

无线传感器网络节点定位技术研究

邱岩^{1,2} 赵冲冲¹ 戴桂兰² 胡长军¹

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)¹ (清华大学信息技术研究院 北京 100084)²

摘要 节点定位是无线传感器网络应用的前提和基础。本文在分析 WSN 自身定位算法研究的基础上,对定位算法进行了分类。根据静态定位和动态定位算法的不同特点,对现有的算法进行了分析比较,并重点讨论了一些典型的动态定位算法。最后针对统一武器制导网络等空间应用领域中对网络节点定位的要求,探讨了节点的移动性和三维定位问题。

关键词 无线传感器网络,三维节点定位,移动节点定位

Research on Localization Technology for Wireless Sensor Networks

QIU Yan^{1,2} ZHAO Chong-chong¹ DAI Gui-lan² HU Chang-jun¹

(School of Information Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)¹

(Research Institution of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)²

Abstract Node localization is the precondition and foundation for applications of wireless sensor networks. In this paper, the classification of localization algorithms is discussed on the basis of self-localization algorithms research of WSN. According to the different characteristics of static localization and dynamic localization, the analysis and comparison of existing algorithms are also studied. Besides, some typical dynamic localization algorithms are emphasized. At last, issues of mobility of nodes and 3D localization are discussed according to the demand of node localization in the application of space field, such as Unified Guided Weapons Networks.

Keywords Wireless sensor networks, 3D node localization, Mobile node localization

1 引言

微机电系统、片上系统和无线通信等技术的进步,推动了低功耗多功能传感器的快速发展,使其在微小体积内能够集成信息采集、数据处理和无线通信等多功能。无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是由部署在监测区内大量的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的自组织的网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域内感知对象的信息,并传送给观察者。

作为一种新技术,无线传感器网络对目标跟踪、监测、入侵检测以及一些定位相关领域有广泛的应用前景。对于这些应用,传感器节点的位置信息是至关重要的,因为不知道传感器节点位置而感知的数据是没有意义的,只有在传感器节点自身正确定位后,才能确定传感器节点监测到的事件发生的具体位置。传感器节点自身定位就是一种通过估计至邻居节点的距离或邻居数目,利用节点间的交换信息来确定每个节点位置的机制。在传感器网络中,节点能够自主确定位置被认为是其基本能力和系统的基本服务之一。对于 WSN 来说,人工部署或为所有网络节点配置 GPS 装置都会受到成本、功耗、拓展性等问题的限制,因此,寻求 WSN 自身定位机制成为许多研究机构和学者所共同探讨的问题。

本文分析了 WSN 自身定位算法的最新研究进展,从网络本身的动态性角度出发,将 WSN 自身定位机制划分为静

态定位和动态定位,并以此为基础,对一些典型的定位算法进行了详细的分析,最后针对统一武器制导网络等空间应用领域中对网络节点定位的要求,探讨了节点移动性和空间性等问题。

2 节点定位算法分类

目前,节点定位算法有不同的分类标准。根据定位过程中是否测量实际节点间距,可分为距离相关(Range-based)定位和距离无关(Range-free)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,后者无需实际测量,而是利用节点间的估计距离计算节点位置。距离相关定位按照测距技术的不同又可分为接收信号强度(received signal strength indicator, RSSI)、到达角度(angle of arrival, AOA)、到达时间差(time difference of arrival, TDOA)、到达时间(time of arrival, TOA)定位等;根据定位过程中是否采用锚节点(位置已知的传感器节点),又可分为基于锚节点(Anchor-based)的定位和无锚节点(Anchor-free)的定位,基于锚节点的定位算法依赖于锚节点的位置信息,位置未知节点通过获取足够的锚节点信息以计算自身位置,无锚节点定位算法仅根据局部距离值来进行相对定位;根据计算方式的不同,又可分为集中式(Centralized computation)定位和分布式(Distributed computation)定位,前者指把所需信息传送到某个中心节点(例如,一台服务器),并在那里进行节点定位计算,后

者则依赖节点间的信息交换和协调,由节点自行定位计算。

随着 WSN 应用领域的不断扩展,新的分类标准也孕育而生。根据传感器网络中传感器节点是否移动,传感器网络的节点定位可分为静态定位(Static Localization)和动态定位(Dynamic Localization)两类。

(1)静态定位(Static localization)

