

无线传感器网络的定位机制^{*})

王海东 孙利民

(中国科学院软件研究所多媒体和网络研究中心 北京 100080)

摘 要 传感器网络是由大量低廉的微型多功能传感器节点组成的无线网络,能够广泛应用在环境、军事、生态等领域进行事件监测。位置数据是监测事件不可缺少的信息。为了准确地确定事件发生的位置,传感器节点必须首先确定自身的位置,定位机制是无线传感器网络的基本机制。本文在将定位技术分为基于距离定位和距离无关定位两种类型的基础上,详细介绍和分析了近期提出的典型传感器网络定位机制。

关键词 传感器网络,定位,距离相关,距离无关

A Study of Localization Mechanisms in Wireless Sensor Networks

WANG Hai-Dong SUN Li-Min

(Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract A sensor network is composed of a large number of low-cost multifunctional sensor nodes. It can be widely used for event-monitoring in various fields, such as environment, military, biology and so on. The information of location is indispensable for events-monitoring. In order to precisely locate the event, sensor nodes have to locate itself firstly. The mechanism of the localization is the most fundamental mechanism in wireless sensor network. This paper firstly classifies the localization mechanisms into two categories: range-based and range-free mechanism of localization, and then introduces and analyses these typical mechanisms in detail.

Keywords Sensor network, Localization, Range-based, Range-free

1 引言

在传感器网络中,确定传感器节点自身位置和确定事件发生的位置是传感器网络基本的功能之一。事件发生的位置或获取事件节点的位置是监测消息中最重要的内容,如森林火灾发生的位置、战场上敌方车辆运动的区域、天然气管道泄漏的具体地点等。而确定节点自身位置是确定事件发生位置的前提,只有在传感器节点自身正确定位之后,才能确定事件发生的具体位置。定位信息除用来报告事件发生的地点外,还具有目标跟踪、协助路由、网络管理等用途。

传感器节点通常随机部署,以自组织的方式相互协调工作,定位必须在部署后完成。全球定位系统 GPS(Global Position System)是目前应用最广泛的定位系统,但是其体积大、成本高、能耗多和需要基础设施,不适用于低成本、自组织的无线传感器网络,或者只有少数节点配备 GPS 来确定自身位置,作为其他节点定位的参考。在无线传感器网络中,节点规模大、能量有限、可靠性差、随机部署、无线模块的通信距离有限,这通常要求定位机制具备自组织性、健壮性、能量高效、分布式计算等特点。

传感器节点自身定位就是根据少数已知位置的节点,按照某种定位机制确定自身的位置。根据节点是否已知自身的位置,节点可分为信标节点和未知节点。信标节点通过携带 GPS 定位设备等手段获得自身的精确位置,在网络节点中占的比例很小。不是信标节点的其它传感器节点就是未知节点,它们通过信标节点来确定自身位置。

节点定位通常分为两个步骤:第一步是确定未知节点到

信标节点的距离或方位;第二步是在确定未知节点同若干信标节点的距离或方位后,通常使用三边测量法^[9]、三角测量法^[5]、极大似然估计法^[10]来最后计算节点位置。三边测量法(Trilateration)如图 1 所示,已知 A、B、C 三个节点的坐标分别为 (x_a, y_a) 、 (x_b, y_b) 、 (x_c, y_c) ,以及它们到未知节点 D 的距离分别为 d_a, d_b, d_c ,计算节点 D 的坐标为 (x, y) ,节点 D 在三个圆的交点上。

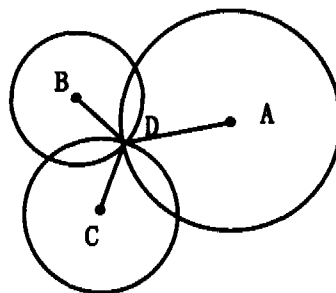


图 1 三边测量法图示

无线传感器网络中,根据定位过程中是否实际测量节点间的距离,把定位机制分为:基于距离的(range-based)定位机制和距离无关的(range-free)定位机制^[1,2],本文将以此种分类为线索介绍各种定位机制。

