无线网络定位综述

钱志鸿" 孙大洋" LEUNG Victor²⁰

1)(吉林大学通信工程学院 长春 130012)

²⁾(英属哥伦比亚大学电子与计算机工程系 温哥华 加拿大 V6T 1Z4)

摘 要 结合无线网络技术,从无线网络定位数学模型的角度对定位问题进行了统一的形式化描述,该描述涵盖测量与距离估算技术、二维空间或多维空间中的定位映射关系以及绝对定位和相对定位的定位需求;论文由模型映射关系是否存在的问题引出了无线网络定位的可行性问题,以唯一实现理论以及刚性图理论作为无线网络定位的可行性模型并对其进行了分析总结;在数据层面对定位系统的测量技术以及信息采集技术进行了分析,将距离测量技术,角度测量技术以及距离估算技术从数学模型角度统一为有用信息采集,并将能用于定位的信息涵盖进来,以此作为定位模型优化与扩展的基础;单目标网络的定位算法较多,但其数学本质上是对同一类目标函数不同的求解方法,该文从数学模型及其优化方法的角度对其进行了分析,总结了不同解法的相似效果;与单目标网络定位不同,多目标网络定位问题虽然定位模型统一,但其求解方法却不尽相同,该文对半定规划方法、多维标度方法以及非线性映射曲元分析方法进行了总结;在对数据采集技术,定位方法进行了总结后,该文系统分析了信息集合对定位算法的影响,从功能上将各种定位技术分为信息采集技术、定位可行性理论、定位模型以及定位优化技术,提出了系统设计层面定位性能提高的主要设计思路,从定位方案的选取上将优化技术看成定位系统中的可选项,基于定位优化技术的相对独立性,提出了定位方案的分治策略;随后该文对定位评估指标中的误差指标和统计学指标进行了总结,以此作为定位性能评估的主要手段;最后提出了无线网络定位领域理论及技术所面临的问题与挑战.

关键词 无线;网络;定位;定位模型;无线传感器网络;物联网 **POI** 号 10.11897/SP.J.1016.2016.01237

A Survey on Localization Model in Wireless Networks

QIAN Zhi-Hong¹⁾ SUN Da-Yang¹⁾ LEUNG Victor²⁾

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012)

²⁾ (Department of Electrical and Computer Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, Canada V6T 1Z4)

Abstract In this paper we discuss the models of localization in wireless networks with the use of wireless technologies. A universal formal description of wireless localization is proposed from the standpoint of mathematical models, which can cover the technologies of ranging measurement and ranging estimation, the mapping function from original data to localization result in 2 dimensional or multi-dimensional space, and relative localization or absolute localization. Whether the mapping function of the formal description exists or not means the feasibility of wireless localization, and this is the problem of unique realization or the rigid graph, so we give a deep analysis and summary of the unique realization doctrine and the rigid graph doctrine afterwards and point out that these two doctrines are in fact the same in describing localization feasibility problem. Then, from mathematical standpoint, various information collecting techniques are summarized as working information collecting in mathematical models, which includes distance ranging technologies such as TDoA, angle measuring technologies (AoA) and distance estimating technologies. The description of working information collecting can cover other information that can be used to do

the localization and can be viewed as the basis to carry out optimization or extension for wireless localization. After that, we focus on single-target localization model in wireless networks, Although various solutions for single-target localization are proposed, they all comply with the same localization model, which has more than n+1 beacons in n dimensional space and only one to-be-located node. We summarize the solutions of single-target localization and point out that some of the solutions are nearly the same essentially. Unlike single-target localization, there are various different solutions for multi-target localization. We summarize the methods of Semidefinite Programs, Multidimensional Scaling and Curvilinear Component Analysis. Then the impact of working information set for wireless localization is analyzed, which can provide ideas to optimize localization performance in the systematic level. In the aspect of functionality, various localization technologies can be classified into information collecting technology, feasibility theory of localization, localization model and localization optimizing technology. With these technologies we give a system designing suggestion for localization performance in the systematic view. We can do the localization in a divide-and-conquer manner because some localization technologies are independent to each other. Subsequently, we summarize the assessing criterions for wireless localization including the definition of precision and accuracy, Cramer Rao bound, Circular Error Probability (CEP), Dilution of Precision (DOP) and finally we state the problems and challenges with new rapidly growing requirements.