静态定位中,每个节点都是静止的,具体又可分为距离相关(Range-based)的定位和距离无关(Range-free)的定位。距离相关的定位通过距离或角度的估计来计算位置,而距离无关的定位仅仅通过消息的转发来确定位置。距离相关的定位需要节点具有测距的能力,因此对硬件的要求较高,而距离无关的定位依靠高密度锚节点的本地技术或依靠网络广播获取跳数信息来估计位置。相比之下,距离无关定位算法无需过多的硬件支持,大大减小了网络成本。

(2)动态定位(Dynamic localization)

WSN 不仅可以应用于静态场景,还可以应用到动态场景中。在动态环境下,节点的移动性增加了定位的复杂度。与静态定位相比,动态定位具有以下特点:

- 即时性。网络节点位置的频繁变化,致使实时获取节点位置信息变得不实际,仅在感知到事件后获取自身位置信息即可。

- 离散性。在动态网络中,节点运动不规则,因此节点无需存贮自身的历史位置信息。

- 周期性。定位精度的确保需要对预测的位置进行修正,因此动态定位是一个周期性的迭代过程。

3 静态定位

传感器网络节点定位的发展大致经历了两个阶段:紧密耦合型和基于基础的定位以及松散耦合型和无需基础设施的定位^[17]。在整个发展过程中,绝大多数算法都是针对静态传感器网络而言的^[1-10],文献[17]对一些典型的算法进行了详细的分析。近期,静态定位算法的研究有了新进展,提高定位精度、节约能耗、确保网络安全已备受关注。

定位精度的提高能够提高网络的性能,有利于后继任务的实施,目前的算法主要从硬件^[2]和测距技术^[3,4]两个方面考虑精度问题。传感器网络受能量的限制,如果一种定位机制的能量消耗较高,那么在实际应用中是不可行的,毕竟节点定位不是 WSN 应用的最终目标^[5]。在特定应用中,信息的机密性与网络的健壮性是第一要素,从安全角度出发,文献[6-8]给出了相关的安全策略,在定位过程中有效地抑制了蠕虫攻击(Wormhole attack)和女巫攻击(Sybil attack)。定位精度等性能的提高是以能量消耗和硬件的支持为代价的,如何均衡各种要素也是目前关注的问题^[9]。此外,研究者们也提出了新的定位思路,如 Kezhong Liu 等在图论的基础上提出了一种基于定位协作体的定位机制^[1],有一定的参考价值。典型的算法详细介绍如下。

(1)基于 LCB 的定位算法^[1]

文献[1]提出了定位协作体(Localizable Collaborative Body,LCB)的概念,即通过多跳锚节点来协助定位未知节点,克服了需要 3 个邻居锚节点定位的苛刻条件,它是一种基于图论的距离相关的定位算法。该算法首先将网络构造成一棵 BN-tree,之后将 BN-tree 分解成不同的 LCB,进而达到定位的目的。

该算法利用 BN-tree 构造 LCB,减小了定位过程的计算量和通信量。算法的定位误差与测距误差呈正相关性,实验表明,测距误差在 20%之内时,定位精度能够满足大多数应用的需求。此外,该算法可以扩展到三维空间中。

(2)HiRLoc 定位算法^[6]

HiRLoc(High-Resolution Robust Localization)是一种距离无关的定位算法。它通过改变锚节点信号的传送距离和方向,逐步缩减锚节点信号的重叠区域来定位未知节点。其原理如图 1 所示。

未知节点间无需通信,定位精度的提高是各种定位信息整合的结果,并非通过提高锚节点密度或增加硬件的复杂度。通过由物理媒介所提供的通信距离限制与用来保护锚节点信号传输的密码原语的结合,有效地防范了蠕虫、女巫以及针对 WSN 的其他网络实体的攻击。

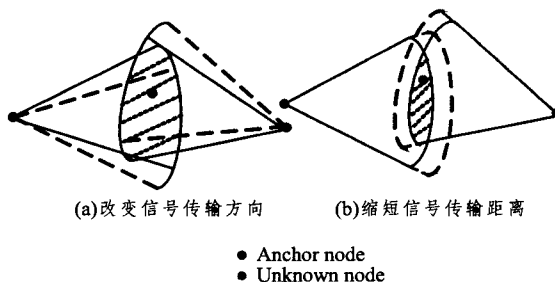


图 1 HiRLoc 定位原理示意图

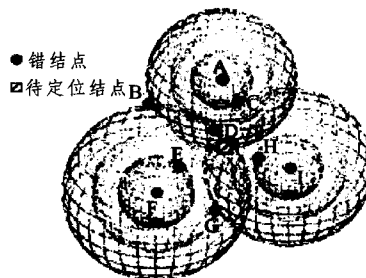


图 2 APIS 定位算法示意图

(3)APIS 定位算法^[18]

