

无线传感器网络节点定位问题^{*}

尚志军 曾 鹏 于海斌

(中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳110016)

摘 要 无线传感器网络(WSN)是由大量靠无线多跳方式通信的智能传感器节点构成的网络,围绕 WSN 出现了许多新的研究内容,节点定位是其中一个很重要的方面。本文给出了 WSN 节点定位的概念,分析了面临的挑战,从测距技术和定位算法角度介绍了当前的研究进展,指明了需要进一步研究解决的问题。

关键词 无线传感器网络,节点定位,定位算法,测距技术

Node Localization Problem in Wireless Sensor Networks

SHANG Zhi-Jun ZENG-Peng YU Hai-Bin

(Shenyang Institute of Automation China Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract Wireless ad-hoc sensor networks(WSN)are formed by large quantity of intelligent sensor nodes which communicate in wireless and ad hoc style. Recently, there are lots of issues emerging. Node localization is one of them. Node localization problem and challenges in WSN are described in this paper at first. Then, a survey of recent research in node localization is given from the points of ranging technology and positioning algorithm. Finally, future works in the field of node localization are pointed out.

Keywords WSN, Node localization, Algorithm, Ranging technology

1 引言

近年来,计算机、无线通信及微机电(MEMS)技术的发展使得制造低成本、微型化、智能化的传感器成为可能。为此,国外的一些大学和研究机构提出了分布式传感器网络(WSN)的概念,并且设计了一些原形系统。WSN 由大量靠无线、多跳方式通信的智能传感器节点构成,一般被密集布设在特定的监控区域。由于传感器节点在布设时采取随机投放的方式,网络中大多数节点位置不能事先确定;节点间以无线、多跳的通信方式,自组织网络拓扑结构;节点间具有协同能力,通过局部的数据采集、预处理及数据融合可完成单个节点不能完成的全局任务。WSN 在军事、环境、医疗和商用领域都有很高的应用价值,国外启动了许多关于 WSN 的研究计划,如: Pico-Radio^[1]、WINS^[2]、Smart Dust^[3]、 μ AMPS^[4]、SCADDS^[5]等。研究的内容涉及到体系结构、能量管理、协议设计、路由算法等方面。其中,节点定位问题作为一个基本问题,引起了许多学者的兴趣。

与一般的计算机网络相比,WSN 在计算机软硬件所组成计算世界与实际物理世界之间建立了更为紧密的联系,只有结合位置信息,传感器获取的数据才有实际意义。许多 WSN 的研究成果都表明了节点位置信息的重要性,如在网络层,因为 WSN 节点无全局标识,可以设计基于节点位置信息的路由算法^[6~8];在应用层,根据节点位置,WSN 系统可以智能的选择一些特定的节点来完成任务,从而大大降低整个系统的能耗,提高系统的存活时间^[9,10]。许多对目标追踪问题的研究更是将节点位置已知作为一个前提条件。

Akyildiz 对 WSN 作了比较详细的综述^[11],在应用层提到节点定位功能,但是没有进一步说明。本文首先给出了 WSN 节点定位的概念,分析了面临的挑战,然后从测距技术

及定位算法两方面介绍了当前的研究进展,比较了现有定位技术的特点,最后指明了需要进一步研究解决的问题,以期引起有关学者的关注,推动 WSN 研究的发展。

2 节点定位概念

节点定位是 WSN 系统布设完成后面临的首要问题,它可表述为:依靠有限的位置已知节点,确定布设区中其它节点的位置,在传感器节点间建立起一定的空间关系。当前对节点定位问题的研究一般都基于以下前提:1)有一定比例的节点位置已知或具有 GPS 定位功能,这些节点的位置可作为定位参考点;2)节点具有测量与邻节点距离的能力;3)节点不具有自主移动能力。

针对不同的 WSN 应用,节点定位难度不尽相同。对于军事应用,节点布设有可能采取空投的方式,导致节点位置随机性非常高,系统可用的外部支持也很少;而在另外一些场合,节点布设可能相对容易,系统也可能有较多的外部支持。