2 基于距离的定位

基于距离的定位机制是通过测量相邻节点间的实际距离或方位来计算未知节点的位置,通常采用测距、定位和修正等

^{*}) 本文研究得到国家自然科学基金项目(No:60272078)资助。王海东 硕士研究生,主要研究方向为无线网络协议;孙利民 博士、研究员,主要研究方向为无线移动网络和宽带接入网。

步骤。根据测量节点间距离或方位时所采用的方法,基于距离的定位分为基于 TOA 的定位、基于 TDOA 的定位、基于 AOA 的定位、基于 RSSI 的定位等。

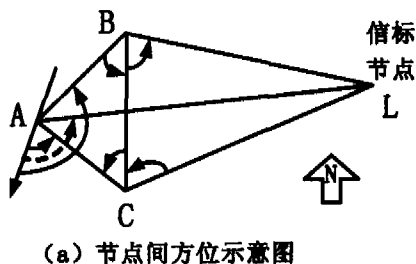
2.1 基于 TOA 的定位

在基于到达时间 TOA(Time Of Arrival)的定位机制中,根据已知信号的传播速度和信号的传播时间来计算节点间的距离,然后利用已有算法计算出节点的位置。

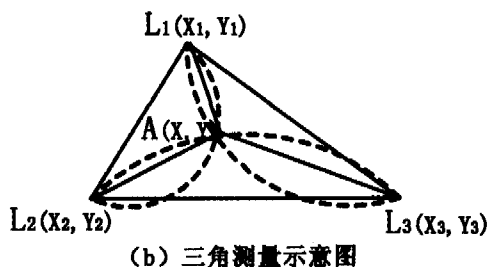
文[3]中给出了基于 TOA 定位的一个简单实现,采用伪噪声序列信号作为声波信号。节点的定位部分主要涉及到扬声器模块、麦克风模块、无线电模块和 CPU 等模块。假设两个节点间时间同步,发送节点的扬声器模块在发送伪噪声序列信号的同时,无线电模块通过无线电同步消息通知接收节点伪噪声序列信号发送的时间,接收节点的麦克风模块在检测到伪噪声序列信号后,根据声波信号的传播时间和速度计算发送节点和接收节点之间的距离。节点在计算出距离多个邻近信标节点的距离后,可以利用三边测量算法或极大似然算法计算出自身位置。基于 TOA 的定位精度高,但要求节点间保持精确的时间同步,因此对传感器节点的硬件和功耗提出了较高的要求。

2.2 基于 TDOA 的定位

在基于到达时间差 TDOA(Time Difference Of Arrival)的定位机制中,发射节点同时发射两种不同传播速度的无线信号,接收节点根据两种信号到达的时间差以及已知这两种信号的传播速度,计算两个节点之间的距离,再通过已有基本的定位算法计算出节点的位置。



(a) 节点间方位示意图



(b) 三角测量示意图

图 3 AOA 定位过程

AOA 定位过程可分为 3 个阶段,简述如下。1)测定相邻节点之间方位角:在图 3(a)中,节点 A、B、C 三个节点互为邻居节点(节点通信半径内的其它节点),测定角度 $\angle CAB$ 、 $\angle ACB$ 、 $\angle ABC$;2)测量相对某信标节点的方位角:在图 3(a)中,L 节点是信标节点,假定已经测得信标节点 L、节点 B 和 C 之间的方位信息,确定节点 A 相对于信标节点 L 的方位;3)利用方位信息计算节点的位置:如图 3(b)所示,当利用阶段 2)中获得的相对于 3 个信标节点的方位信息后,利用三角测量算法直接计算节点 A 坐标。

AOA 定位不仅能确定节点的坐标,还能提供节点的方位信息。但 AOA 测距技术易受外界环境影响,且 AOA 需要额外硬件,在硬件尺寸和功耗上不适用于大规模的传感器网络。