Keywords wireless; networks; localization; localization model; wireless sensor networks; Internet of Things

1 引 言

随着 Bluetooth、Zigbee、Wi-Fi 等无线技术的不 断进步以及 Ad hoc 网络、无线传感器网络、物联网 的蓬勃发展,无线网络已广受学界瞩目,而位置服务 信息被普遍认为是一项必不可少的关键技术[1-3]. 位 置服务[4]信息有助于对网络中突发事件进行事前预 警、事中决策以及事后处理. 例如, 无线网络位置服 务应用于煤矿井下定位,可以在灾难发生前预知危 险区域,灾难发生时通知被困人员根据所获得的地 理信息选择一条安全的路径撤离,灾难发生后通过 定位信息进行准确快速的营救.位置服务信息还可 以为系统用户提供直观的地理信息以便决策,提升 用户体验. 如无线网络应用于日常办公,工作人员可 以使用定位功能很容易地找到一台最近的可用打印 机. 位置服务信息对无线网络的贡献远不止如此,它 无论是在静态网络中还是在具有移动性特征的网络 中都有着广泛的需求[5],而基于位置的服务要以定 位技术为基础[6]. 因此,定位技术在无线网络进一步 发展中的作用不可忽视,定位技术的研究仍具有十 分重要的意义.

无线网络中定位问题的研究涉及到许多技术^[5] 以及理论问题^[2],国内外科研工作者为此做出了大 量的贡献.已有学者对现有技术进行了总结分析,从 测距的角度将定位分为基于测距和基于非测距的定 位算法[7];文献[1]将该分类扩展,使用测量技术将 距离测量与角度测量统一起来;又有研究将无线网 络中的定位问题按照主动被动进行分类[8];也有学 者对网络定位进行了单目标网络定位与多目标网络 定位的分类[9-11];文献[12]引入了移动性对定位问 题进行分类,对移动网络定位进行了综述.在诸多定 位问题研究中,大量文献在进行定位问题研究时需 要设锚点,然后根据获得的锚点相关信息进行待定 位点的定位. 关于锚点这一术语,国内外文献的表述 不尽相同,中文文献中所提到的"锚点","信标节点" 与外文文献中提到的"anchor node","beacon node" 以及"landmark"含义一致,都是具有已知坐标信 息节点的不同表述. GPS(Global Position System) 的卫星坐标即可看作是一种锚点, WSN (Wireless Sensor Network)中的锚节点也是一种锚点. 如果不 考虑测距技术,这两种场景下的定位技术在数学模 型方法上可以归为一类,都可采用多边测量法的定 位模型进行定位,都可归为单目标网络定位类别,其 差别在于测距技术不同,对信息的处理不同,应用范 围不同,精度不同,在使用不同技术手段获得了距离 信息或距离方程组后,其求解位置的数学模型是相 同的. 无线网络定位中的其他问题也具有同样的相

似性,如有大量论文讨论如何使用多边测量法进行定位,而其核心内容是如何求解由多边定位模型得到的定位方程组,是针对同一数学问题的不同求解方法,其在定位模型上均属同一类别.因此,本文即从定位数学模型这一视角出发,将定位问题的解决方案进行统一分类,对国内外的研究现状进行综述,以期待对现有的理论与技术进行分析总结,厘清定位本质问题脉络,为定位技术及理论的研究、应用与发展提供指导性建议.