3 面临的挑战

全球定位系统(GPS)已经在许多领域得到了应用,但不能为每个节点配备 GPS 接收装置。原因主要有:1)GPS 接收装置费用较高,而 WSN 节点一般是廉价的;2)GPS 对使用环境有一定限制,如在水下,建筑物内等不能直接使用;3)民用 GPS 接收装置可达到百米级的精度,军用的可达几米,但这样的分辨率对于 WSN 节点的布设密度来说不能满足要求。

为了实现普适计算(Ubiquitous Computing),国外研究了很多传感器定位系统^[12]。这样的系统一般由大量传感器以有线方式连网构成,系统的目标是确定一定区域内物体的位置。如出现比较早的室内定位系统 Active Badge,进入办公楼内的人员配戴可发出红外线的徽章,办公楼内的每个房间都

^{*}国家自然科学基金资助项目(60374072)。尚志军 博士生,主要研究方向为现场总线、无线传感器网络等。曾 鹏 博士生,主要研究方向为计算机网络。于海斌 研究员,博导,主要研究方向为控制理论、优化调度等。

装有红外线接收装置,这些装置以有线方式连至中心计算机,中心计算机通过计算可以确定每个徽章的位置。这些系统的依赖于大量基础设施支持,采用集中计算方式,不考虑节能要求。

在机器人领域,也有很多关于机器人定位的研究^[13~15],但这些算法一般不考虑计算复杂度及能量限制的问题。

由于 WSN 节点成本低、能量有限、随机密集布设等特点,上述定位方法均不适用于 WSN。针对 WSN 节点定位问题,需要研究新的定位方法,这将面临以下挑战:1)受应用条件及网络内通讯量的限制,不能完全采用集中计算方式;2)定位时的参考点数量可能极为有限;3)传感器节点计算能力及能量有限,定位算法不能很复杂;4)在实际的应用中,单个的传感器节点容易受干扰或被损坏而不能正常工作,因此系统要有一定的环境自适应性。

4 测距技术

节点间具有测距能力是现有许多节点定位算法的要求。Hightower 介绍了很多传感器定位系统^[12],它们使用了多种测距技术,如测量无线电、红外线、激光信号强度,测量无线电信号相位差,测量声波、超声波与无线电信号到达时间差等。

目前在 WSN 节点定位中只使用了其中四种。表1比较了它们的特点。

(1)测量无线电信号强度(RSSI)。无线电收发器是无线传感器节点已有的资源,不需要添加额外的硬件。在理想条件下,使用接收信号强度(RSSI)随距离衰减模型可推断节点间距离,但在实际应用中测距误差较大^[16,17,19]。

(2)测量无线电信号覆盖关系(Radio Connectivity)。假设每个节点的无线电信号覆盖区为以信号发射节点为中心的圆(只考虑二维的情况下),当节点可接收到其它若干节点的信号时,取这些圆形覆盖区的公共部分作为节点的位置估计。尽管在实际物理条件下,无线电信号覆盖区不可能是理想的圆形区域,这种方法的误差也小于(1)中的方法,且计算简单。

(3)测量普通声波与无线电到达时间差(TDOA)。这种方法需要节点同时具有发射声音信号和无线电信号的能力。无线电信号传播速度远远高于声波,可使用无线电信号作为测量声音信号传播时间的同步信号。声波在空气中的传播速度受温度、气压等影响,在需要较高精度时可进行修正。

(4)测量超声波信号与无线电到达时间差。这种方法与(3)基本相同,但使用超声波代替了(3)中的普通声音信号,提高了定位准确度,但有效距离较短。

表1 测距技术特点比较

	有效距离	抗干扰能力	硬件实现	测距误差
RSSI	长	受电磁干扰,可穿透障碍物	不增加额外装置	大
覆盖关系	长	受电磁干扰,可穿透障碍物	不增加额外装置	较大
普通声波 TDOA	较短	受多途、混响效应影响,不能穿透障碍物	增加声波收发装置	较小
超声波 TDOA	很短	受多途、混响效应影响,不能穿透障碍物	增加超声波收发装置	很小

5 节点定位算法

目前的节点定位算法可分为两种类型:集中式和分布式。在集中式中,中心计算机负责计算每个节点位置。在分布式中,计算节点位置的工作在节点本地完成。分布式定位算法又有单跳方式和非多跳方式两种,下面进行详细介绍。