文献[18]将 APIT 算法从二维扩展到了三维空间,提出了一种基于球壳交集的三维定位算法 APIS。APIS 是一种距离无关的定位算法,其基本思想是:以一个锚节点为球心,分别以其到邻近锚节点之间的距离为半径画球,把整个空间划分为大大小小的同心球体。待定位的节点通过判断自己是否在这些同心球体区域内,最终找到包含自己的最薄的一层球壳。以不同的锚节点作球心找到一系列这样最薄的球壳,最后将这些球壳的交集作为待定位节点最可能存在的小区域,取这个小区域的重心坐标作为这个节点的位置,如图 2 所示。

APIS 算法的优点是只需要锚节点广播消息,其他节点不需要通信,因此减少了网络通信的开销,节省了能量;只需要两点间的相对大小关系,无须测距,无须额外的硬件支持。但 APIS 算法也存在着一些不足,如节点采用本地存储信息,每个节点都维持着三个表,加大了节点的成本;与锚节点的密度密切相关,如果锚节点密度小,将导致定位精度下降;对锚节点的要求较高,要具有很高的能量储备以及通信能力;定位精度还有待提高。

上述 3 种定位算法都是针对不同目标而设计的,在多种条件下衡量,没有一种算法是最优的。基于 LCB 定位算法虽然在通信量、计算量和硬件方面能够做到适中,而且具有良好的扩展性,但其定位精度受锚节点密度和测距误差影响较大。

HiRLoc 虽然解决了恶劣环境下节点定位问题,但需要大量的计算开销。APIS 实现了空间定位,但定位精度与锚节点密度有关,而且对锚节点的硬件要求较高。

表 1 典型静态定位算法性能比较

算法 指标	基于 LCB 定位算法	HiRLoc 定位算法	APIS 定位算法
应用维度	二维,可扩展到三维	二维	三维
计算开销	适中	大	大
通信开销	适中	小	小
定位精度	与锚节点密度、测距误差有关	适中	与锚节点密度有关
硬件要求	适中	低	高

4 动态定位

目前关于 WSN 动态定位算法的研究还处于初期阶段,算法较少^[11,13-15]。现有的算法一般有两个阶段:一是位置预测,锚节点与未知节点进行通信,通过信息的交换来初步预测未知节点的位置;二是位置修正,锚节点通过更新位置信息,对先前预测的位置进行修正。下面将对典型的算法进行分析。

(1)MCL 定位算法^[13]

Lingxuan Hu 等人参考移动机器人中的 MCL 思想,提出了适合 WSN 的动态定位算法 MCL(Monte Carlo Localization),指出根据节点移动位置的预先分布概率,节点的移动性反而可提高定位精度,减小定位代价。该定位过程包含预测和过滤两个阶段。在预测阶段,节点根据预存的样本和移动信息,利用分发转换装置预测自身的可能位置;在过滤阶段,从可能位置信息集中去除与观测不一致的信息。

该算法即使在存储条件有限、锚节点密度低、网络传输极其不规则的条件下,也能够提供精确的定位。但算法也存在不足,如当节点无法获得可能的位置时,预测和过滤就会反复地执行;一旦样本过滤失败,此算法将陷入死循环。

(2)DLS 定位算法^[14]

在 DLS(Dynamic Localization Scheme)算法中,锚节点周期性地、无冲突地广播仅含自身 ID 的定位消息。当事件发生时,未知节点接收定位信息并将接收到的锚节点 ID 和信号强度封装成一个反馈分组,最后以多跳的形式转发给最近的锚节点。当锚节点接收到反馈分组后计算未知节点到各个锚节点之间的距离,最后利用三角测量计算未知节点的位置。

DLS 算法的位置计算集中在锚节点,减少了未知节点的能量开销以及内存的消耗,但同时也提高了锚节点的硬件需求;锚节点能够根据移动节点的请求来改变发射频率,增强了网络的连通性,同时也能够应对网络节点不同的移动速率;该算法采用了反馈应答式的传送方式,因此需要严格的时间同步;要保证锚节点密度以使未知节点获取足够的信息来定位自身。