论文以定位数学模型切入主题,之后详述了定 位所需的测量技术,对无线网络的定位模型进行了 分类讨论,在此基础上对无线网络定位的影响因素、 优化方法、性能评估方法进行了讨论,最后总结了 全文. 本文第2节从系统模型角度给出定位问题的 统一形式,对定位系统的输入输出问题进行讨论,针 对定位系统的可行性问题,从可行性数学模型的角 度对定位唯一性理论进行分析;第3节讨论定位问 题的测量与距离估算技术,通过该问题的讨论,从广 泛意义上可将定位的测量模型与定位的计算模型分 离,单独进行研究;第4节与第5节对单目标网络定 位模型与多目标网络定位模型进行总结,在对多种 计算方法进行本质分析的基础上,从数学模型的角 度进行分类,指明定位数学模型的核心问题;在讨论 定位的总体系统模型,可行性模型,测量与计算模型 后,论文第6节对定位系统采集信息对定位算法的 影响进行分析,总结提高定位信息量的主要思路; 第7节根据前述章节的讨论从宏观上将定位问题划 分为定位模型,信息采集,定位优化三大问题,描述 三者之间的关系,提出定位系统分而治之的思路;第 8 节讨论定位的性能评估模型;第 9 节对无线网络 定位进行总结与展望.

2 定位问题的数学模型

2.1 定位问题的数学描述

无线网络定位问题从应用的角度可以看作是采用各种无线测量与估算技术进行相关信息采集,对获得的信息进行处理,以得到待求点位置坐标的求解过程.从数学模型的角度,定位问题需要解决的是采集信息(包括系统已知信息和可测数据,可测数据又可分为与时间相关的数据和与时间无关的数据)集合 X 与位置坐标集合 Y 之间的映射关系问题, f: $x \rightarrow y$, 如图 1 所示.

一般来说,图 1 集合 X 中的每个元素可以包含定位的拓扑信息,锚点(坐标已知点)的位置信息,网

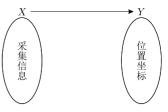


图 1 定位问题数学描述

络节点历史坐标信息,空间中两点的测距信息,网络中各点连通度信息,各种信息采集设备可提供的采集信息,甚至也可以包含某点是否在某区域内的逻辑值的布尔表达.对于图 1 中的位置坐标的空间表示,根据实际应用的不同,可以是二维空间,三维空间甚至是多维空间,但这仅仅是在数据维度上有所区别,从数学模型的角度看并无二致,因此,目前国内外对无线定位问题的研究大都基于二维空间展开,部分学者将研究场景设置在三维空间[13-17],也有学者给出了不同维度空间定位模型的通用形式[18-19].

2.1.1 定位的可行性问题

针对图 1 所示的定位数学模型,研究人员首先必须面对的一个问题是已有信息集合 X 到位置坐标集合 Y 的函数映射是否存在,换言之,给定一个信息集合 X 中的一个数据采集 x ,是否存在唯一的位置坐标 y 与之对应.事实上,该问题对应于定位领域"节点定位是否具有唯一性的问题",针对该问题的研究早已起步,本文 2.2 节将对定位可行性研究的理论进行总结分析.

2.1.2 定位模型的采集信息集合

就定位所采集的信息而言,许多信息都将对定位有所贡献,常见的有锚点信息,待定位点间的测距信息以及待定位点与锚点间的测距信息,时间差信息,节点移动的瞬时速度与角度信息等,另外网络连通性信息,待定位点是否在某一区域内的布尔信息等也将为定位提供有益的信息量.

节点间的连通性信息是一系列的布尔信息,信息量小,定位不精确,但在某些对定位精度要求不高的场合,该信息也可以对定位提供帮助,因此采集信息的数据精度对定位结果有着重要的影响.这些信息中,除锚点位置外,最重要的信息量大的信息莫过于测距信息,因此本文第 3 节对信息采集进行分析,综述各种测量与估算技术.