5.1 集中式算法

Doherty 将凸优化算法应用于二维情况下的节点定位问题^[18]。它基于如下假设:如果两个节点可以有效进行无线电信号,则节点间的距离必然小于节点无线收发器的通讯半径。在图1中,节点表示为凸边形的顶点,节点间的距离约束表示为凸边形的边。节点定位问题表述为:网络中共有 n 个节点,其中 m 个节点坐标 $(x_1, y_1, \dots, x_m, y_m)$ 已知,这些节点可作为定位参考点,算法的目标是寻找满足节点间距离约束的 $n-m$ 个节点的坐标 $(x_{m+1}, y_{m+1}, \dots, x_n, y_n)$ 。凸优化算法在中心计算机实现,所有节点必须将其与邻节点的连接关系以多跳方式发往中心计算机。仿真结果发现定位准确度易受参考点数量多少影响,参考点处在布设区边缘时可大大减少定位误差(Bulusu 也有类似结果^[19])。

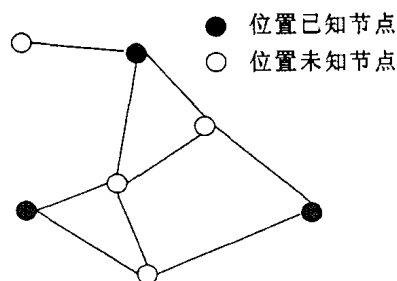


图1

Mondinelli 也采用了集中计算方式^[20],分别在系统中设置一个和三个位置已知的主节点(master)。主节点具有与中心计算机直接通讯的能力,中心计算机通过系统内各个节点的“父子”关系来确定系统的“地图”。

集中式算法的优点是节点计算量较小,可以使用全局信息,便于优化。如果应用场合允许使用集中计算方式,这将是一个很好的选择。算法的缺点很明显,因为需要中心计算机支持,系统的可扩展性不好,在个别节点失效或有新节点加入时,中心计算机需要重新计算所有节点位置,这将产生大量通讯开销。

5.2 分布式算法

分布式算法将计算工作分布到各个节点中,节点的位置估计在本地完成。在非多跳方式中,算法使用的距离参数在节点一跳范围内取得;在多跳方式中,这个参数由节点间协作、多跳取得。

5.2.1 非多跳方式 网络中有一定比例的节点是信标节点(Beacon)^[19~22]。信标节点在布设区成网格状分布,位置已知,或者可以通过 GPS 确定自身位置。定位时节点首先接收信标节点的无线电信号,通过报文接收率来确定是否处于该信标的无线电信号覆盖区,即式(1)中的连接关系指标(CM)是否超过一定的阈值。式(1)表示第 i 个节点的 CM 指标, $N_{recv}(i, t)$ 为第 i 个节点在 t 时刻已经收到的信标报文数, $N_{send}(i, t)$ 表示在 t 时刻信标发出的报文数。当节点与多个信标节点完成这一过程后,节点可取这些无线电信号覆盖区公共部分的中心作为自身位置,见图2。

$$CM_i = \frac{N_{recv}(i, t)}{N_{send}(i, t)} \times 100\% \quad (1)$$

直觉上,信标节点的密度对定位精度有较大影响。为此,在文[22]中,作者研究了信标节点布设密度与定位准确度的

关系。对于信标节点密度较低的情况,提出了一种如何增加信标节点的算法(HEAP);对于信标节点密度较高的情况,提出了一种信标节点如何切换睡眠、唤醒、工作三种状态的算法(STROBE),达到在提高定位准确度的同时,延长网络存活时间的目的。

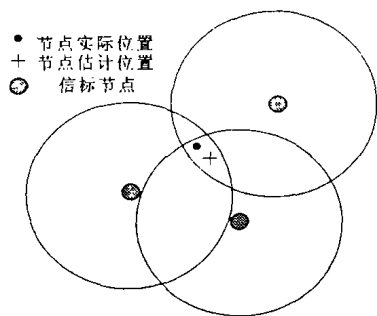


图2

这种算法优点是:1)通过使用信标节点,可以实现分布式计算,便于系统扩展;2)如果系统允许采用集中计算方式,使用信标节点可以为定位算法提供更多的信息,从而提高定位准确度。算法的缺点是需要大量信标节点的支持。