2.4 基于 RSSI 的定位

在基于接受信号强度指示 RSSI (Received Signal Strength Indicator)的定位中,已知发射节点的发射信号强度,接收节点根据收到信号的强度,计算出信号的传播损耗,利用理论或者经验模型将传输损耗转化为距离,再利用已有的算法计算出节点的位置。

如图 2 所示,发射节点同时发射无线射频信号和超声波信号,接收节点记录两种信号到达的时间 T_1 、 T_2 ,已知无线射频信号和超声波的传播速度为 c_1 、 c_2 ,那么两点之间的距离为 $(T_2 - T_1) \times S$,其中 $S = \frac{c_1 c_2}{c_1 - c_2}$ 。

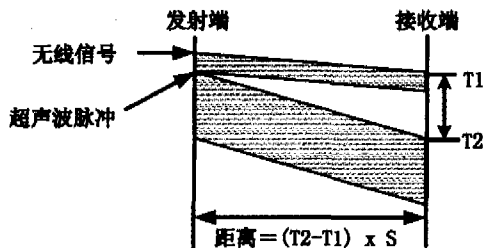


图 2 TDOA 定位原理图示

室内定位系统 Cricket 系统是麻省理工学院的 Oxygen 项目的一部分,使用 TDOA 来确定节点在大楼内的具体房间位置^[4]。TDOA 技术对硬件的要求高,成本和能耗使得该技术对低能耗的传感器网络提出了挑战。但是 TDOA 技术测距误差小,有较高的精度。

2.3 基于 AOA 的定位

在基于到达角度 AOA(Angle Of Arrival)的定位机制^[5]中,接收节点通过天线阵列或多个超声波接收机,感知发射节点信号的到达方向,计算接收节点和发射节点之间的相对方位或角度,再通过三角测量法计算出节点的位置。

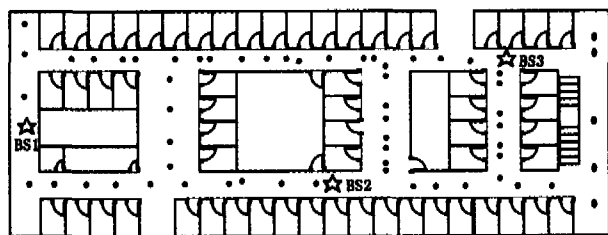


图 4 RADAR 系统监测区域平面图

RADAR^[6]是一个基于 RSSI 技术的室内定位系统,用以确定用户节点在楼层内的位置。如图 4 所示,监测区域中部署了 BS1、BS2 和 BS3 三个基站,覆盖 60 个房间。基站和用户节点均配有无线网卡,接收并测量信号的强度,用户节点定期发射信号分组,强度已知。实际定位前,在楼层内选取若干测试点(图中小黑点所示),记录在这些点上各基站收到的信号强度,建立各个点上的位置和信号强度关系的离线数据库 (x, y, ss_1, ss_2, ss_3) 。实际定位时,根据测得的信号强度 (ss'_1, ss'_2, ss'_3) 和数据库中记录的信号强度进行比较,信号强度均方差 $\sqrt{(ss_1 - ss'_1)^2 + (ss_2 - ss'_2)^2 + (ss_3 - ss'_3)^2}$ 最小的那

个点的坐标作为节点的坐标。虽然在实验环境中 RSSI 表现出良好的特性,但是在现实环境中,温度、障碍物、传播模式等条件往往都是变化的,使得该技术在实际应用中仍然存在困难。

基于距离的定位机制由于实际测量节点间的距离或角度,定位精度相对较高,但对节点的硬件也提出了很高的要求,定位过程中消耗的能量相对多,易受温度、湿度、障碍物等环境因素的影响。

3 距离无关的定位算法

距离无关的定位机制对节点间的距离进行估计或者确定包含未知节点的可能区域,来确定未知节点的位置。目前提出主要有质心算法、DV-Hop 算法、APIT 算法等。距离无关的定位机制无需测量节点间的绝对距离或方位,降低了对节点硬件的要求,使得节点成本更适合于大规模传感器网络,而且定位性能受环境因素的影响小。虽然定位的误差相应有所增加,但定位精度已能够满足多数传感器网络应用的要求,是目前大家普遍重点关注的定位机制。