2.1.3 定位模型的目标集合

就目标集合而言,定位问题有两种目标^[20-21],一种是得到待定位点符号位置,例如"第一阶梯教室", "厨房","天安门广场"等;另一种是得到待定位点的坐标位置,对应某空间中坐标值,例如"东经122°18′23″, 北纬 47°39′17″","(123.5,248.2)"以及相应的欧式坐标等.值得一提的是,坐标位置和符号位置的关系并非相互独立的,坐标位置可以和已有地理信息数据库结合将坐标位置转换为符号位置,而相关定位技术也可以根据多个符号位置得到近似的坐标位置结果,利用已有的符号位置数据库或地理信息系统,也可以对坐标位置的精度进行矫正.

待定位点的坐标位置又可分为相对坐标[19]和绝对坐标两种.定位系统中,相对坐标的取得可以不需要锚点,而对于绝对坐标的计算锚点是必需的.由于相对坐标有可能成为求解绝对坐标的中间值,因此本文主要对绝对坐标定位进行讨论.

2.2 定位问题的唯一性理论

将无线网络定位问题建模为一个数学问题,首 先面临的一个挑战就是定位的唯一性问题.以移动 网络定位为例,移动终端如果仅获得其在某基站的 信息,仅能判断该移动终端在基站覆盖范围之内,并 不能确定其更精确的位置.又如,二维空间中,如待 定位节点只获得了一条到锚点的测距信息是无法进 行定位的,定位精度更无从谈起;如待定位点可以获 得到两个锚点的测距信息,则会产生两个可能的定 位解;只有当待定位点获得到3个不共线的锚点的 测距信息时,待定位点的位置才可以唯一确定.可 见,定位的唯一性问题是定位算法进行定位以及进 行定位精度评估的可行性保证.

现有用于定位可行性问题的理论有图的唯一实现理论和刚性图理论,其定义均可通过图实现的等价与全等的定义来完成. 图的实现问题可以描述如下:对于由顶点集V和边集E构成的图G(V,E),每一条边关联有一个实数,现要为每一个顶点分配坐标,使得任意两个相邻顶点间的欧式距离与其边相关联的实数相等. 本文采用文献[22]中的术语对该问题进行形式化描述.

设 G=(V,E) 为由点集 V 和边集 E 构成的无向图. d-维欧式空间中的构架(framework)表示为 (G,p),其中 p 是由点集 V 到 d-维欧式空间的一个映射 $p:V \rightarrow R^d$.

定义 1. 等价 (equivalent). 给定 d-维欧式空间 X 中的构架 (G,p) 和构架 (G,q) , (G,p) 和 (G,q) 被称作是等价 (equivalent)的,如其满足:

 $||p(u)-p(v)|| = ||q(u)-q(v)||, \forall uv \in E$ (1) 其中||・||表示欧式距离.

定义 2. 全等(congruent). 给定 d-维欧式空间 X 中的构架(G,p)和构架(G,q),(G,p)和(G,q)被称作是全等(congruent)的,如其满足:

 $\|p(u) - p(v)\| = \|q(u) - q(v)\|, \ \forall u, \forall v \in V$ (2)

定义 3. 唯一实现(unique realization). d-维欧式空间 X 中的构架(G, p),如果对于任意一个等价于(G, p)的构架都全等于(G, p),那么(G, p)被称作一个唯一实现.

可见,网络定位的唯一性问题即对应于唯一实现问题. 刚性图定义及理论和唯一实现理论具有同一数学本质,而大多数文献采用全局刚性图(globally rigid)的表达方式^[23]. 相关文献中的数学描述的定义不尽相同,有的采用 bar-frame 的定义形式,有的采用 rods-frame 的表达方式,有的采用构架的形式,但其本质上都是为了引出刚性图的定义. 文献 [24-26]采用连续变换(continuous transformation)定义刚性图,文献 [26]和文献 [22]等都采用了构架(framework)的定义,而文献 [22]对于刚性的定义表述更加严谨.