(3)DRL 定位算法^[15]

DRL(Dynamic Reference Localization)是 DV-Hop 的一种改进。该算法通过周期性地执行三角测量和锚节点更新对网络节点定位。这两个过程是相互独立的,相比之下,锚节点更新的执行频率应该稍微小些,以减小网络的负担。

三角测量

一个未知节点必须获得三个锚节点才能够唯一确定自身的位置,如图 3 中 a 所示。然而,DRL 采用了限定锚节点的广播域以减小网络的负担,这导致并非所有节点都能够获得

三个或以上锚节点信息。针对获得锚节点信息数的不同,算法采取了不同的措施:获取两个锚节点的情况下,采用两个锚节点圆和一个速率圆来进行三角测量,如图 3 中 b 所示,速率圆的圆心是待测节点的先前估计位置,半径是单位时间内该节点移动的距离。获得一个锚节点的情况下,将交叉区域的中心与当前预测的位置平均值作为节点的位置,前者采用锚节点圆与速率圆的两个交点的平均值,后者采用当前的最近两次位置,如图 3 中 c 所示。

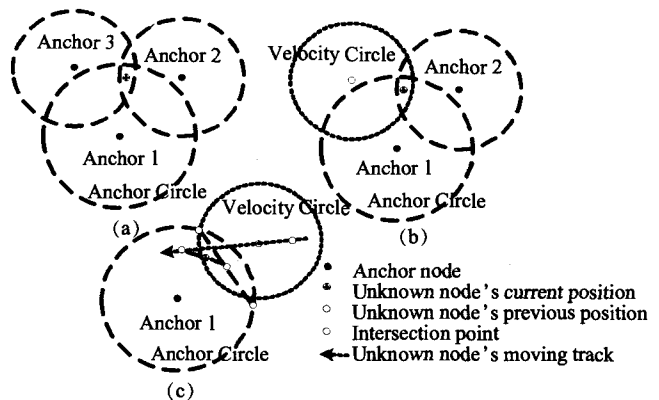


图 3 DRL 定位算法锚节点个数处理

对于未获得锚节点的情况,DRL 采用了一个智能备选(Intelligent Backup)方案。如果一个节点不在锚节点的广播区域内,则可向它的邻居节点寻求锚节点的信息,如果邻居节点也没被锚节点的广播区域所覆盖,则它继续寻求下一级邻居节点,直至找到具有锚节点信息的邻居节点,如图 4 所示。

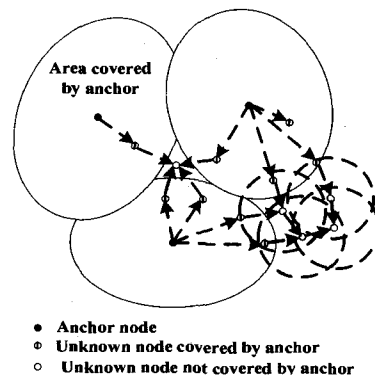


图 4 DRL 定位算法智能备选方案

锚节点更新

每个锚节点都有自己的 hop-distance 和 flooding-hop 值,

用以反映节点当前周围的情况。对于随机部署的移动网络来说,动态地更新锚节点的信息有利于提高节点的定位精度。Hop-distance 的值是采用与该锚节点相邻的其他锚节点的距离的算术平均值, flooding-hop 是锚节点广播消息的跳数上限值,每传送一跳,值减小 1 直至为 0 停止。两个值可以根据网络环境而动态调节,当网络节点密度高时,可以减小 flooding-hop 的值以减少能量的消耗,当网络密度低时可以增大 flooding-hop 的值来维持足够的覆盖率。

DRL 算法适用于室外的移动传感器网络,提供了未知节点在没有获知足够锚节点情况下定位自身的解决方案,在锚节点密度、未知节点密度、节点移动速度等不同指标下均表现出了稳定良好的定位精度,无需额外的测距硬件支持。但 DRL 也存在着一些不足之处,如在解决锚节点不足的方案中,假设节点匀速直线运动;在节点未被锚节点的区域所覆盖时,邻居节点也不在覆盖区域中,便会进行大量的运算等。