3.1 质心算法

多边形的几何中心称为质心,多边形顶点坐标的平均值就是质心节点的坐标。质心定位算法首先确定包含未知节点的区域,再计算这个区域的质心,并将其作为未知节点的位置。

在质心算法^[7]中,信标节点周期性向邻近节点广播信标分组,信标分组中包含信标节点的标识号和位置信息。当未知节点接收到来自不同信标节点的信标分组数量超过某一个门限 k 或接收一定时间后,就确定自身位置为这些信标节点所组成的多边形的质心: $(X_{est}, Y_{est}) = (\frac{X_{i1} + \dots + X_{ik}}{k}, \frac{Y_{i1} + \dots + Y_{ik}}{k})$, 其中 $(X_{i1}, Y_{i1}) \dots (X_{ik}, Y_{ik})$ 为未知节点能够接收到其分组的信标节点坐标。质心算法简单易实现,完全基于网络连通性,无需信标节点和未知节点之间的协调。但用质心作为实际位置本身就是一种估计,这种估计的精确度和信标节点的密度以及分布有很大关系;密度越大,分布越均匀,定位精度越高。

3.2 DV-Hop 算法

距离向量-跳段 DV-Hop (Distance Vector-Hop)^[8] 定位机制非常类似于传统网络中的距离向量路由机制。距离向量定位机制分为以下三个阶段:

第一阶段:未知节点首先计算与信标节点的最小跳数。信标节点向邻居节点广播自身位置信息的分组,其中包括跳数字段,初始化为 1。接收节点记录具有到每个信标节点的最小跳数,忽略来自同一个信标节点的较大跳数的分组。然后将跳数值加 1,并转发给邻居节点。通过这个方法,网络中的所有节点能够记录下到每个信标节点的最小跳数。

第二阶段:计算未知节点与信标节点的实际跳段距离。每个信标节点根据第一个阶段中记录的其它信标节点的位置信息和相距跳数,利用式(1)估算平均每跳的实际距离:

$$\text{HopSize}_i = \frac{\sum_{j \neq i} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum_{j \neq i} h_{ij}} \quad (1)$$

其中 (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) 是信标节点 i, j 的坐标, h_{ij} 是信标节点 i 与 j ($j \neq i$) 之间的跳段数。然后,信标节点将计算的平均每跳距离用带有生存期字段的分组广播至网络中,未知节

点仅记录接收到的第一个平均每跳距离,并转发给邻居节点。未知节点接收到平均每跳距离后,根据记录的跳数,计算到每个信标节点的跳段距离。

第三阶段:未知节点利用第二阶段中记录的到各个信标节点的跳段距离,利用三边测量法或极大似然估计法计算自身坐标。

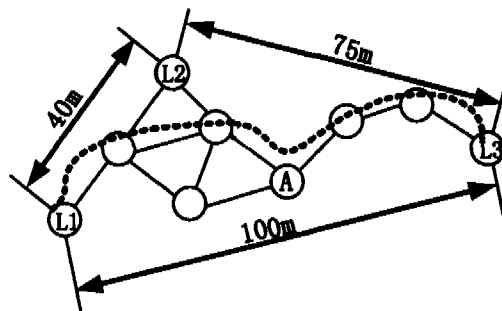


图 5 DV-Hop 定位算法举例

如图 5 所示,经过第一、二阶段,计算出信标节点 L_1 、 L_2 、 L_3 之间的距离和跳数。那么信标节点 L_2 计算的平均每跳实际距离为 $(40+75)/(2+5)=16.42$ 。假设 A 从 L_2 获得平均每跳实际距离,则节点 A 与三个信标节点之间的距离分别为: $L_1: 3 \times 16.42$, $L_2: 2 \times 16.42$, $L_3: 3 \times 16.42$,最后利用三边测量法计算出节点 A 的坐标。