定义 4. 刚性(rigid). 构架(G,p)是刚性的,如果存在 ε >0 使得以下命题成立:对于任意的 $u \in V$, (G,q)等价于(G,p),并且 $\|p(u)-q(u)\| < \varepsilon$ 可以推出(G,q)全等于(G,p).

但是,刚性图的定义只是在连续变换意义下的局部唯一,并不能保证结果的全局唯一性. 如图 2 所示,在二维欧式空间中,图 2(a) 所表示的构架是全局刚性的,而图 2(b) 所表示的构架是刚性的,因为只是在小扰动的约束下才能由等价推出全等性质,而在不考虑连续扰动的情形时,点 C 沿 AB 翻转即可得到与原构架不全等的构架. 在三维空间中,图 2 (a) 所示构架仍然是全局刚性的,而图 2(b) 所示构架不再是刚性的,因为存在连续的扰动使得 C 可以连续绕 AB 旋转至 C',得到图 2(c),而保持 AC,BC 的距离不变.

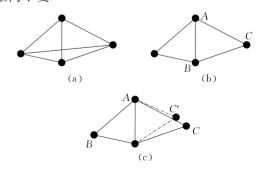


图 2 刚性图与全局刚性图

定义 5. 冗余刚性(redundantly rigid). d 维空间中的构架(G, p)是冗余刚性的,如果(G, p)在删除任意一条边后在 d-维空间中仍是刚性的[$^{22-23}$].

对于刚性图判定的研究,文献[27]给出了结论: **定理 1.** 设(G,p)是 d-维空间中的构架,它是

- 一个至少包含 d+1 顶点的全局刚性构架,那么:
 - (1)图 G 是顶点(d+1)-连通的;
 - (2) 构架(G, p)在d-维空间中是冗余刚性的.

这里,一个图被称为是顶点d-连通的,如果至少要删除d个顶点才能是图G剩余的节点不连通[23].

对于刚性图理论,Saxe证明了,即使是在一维 空间中,全局刚性图的判定问题也是 NP 难问 题[28]. 文献[29]证明了二维空间中,n 个节点的图至 少要有 2n-3 条边才能是刚性的. 文献 [29-32] 则 分别给出了复杂度为 $O(n^2)$ 的刚性图判定方法,但 是仅仅有刚性图的性质仍然不能对节点进行唯一 定位,因为网络中仍然有多组可能解存在.无论是 唯一实现理论还是刚性图理论,欲使网络可唯一 定位,则要求网络必须是 k+1 连通且是冗余刚性 的[22-23],这一条件对网络拓扑的要求过于苛刻,而 且在网络规模较大时,网络定位唯一性判定的时间 复杂度使得定位算法的可行性受到了极大的限制. 已有学者从网络分类的角度对确定性判定进行了 研究[33-34],但无论是三边扩展[35]的划分方式,还是 Wheel^[2,36]扩展方式,对网络拓扑的要求都较严格, 两边扩展[37]对网络的划分形式虽然不似三边扩展 网络严格,但却无法保证网络唯一定位的性质.因 此网络定位唯一性理论仍为科研人员提出了可行性 挑战.

3 定位问题的测量与距离估算技术

测量技术对定位系统的性能有着重要影响.测量技术可以分为角度测量技术和距离测量技术,也可以按照测量范围分为短距离测量技术与远距离测量技术^[1].本节从采集信息集合的数据角度对测量技术进行分析总结,将各类估算技术统一为定位不同精度的测距获取方式.

3.1 测距

3.1.1 RSSI(Received Signal Strength Indication) 射频信号强度指示

无线测距技术中受到较多关注的模型是 RSSI 模型. 其基本思想信号传播的功率衰减是信号传播 距离的函数: $P_r = f(P_t, d)$, 其中 P_r 是可测的接收信号强度, P_t 是信号发射强度, d 是信号传播距离, f 是信号强度与衰减距离的经验模型. 可见, 如果发射功率已知, 信号传播经验模型已知, 在测得了某处的 P_r 信号强度值后, 即可根据以上模型对距离进行 求解.