5.2.2 多跳方式 这种算法可应用于更富于挑战的WSN应用场合:锚节点(anchor node),即位置已知的参考节点在整个网络节点中所占比例很小,且通讯能力与普通节点相同(在非多跳方式中,信标节点在系统中布署密度比“锚节点”大,通讯能力强,普通节点可直接接收信标节点的信号);由于的通讯距离有限,普通节点不可能在一跳范围内测得与锚节点的距离。算法的主要目的是减少锚节点稀疏和测距误差对定位准确度的影响。

文[23]提出了基于GPS定位思想及距离矢量路由的APS算法(具体有DV-hop、DV-distance、Euclidean三种);文[24,25]分别提出了Max-Min和RPA算法(原文中并未使这些名称)。虽然这些算法不尽相同,但均可划分为多跳测距、定位、定位优化^[24,25]三个阶段进行比较。见图3。

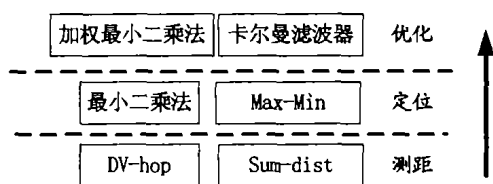


图3

(1)多跳测距

在这一阶段,节点间采用“泛洪”方式测量与“锚节点”的距离。DV-hop^[23,25]先根据两个锚节点的实际距离及间隔跳数计算每跳平均距离 $\bar{d}$,然后广播 $\bar{d}$,每个节点使用 $\bar{d}$ 计算与锚节点的距离。图4中,锚节点A与锚节点C距离为100米,跳数为4,则 $\bar{d}_A$ 等于25米,节点1测得其与A之间有2跳,则 $2 * \bar{d}_A$ 可作为节点1与锚节点A间的距离。这种方法没有使用第3节中的物理测距方法,但只适用于节点分布较均匀且布署密度较大的情况。RPA算法使用的Sum-dist方法考虑了节点分布不均匀的情况,它用物理测距方法测量邻节点间距离,并从锚节点开始求和。文[24]还根据一定规则挑选了每个节点定位时要使用的邻节点,构成文中所谓的“计算树”。

随着网络规模的增大,“泛洪”方法必然使通讯开销急剧增大,为此文[25]中采取了两种方法限制“泛洪”开销,一是节

点只广播“新”消息;二是当节点已经收集到了足够多的与“锚节点”的距离信息时,它就不再继续广播它所接收到的距离信息。

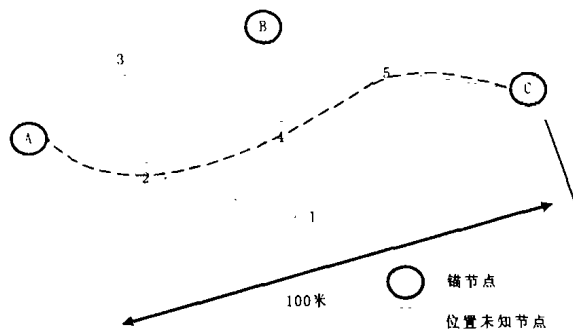


图4

(2)定位

在这一阶段,文[23,24]中的算法都可归结为“多边测量法”,如图5所示,阴影节点为普通节点,其它节点为锚节点。对于每个锚节点,有等式(2),其中 (x, y) 表示待定位节点的坐标, (x_i, y_i) 表示第 i 个锚节点的坐标, d_i 表示使用测距方法取得的第 i 个锚节点与待定位节点的距离,对于 n 个锚节点,可求得 n 个等式,将前 $n-1$ 个等式分别减第 n 个等式,整理后可得线性方程组 $Ax=b$,其中矩阵 A, b 由锚节点坐标及节点与锚节点的距离构成, x 为待求得节点坐标。用标准最小二乘法可求得 x 的估计 $\hat{x}$,

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T b$$

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 = d_i^2$$

(2)