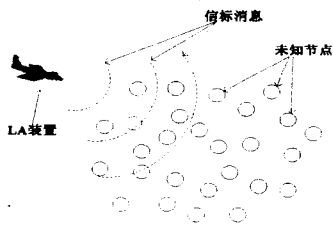


图 5 Landscape-3D 定位示意图

(4)Landscape-3D 定位算法^[16]

Liqiang Zhang 等人提出一种 Landscape-3D 空间定位算法,该算法采用 LA(Location-assistant)装置周期性地广播其自身的位置信息,未知节点通过接受这些信息并通过 RSSI 测量与 LA 之间的距离来确定自身的位置,如图 5 所示。算法作了如下的假设:LA 能够在整个网络中移动;LA 在移动过程中能够实时获知自身的位置信息(通过 GPS 定位或者是预先设定运行轨迹);LA 能够向整个网络广播信标消息,信标消息包括 LA 的当前位置以及传播信号强度。LA 定位过程如图 6 所示为提高测距精度,该算法采用了 UKF(Unscented Kalman Filter)校准机制。Landscape-3D 算法的核心是状态预测和更新的迭代过程,这个过程可以是即时的也可以是离线的。当以离线方式进行处理时,每个节点首先收集

信息(锚节点位置以及与锚节点之间的距离),之后执行 UKF 校验循环,通过渐进地增加观察信息来更新估计的位置。这种离线方式在迭代的过程不受时间限制,因此更适合 WSN 小计算量的要求,但每个节点需要存储大量的观测信息。

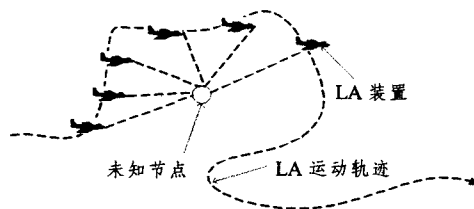


图 6 LA 装置定位过程

Landscape-3D 的最大特点就是不依赖于节点的密度与网络的拓扑结构,同时未知节点之间无须通信,减少了通信开销。每个节点单独计算自身位置,因此算法的计算复杂度与网络的规模无关。但 Landscape-3D 算法的即时迭代过程虽对节点的硬件要求不是很高,但计算量较大,而离线迭代过程虽然降低了节点的计算量,但对节点的存储能力有较高的要求;整个定位过程主要依靠 LA 设施,对 LA 设施有很高的要求。

对于动态定位算法来说,MCL 和 DRL 算法以牺牲计算量来获取较高的定位精度,相比之下,DLS 算法的计算量较小,但其通信量较大。在这些算法中,除 Landscape-3D 外,MCL,DLS 和 DRL 定位精度依赖于锚节点的密度,且定位精度与锚节点密度成正相关性,此外,定位精度还受节点移动速率的影响。详细比较参照表 2。

5 存在的问题与进一步研究

随着 WSN 技术的发展,越来越多的领域开始探索 WSN 技术的应用,统一武器制导网络便是其中之一。统一武器制导网络是通过对多种机载武器进行统一、高速、安全可靠的制导,实现空空/空面信息传输与控制的军事作战系统。对于统一武器制导网络来说,所有节点都部署在三维空间中,而且所有节点都是频繁移动的。对于这类应用,WSN 定位问题在以下几个方面还有待进一步深入研究。

表 2 动态定位算法性能比较

算法 指标	MCL	DLS	DRL	Landscape-3D
应用维度	二维平面	二维平面	二维平面	三维空间
计算开销	大	小	大	适中
通信开销	小	大	大	小
定位精度	高	与锚节点密度有关	与锚节点密度有关	适中
硬件要求	低	高	低	高

(1)节点移动性

节点的动态变化导致网络的拓扑结构变化频繁。若采用静态定位算法中的定位机制,则需要频繁地更新节点的位置信息,这将消耗系统的大部分资源,同时也会降低网络快速反应的能力以及定位精度^[12]。移动定位虽在机器人技术和普适计算中得到了广泛研究,但这些领域中器件的内存大、CPU 的计算能力强,因此这些方案不能够直接移植到 WSN 中。

目前学术界已提出一些针对 WSN 的动态定位算法,但这些算法普遍存在着计算量大、定位精度不高等特点。此外,这些算法大都是针对二维平面应用而设计的,即使针对三维应用,也都是借助于固定锚节点或基础设施来定位移动的未

