐标。

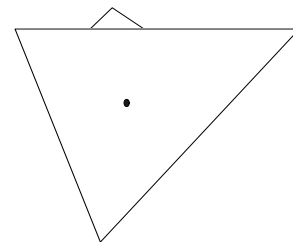


图 3 APIT 算法

此法误差概率相对较小(最差情况下 14%), 平均定位误差小于节点通信半径的 40%, 但该算法要求较高的参考节点密度。

现有定位系统和算法还有很多种, 例如 MDS- MAP、N-hop multilateration primitive、SPA 相对定位算法、Euclidean 定位算法等。

在实际应用过程中, 现有定位系统和算法还存在很多具体问题, 主要表现在:

- 1) 未知节点必须与锚节点直接相邻, 且要求锚节点密度过高;
- 2) 定位精度高度依赖于网络部署条件;
- 3) 节点通信中对距离/角度测量的误差值进行传播和积累, 使定位精度降低;
- 4) 循环求精过程产生了大量的通信和计算开销, 且无法预估循环的次数, 增加了算法的不确定性。

解决上述问题是各类定位算法的基本目标, 对所有应用环境都适用的定位系统是不存在的, 我们应根据性能要求选择最佳的定位算法、测距技术和校正方法。

5 结语

本文对 WSN 节点定位所涉及到的定位机制、性能评价标准、算法的分类和典型定位系统与几种经典的 Range-free 定位算法进行了介绍, 比较了各自的优缺点, 并提出了现有算法存在的问题。传感器网络是面向应用的一类远程自组网测控系统, 在实际应用中, 对算法性能的要求差异很大, 应尽量使设计的方法性价比最优。因此, 设计出适合感知网络自身特点的、节能高效、定位精确、可扩展的节点定位算法, 是无线传感器网络研究的一个重要目标。

参考文献

- 1 孙利民, 李建中, 陈渝, 朱红松. 无线传感器网络. 北京: 清华大学出版社, 2005. 135-155.
- 2 汪炆. 无线传感器网络定位技术研究[博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- 3 Capkun S, Hamdi M, Hubaux JP. GPS-Free positioning in mobile ad-hoc networks. *Cluster Computing*, 2002, 5(2): 157-167.
- 4 Hightower J, Borriello G. Location sensing techniques. Technical Report UW CSE, Seattle: Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, 2001.
- 5 陈娟, 李长庚, 宁新鲜. 基于移动信标的无线传感器网络节点定位. *传感技术学报*, 2009, 22(1): 122-123.
- 6 王福豹, 史龙, 任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法. *软件学报*, 2005, 16(5): 859-865.
- 7 李明忠. 无线传感器网络自定位算法研究[硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- 8 Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. Adaptive beacon placement. In: Young DC, ed. *Proc. of the 21st Int'l Conf. on Distributed Computing Systems*. Mesa: IEEE Computer Society, 2001. 489-498.
- 9 马祖长, 孙怡宁. 无线传感器网络节点的定位算法. *计算机工程*, 2004, 30(7): 13-15.
- 10 付华, 胡冰. 一种无线传感器网络节点定位算法的改进. *传感器与微系统*, 2009, 28(3): 27-29.
- 11 Shang Y, Ruml W, Zhang Y, Fromherz MPJ. Localization from mere connectivity. *Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*. Annapolis: ACM Press, 2003. 201-212.
- 12 尚志军, 曾鹏, 于海斌. 无线传感器网络节点定位问题. *计算机科学*, 2004, 31(10): 35-38.
- 13 Hightower J, Boriello G. Location systems for ubiquitous-computing. *Computer*, 2001, 34(8): 57-66.
- 14 刘艳文, 王福豹, 段渭军. 基于 DV-HOP 定位算法和 RSSI 测距技术的定位系统. *计算机应用*, 2007, 27(3): 516-519.
- 15 邱萌, 徐惠民. 一种无线传感器网络无测距分布式定位算法. *计算机工程*, 2008, 34(9): 121-123.
- 16 章磊, 黄光明. 基于 RSSI 的无线传感器网络节点定位算法. *计算机工程与设计*, 2010, 31(2): 291-293.
- 17 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. *软件学报*, 2003, 14(2): 1148-1157.