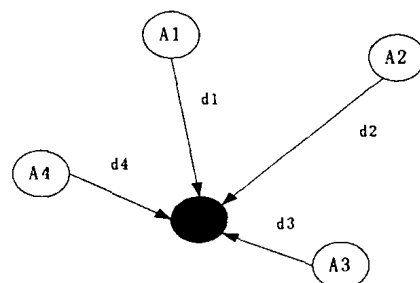


图5

文[25]中使用“最大-最小法”(Max-Min)。对于节点的 x 坐标,将待定位节点与锚节点的实测距离 d_i 作为 d_i 在 X 及 Y 方向的投影(显然 d_i 绝对值大于实际投影的绝对值),将锚节点 x 坐标加或减 d_i ,作为待定位节点 x 坐标的最大或最小值。对于 y 坐标也可进行同样的计算。如果待定位节点与多个锚节点完成上述步骤,就可以得到一个待定位节点位置的限制区,限制区的中心可作为待定位节点的位置。

(3)定位优化

在定位阶段,节点主要使用与锚节点的距离关系估算自身位置,对它与邻节点的距离关系没有充分利用。在这一阶段,节点就要利用与邻节点的距离关系迭带优化定位阶段估算的位置。在文[25]中,邻节点首先使用超声波TDOA测距,然后使用加权最小二乘法估计新的节点位置,权值在0和1之间,代表节点位置估计的置信度。算法迭带至新的位置估计与定位阶段的位置估计之差小于某个给定阈值为止。

文[24]在测距阶段形成的“计算树”上应用了卡尔曼滤波器算法。对于图5中的节点,求使式(3)中 $L(x, y)$ 最小的节点坐标 (x, y) 。其中, (x, y) 表示待定位节点的坐标, (x_i, y_i) 表

示第 i 个锚节点的坐标, R_i 表示使用测距方法取得的第 i 个锚节点与待定位节点的距离, $D_i(x, y) = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$ 为第 i 个锚节点与待定位节点的欧氏距离。

$$L(x, y) = \sum_{i=1}^n [D_i(x, y) - R_i]^2 \quad (3)$$

Langendoen 对上述算法的不同组合进行了仿真^[26], 结果表明这几种算法的定位准确度一般都小于 $1/3$ 节点通讯半径, 但每种算法的性能依赖于各自的实验条件。测距误差对定位准确度的影响比较显著, 优化算法只在测距误差不是很大的时候效果才比较明显。表2作了对比。

表2

	鲁棒性	复杂度	优化算法
APS	差	低	未使用
RPA	最好	高	使用
Max-Min	较好	高	使用

对于多跳定位方式有以下指导原则:

1) 参考点在网络中的分布对节点定位准确度有较大影响。分布在网络边缘的节点因为参考点较少, 定位准确度往往较差, 所以在允许多种情况下, 应将尽量多的参考点布放在网络边缘;

2) 节点一跳范围内的邻节点不能过少, 一般应大于 10% ;

3) 参考点的数量应占整个节点总数的 5% 以上。

总结与展望 从以上介绍的研究进展可以看出, 针对不同的应用场合, 可以采用集中或分布式定位方法, 其中多跳方式的分布式定位是最具挑战的。

提高测距准确度是提高节点定位准确度一个有效途径, 难点是测距的实现要受节点能量、硬件复杂度及体积的限制。在实际应用中, 测距准确度是不能无限提高的, 这就需要从算法的角度进一步提高定位准确度。当参考点少且节点分布随机性较大时, RPA 方法具有较高的鲁棒性。因为它在定位阶段没有使用多边测量方法, 而是采用所谓的最大-最小算法, 减少了定位准确度对测距误差及参考点数量的敏感程度。而当节点密度较大时, 不论集中式还是分布式, 利用节点间无线电信号覆盖关系定位简单实用。

对于 WSN 节点定位问题, 以下方面还需要进一步研究:

1) 有效的测距方法;

2) 大规模 WSN 网络中的误差累积问题;

3) 减少所有节点完成定位过程所需时间;

4) 减少节点定位带来的通讯开销;