知节点,不适用于统一武器制导网络这种所有网络节点都移动并且不方便构建基础设施的空间应用。

(2)节点空间性

统一武器制导网络的传感器部件部署在飞机和导弹上,这就不得不考虑三维空间中网络的配置问题。在三维空间中,由于节点密度不均匀,拓扑结构不规则以及受障碍物的影响,要使每个节点都能够获得足够的临近锚节点是不实际的。因此,如何有效地进行空间定位成为目前亟待解决的问题。

目前针对 WSN 而设计的三维定位算法寥寥无几,而大多数定位算法也很难扩展到三维。仅存的三维定位算法有两

(下转第 63 页)

传感器网络,这两种不同类型的传感器发送不同长度数据包以及拥有不同初始能量。本文对以前提出的适合异构网络的路由协议 REECR 做了改进,提出了 D-REECR 路由算法。这种算法将簇头间的距离也作为选择簇头的依据之一,使得簇头能在整个网络中比较均匀地分布,以达到各个簇大小基本一致从而平衡节点的能量消耗以延长网络生命的目的,并提出了簇头间距离的一种计算方法。仿真结果显示,提出的 D-REECR 算法比 REECR 算法能量更有效,并且方法简单易行,同时提出的计算簇头间距离的方法既提高了能量效率,也达到了平衡节点能量消耗的目的。

参考文献

- [1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40

(上接第 50 页)

种解决方案,一是依靠与锚节点进行信息交换,通过三角计算等方法来获取未知节点的位置,如 APIS 算法,它是一种交互式定位机制,在很大程度上依靠锚节点的密度;另一是通过基础设施在网内动态地广播消息以进行定位,如 Landscape-3D 算法,这是一种被动式定位,定位主要依靠基础设施。对于交互式定位来说,由于空间障碍物或环境条件等干扰的存在,并不是所有未知节点都能够获得足够的邻近锚节点信息,即使获得足够锚节点信息,如何有效地解决多解问题也是一个难点。对于被动式定位来说,定位成败完全取决于基础设施,一旦这个基础设施受到干扰或破坏,整个网络将处于瘫痪状态,对于军事应用来说,更存在着一些安全隐患。

(3) 网络可靠性

对于统一武器制导网络等空间应用来说,传感器节点工作在露天环境中,受强烈的日照以及雨淋等环境因素的影响,势必导致节点的失效,在确保硬件性能的同时,如何快速重组网络并定位自身要求定位机制具有一定的灵活性和智能性。此外,如何抵抗网络攻击,在危险环境下确保定位信息的准确性也是至关重要的。

(4) 性能评价模型

WSN 自身定位算法的性能直接影响其可用性,至关重要。网络的动态性和空间性加大了网络自身定位的难度,同时也使得算法的性能评价变得复杂。节点的移动性导致了定位的周期性,定位算法执行的周期,也即广播定位分组的频率影响到网络通信量,进而影响到能量的消耗。此外,空间中,由于障碍物等外界环境因素的影响,无线信号的传输变得不规则,如何有效地评价信号传输模型对算法的精度有着直接影响。因此,在考虑网络的移动性和空间性等因素的同时,如何对算法的评价标准进行模型化和量化是一个需要深入研究的问题。

结束语 普遍网络化孕育的无线传感器网络是一种新的信息获取和处理技术。作为重要的共性支撑技术之一,节点自定位问题极具研究价值。本文从静态和动态角度出发,综述了 WSN 节点定位的最新研究进展,并对典型的算法进行了分析比较。最后分析了统一武器制导网络等空间应用中节点定位的难题,初步探讨了三维移动定位问题,以期能为未来的研究提供一个良好基础。对于统一武器制导网络等应用来说,如何充分考虑节点的移动性和空间性,设计出有效的定位算法是一件具有挑战的事情。

- (8):102-114
 卿利,朱清新,王明文. 异构传感器网络的分布式能量有效成簇算法. *软件学报*, 2006, 17(3): 481-489
 [2] Li Xiaoya, Huang Daoping, Yang Jian. Energy Efficient Routing Protocol Based on Residual Energy and Energy Consumption Rate for Heterogeneous Wireless Sensor Networks//第 26 届中国控制会议. 张家界, 中国, Vol. 5, July 2007: 587-590
 [3] Heinzelman W R, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks//Proc. 33rd Hawaii Inter Conf. on System Science. Jan. 2000: 10-20
 [4] Mhatre Vivek P, Rosenberg C, Kofman D, et al. A Minimum Cost Heterogeneous Sensor Network with a Lifetime Constraint. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2005, 4(1)
 [5] Duarte-Melo E J, Liu Mingyan. Analysis of Energy Consumption and Lifetime of Heterogeneous Wireless Sensor Networks //Proceedings of IEEE Globecom. Taipei, Taiwan, November 2002
 [6] Kim H, Kim S W, Lee S, et al. Estimation of the Optimal Number of Cluster-heads in Sensor Network //9th International Conference on Knowledge-based & Intelligent Information & Engineering Systems. Melbourne, Australia, 2005: 87-94