距离向量算法使用平均每跳距离计算实际距离,对节点的硬件要求低,实现简单。其缺点是利用跳段距离代替直线距离,存在一定的误差。

3.3 APIT 算法

近似三角形内点测试法 APIT (Approximate Point-In-Triangulation Test)^[1],首先确定多个包含未知节点的三角形区域,未知节点从邻近信标节点组成的集合中任意选取三个信标节点,测试未知节点是否位于三角形内部,使用不同信标节点组合重复测试,直到穷尽所有组合或达到所需定位精度,最后确定包含未知节点所有三角形的重叠区域的质心作为未知节点的位置。如图 6(a)所示,阴影部分区域是包含未知节点的所有三角形的重叠区域,黑点指示的质心位置作为未知节点的位置。

APIT 算法的理论基础是最佳三角形内点测试法 PIT (Perfect Point-In-Triangulation Test)。如图 6(b)、(c)所示,假如存在一个方向,节点 M 沿着这个方向移动,会同时远离或接近顶点 A、B、C,那么节点 M 位于 $\triangle ABC$ 外;否则,节点 M 位于 $\triangle ABC$ 内。为了在静态的环境中实现三角形内点测试,提出了近似的三角形内点测试法 APIT:假如在节点 M 所有的邻居节点中,相对于节点 M 没有同时远离或靠近三个信标节点 A、B、C,那么节点 M 在 $\triangle ABC$ 内;否则,节点 M 在 $\triangle ABC$ 外。

APIT 利用网络中相对较高的节点密度来模拟节点移动,利用无线信号的传播特性来判断是否远离或靠近信标节点。通常,在给定方向上,一个节点距离另一个节点越远,接收到信号强度越弱。邻居节点通过交换各自接收到信号的强度,判断距离某一信标节点的远近,从而模仿 PIT 中的节点移动。如图 6(b)所示,节点 M 通过与邻居节点 1 交换信息可知,节点 M 接收到信标节点 B、C 的信号强度大于节点 1 接收到信标节点 B、C 的信号强度,而节点 M 接收到信标节点 A

(下转第 49 页)

参考文献

- 1 Stankovic J A, Abdelzaher T F, Lu Chenyang, et al. Real-Time Communication and Coordination in Embedded Sensor Networks. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(7)
- 2 Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless Sensor Networks; a survey. Computer Networks, 2002, 38, 393~422
- 3 Tsigros A, Hass Z J. Multipath Routing in The Presence of Frequent Topological Changes. IEEE Communications Magazine, 2001, 132~138
- 4 De S, Qiao C, Wu H. Meshed multipath routing: An efficient strategy in sensor networks. In: Proc. WCNC, IEEE, New Orleans, LA, Mar. 2003
- 5 Lee S-J, Gerla M. Split Multipath Routing with Maximally Disjoint Paths in Ad hoc Networks. In: Proc. Of IEEE ICC 2001, Helsinki, Finland, June 2001, 3201~3205
- 6 Ganesan D, Govindan R, Shenker S, et al. Highly-Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks. Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(4)
- 7 Nasipuri A, Das S R. On-Demand Multipath Routing for Mobile Ad Hoc Networks. In: Proc. Intl Conf on Computer Communication and Networks (ICCCN), Oct. 1999, 64~70
- 8 Huang Shih-Chang, Jan Rong-Hong. Energy-aware, load balanced routing schemes for sensor networks. In: 10th ICPDS, 2004. 419~425
- 9 Hong X, Gerla M, Wang H. Load Balanced, Energy-Aware Communications for Mars Sensor Networks. In: Proc. of IEEE Aerospace 2002, Mar. 2002
- 10 Dulman S, Nieberg T, Wu Jian, et al. Trade off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks. In: Proc. WCNC, IEEE, 2003, 3, 1918~1922

(上接第 38 页)

的信号强度小于节点 1 接收到信标 A 的信号强度。那么根据两者接收信标节点的信号强度判断,如果节点 M 运动至节点 1 所在位置,将远离信标节点 B 和 C,但会靠近信标节点