5) 复杂的算法可以提高定位准确度, 但 WSN 节点有能量限制, 需要研究在算法复杂度与能量消耗之间的合理折衷;

6) 大多数文献都只给出了仿真结果, 还需要结合实验来验证定位算法的性能;

7) 目前的研究只是局限于静态网络, 当节点具有移动能力时, 节点定位将是一个更具挑战性的问题。

参考文献

- Ammer R J M, Silva J, et al. PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking[J]. IEEE Computer Magazine, July 2000. 42~48
- Pottie G, Kaiser W. Wireless integrated network sensors[A]. Communications of the ACM[C], 2000, 43(5): 551~558
- Warneke B, Liebowitz B, Pister K. Smart dust: communicating with a cubic-millimeter computer[J]. IEEE Computer, Jan. 2001. 2~9
- Shih E, et al. Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks[A]. In: Proc. ACM MobiCom '01[C], Rome, Italy, July 2001. 272~286
- http://www.isi.edu/scadds[EB/OL]
- Ko y, Vaidya N. Location-aided routing (LAR). in mobile ad hoc networks. In: Proc. of the Sixth Annual ACM/IEEE Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000), Boston, MA, USA, ACM Press, 2000. 243~254
- Karp B, Kung H. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: Proc. of the Sixth Annual ACM/IEEE Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000), Boston, MA, USA, ACM Press, 2000. 243~254
- Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing. In: Proc. of the Seventh Annual ACM/IEEE Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking (ACM Mobicom), Rome, Italy, 2001
- Harter A, Hopper A, Steggle P, et al. The anatomy of a context-aware application. In: Proc. of the Fifth Annual ACM/IEEE Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 99), Seattle, WA, USA, ACM Press, 1999. 59~68
- Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. In: Proc. of the Sixth Annual Intl. Conf. on Mobile Computing and Networks (MobiCOM 2000), Boston, Massachusetts, 2000
- Akyildiz I, Su W, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks, 2002, 38: 393~422
- Hightower J, Borriello G. Location Systems for Ubiquitous Computing. IEEE Computer, 2001
- Atiya S, Hager G. Real-time vision-based robot localization. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1993, 9(6): 785~800
- Leonard J, Durrant-Whyte H. Mobile robot localization by tracking geometric beacons. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1991, 7(3): 376~382
- Tinos R, Navarro-Serment L, Paredis C. Fault tolerant localization for teams of distributed robots. In: IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, Maui, HI, 2001. 1061~1066
- Hightower J, Want R, Borriello G. SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength, UW CSE 00-02-02, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, WA, Feb. 2000
- Hill J, Culler D. Mica: A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks. IEEE Micro, 2002, 22(6): 12~24
- Doherty L, et al. Convex position estimation in wireless sensor networks. In: Proc. of IEEEIN OCOM 2001, volume 3, Anchorage, Alaska, USA, April 2001. 1655~1663
- Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices. IEEE Personal Communications Magazine, 2000, 7(5): 28~34
- Mondinelli F. Self Localizing Sensor Network Architecture. IEEE Instrumentation and Measurement, Technology Conference, Anchorage Alaska, May, 2002
- Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. Adaptive beacon placement. In: Proc. of Intl. Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS-21), Phoenix, Arizona, USA, IEEE Computer Society, 2001. 489~498
- Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. Density adaptive algorithms for beacon placement in wireless sensor networks: [Technical Report UCLA-CS-010013]. University of California at Los Angeles, Los Angeles, California, USA, May 2001
- Niculescu D, Nath B. Ad-hoc positioning system, in: IEEE GlobeCom, 2001
- Savvides A, Park H, Srivastava M. The bits and flops of the n-hop multilateration primitive for node localization problems. In: First ACM Int. Workshop on Wireless Sensor Networks and Application (WSNA), Atlanta, GA, 2002. 112~121
- Savarese C, Langendoen K, Rabaey J. Robust positioning algorithms for distributed ad-hoc wireless sensor networks. In: USENIX technical annual conf. Monterey, CA, 2002. 317~328
- Langendoen K, Reijers N. Distributed Localization in Wireless Sensor Networks: A Quantitative Comparison, Computer Networks (Elsevier), special issue on Wireless Sensor Networks, Aug. 2003