参考文献

- [1] Liu Kezhong, Wang Shu, et al. Efficient Localized Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks. *Computer and Information Technology*//The Fifth International Conference. Sept. 2005: 517-523
 [2] Karalar T C, Yamashita S, et al. A Low Power Localization Architecture and System for Wireless Sensor Networks. *Signal Processing Systems*//IEEE Workshop. 2004: 89-94
 [3] Li Xiao, Shi Hongchi, et al. A Partial-range-aware Localization Algorithm for Ad-hoc Wireless Sensor Networks. *Local Computer Networks*//29th Annual IEEE International Conference. Nov. 2004: 77-83
 [4] Li Xiao, Shi Hongchi, et al. A Sorted RSSI Quantization Based Algorithm for Sensor Network Localization. *Parallel and Distributed Systems*//Proceedings of 11th International Conference. Volume 1, July 2005: 557-563
 [5] Feng Haoran, Yuan Ruixi, et al. An Energy-Efficient Localization Scheme with Specified Lower Bound for Wireless Sensor Networks. *Computer and Information Technology* //The Sixth IEEE International Conference. Sept. 2006: 232-232
 [6] Lazos L, Poovendran R. HiRLoc: High-Resolution Robust Localization for Wireless Sensor Networks. *Selected Areas in Communications*, *IEEE journal*, 2006, 24(2): 233-246
 [7] Li Zang, Trappe W, et al. Robust Statistical Methods for Securing Wireless Localization in Sensor Networks. *Information Processing in Sensor Networks*. //Fourth International Symposium. April 2005: 91-98
 [8] Zhang Yanchao, Liu Wei, et al. Secure Localization in Wireless Sensor Networks//Military Communications Conference. IEEE, Oct. 2005, 5: 3169-3175
 [9] Pandey S, Prasad P, et al. Localization of Sensor Networks Considering Energy Accuracy Tradeoffs. *Collaborative Computing: Networking, Applications and Worksharing*// 2005 International Conference. Dec. 2005: 1-10
 [10] Liu Kezhang, Wang Shu, et al. On Connectivity for Wireless Sensor Networks. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*//2005 International Conference. Volume 2, Sept. 2005: 879-882
 [11] Huang Rui, Zaruba G V. Static Path Planning for Mobile Beacons to Localize Sensor Networks//Pervasive Computing and Communications Workshops, Fifth Annual IEEE International Conference. March 2007: 323-330
 [12] Yuan L, Chen Weidong, et al. A Review of Control and Localization for Mobile Sensor Networks. *Intelligent Control and Automation*//2006. The Sixth World Congress. Volume 2, June 2006: 9164-9168
 [13] Hu Lingxuan, Evans D. Localization for Mobile Sensor Networks. *Mobile computing and networking, USA*, Sept. 26-Oct. 1, 2004
 [14] Chen Xun, Han Peng, et al. A Viable Localization Scheme for Dynamic Wireless Sensor Networks. *Computer and Computational Sciences*//First International Multi-Symposiums. Volume 2, April 2006: 587-593
 [15] Hsieh Y, Wang K. Efficient Localization in Mobile Wireless Sensor Networks. *Sensor Networks, Ubiquitous and Trustworthy Computing*//IEEE International Conference. Volume 1, June 2006: 292-297
 [16] Zhang Liqiang, Zhou Xiaobo, et al. Landscape-3D: A Robust Localization Scheme for Sensor Networks over Complex 3D Terrains. *Local Computer Networks*//Proceedings 2006 31st IEEE Conference. Nov. 2006: 239-246
 [17] 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): 857-868
 [18] 吕良彬,曹阳,等. 基于球壳交集的传感器网络三维定位算法. *北京邮电大学学报*, 2005, 29 (Sup.): 48-51