A。依次对邻居节点 2、3、4 进行相同的判断,最终确定节点 M 位于 $\triangle ABC$ 中;而在图 6(c)中,节点 M 可知假如运动至邻居节点 2 所在位置,将同时靠近信标节点 A、B、C,那么判定节点 M 在 $\triangle ABC$ 测试外。

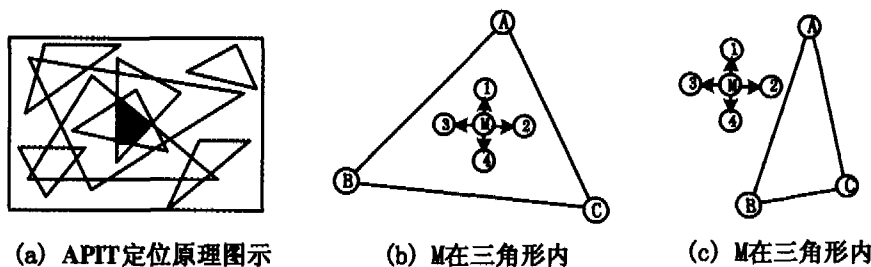


图 6 APIT 定位原理图示

APIT 定位具体步骤包括收集邻近信标节点信息、APIT 测试、计算重叠区域、计算未知节点位置。在无线信号传播模式不规则和传感器节点随机部署的情况下,APIT 算法的定位精度高、性能稳定,但 APIT 测试对网络的连通性提出了较高的要求。相对于计算简单的质心定位算法,APIT 算法精度高,对信标节点的分布要求低。

总结 随着无线传感器网络研究的深入开展,其特点和优势日益显著,应用也越来越广泛。本文以基于距离的定位和距离无关的定位的分类为线索,详细介绍了传感器网络中的各种定位机制,分析了各种定位机制的原理和优缺点。无线传感器网络节点的能量有限,内存和 CPU 的处理能力有限,这些约束要求定位算法必须是低复杂性的。要进一步延长网络的生存周期,就必须减少定位过程中的通讯开销,因为无线通信的能耗是节点的主要能耗。目前的算法大都在能耗、成本和精度上做了折衷考虑。由于各种应用差别很大,没有普遍适合于各种应用的定位算法,因此将针对不同的应用,通过综合考虑节点的规模、成本及系统对定位精度的要求,来设计最适合的定位算法。

参考文献

- 1 He Tian, Huang Chengdu, Blum B M, et al. Range-Free Localization Schemes in Large Scale Sensor Networks. In: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Network (MobiCom), San Diego, California, USA; ACM Press, 2003, 81~95
- 2 priyantha N B, Balakrishnam H, Demailne E, et al. Anchor-Free Distributed Localization in Sensor Networks; [Technical Report]. MIT-LCS-TR-892, MIT Lab for Computer Science, 2003
- 3 Girod L, Estrin D. Robust Range Estimation using Acoustic and Multimodal Sensing. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '01), Maui, Hawaii, USA; IEEE Computer Society, 2001, 3, 1312~1320
- 4 Priyantha N, Chakraborty A, Balakrishnan H. The Cricket Location-Support System. In: Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking, Boston, MA, August 6-11, 2000. 32~43
- 5 Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system (APS) using AOA. INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE, 2003, 3
- 6 Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. In: Proceedings of Infocom' 2000, Tel Aviv, Israel; IEEE Computer and Communications Societies, 2000, 2, 775~584
- 7 Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. Density Adaptive Algorithms for Beacon Placement in Wireless Sensor Networks. IEEE ICDCS '01, Phoenix, AZ, April 2001
- 8 Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-less Low Cost Outdoor Localization for Very Small Devices. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 28~34
- 9 Hightower J, Borriello G. A Survey and Taxonomy of Location Systems for Ubiquitous Computing; [Technical Report]. UW-CSE 01-08-03
- 10 Savvides A, Han C C, Srivastava M B. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. In: Proceedings of the Seventh Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). Rome, Italy, 2001. 166~179