按照无线信号的传播特性,可将无线信号传播

分为大尺度模型和小尺度模型两类.大尺度模型用来刻画远距离视距路径损耗、环境因素造成的衰落等效应,小尺度模型主要用来刻画由多经传播引起的短距离(通常为几个波长以内)内接收信号强度经历的剧烈变化.由于小尺度模型在短距离接受信号强度呈现剧烈变化,因此,目前常见的测距技术均以大尺度模型作为基本模型.

大尺度模型中,自由空间传播模型(Free space) 是一个理想化模型,它假设在发射点和接收点间仅 存在一条视距传播路径,H.T. Friis 使用下列方程来 计算接收点位于距离发射点 d 处的接收信号功率:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \tag{3}$$

这里 P_t 是发送信号功率, G_t 和 G_t 分别为发射天线和接收天线增益, λ 为波长,d 为发射天线和接收天线间的距离,L 为与传播特性无关的系统损耗因子.

由于自由空间传播模型只考虑发射点和接收点间的视距传播,其模型过于理想化,因此科研人员提出 Plane Earth Loss 模型将地面反射路径考虑了进来,而通常我们仅考虑对信号衰落影响最大的路径,如图 3 所示. 该模型称为地面反射模型(Two Ray Ground):

$$P_{r}(d) = \frac{P_{t}G_{t}G_{r}h_{t}^{2}h_{r}^{2}}{d^{4}L}$$
(4)

这里 h_t 和 h_r 分别是发射天线和接收天线的高度.

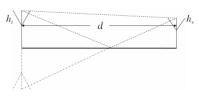


图 3 地面反射模型

值得一提的是,在短距离范围内,自由空间模型要比地面反射模型精确,因此模型中有一个过渡距离 d_{ϵ} ,当距离小于 d_{ϵ} 时使用自由空间模型,当距离大于 d_{ϵ} 时,使用地面发射模型.距离等于 d_{ϵ} 时,二模型得到同一结果.

$$d_c = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda} \tag{5}$$

大尺度模型中如果发射点和接收点间存在遮挡,还有衍射模型、阴影模型等,科研人员不断对无线信号传输模型进行修正使其更好地与实际测量相吻合.许多科研工作者也一直致力于无线信号传播模型的研究[38-40],但近年来也有学者指出,RSSI技术并不适合无线传感器网络定位[41-43],RSSI测距过程中由于干扰引起的RSSI值的波动限制了许多定位机制特别是室内环境下定位的可靠性.文献[42]

提到了几个原因: (1) 理想环境下,RSSI 的测量值也不具有稳定特性; (2) RSSI 具有整数测量值,不能提供足够的精度区分距离引起的微小变化; (3) 传播距离极限情形下,RSSI 结果非常不可靠. 文献[43]指出,RSSI 的局限性使得如果没有更复杂的环境模型或者额外的定位基础设施,RSSI 测距性能将无法取得突破.

3.1.2 ToA(Time of Arrival)到达时间差测量技术

由于使用无线信号传播模型进行测距精度上的限制,研究人员还对利用无线信号的传播速度进行距离测量技术 $ToA^{[44-47]}$ 展开了研究,它基于简单的距离与速度时间公式: $d=v\times \Delta t$. 如果无线信号的传播速度 v已知,无线信号在空间中的传播时间可测,那么可根据该公式求得无线信号的传播距离.

然而,电磁波信号传播速度是光速 $c \approx 3 \times$ 10^8 m/s , $1 \mu \text{s}$ 的时间误差将造成 $3 \times 10^8 \times 10^{-6} =$ 300 m 的距离误差. 因此,信号传播时间的精度是 ToA 测距精度的关键所在. 影响信号传播时间测量 精度的主要原因有两种:一种是节点间的时间同步, 当发送节点记录发送时间 t1,接收节点记录接收时 间 t2,以此来获得信号的传播时间时,这种方法需要 对节点间精准的时间同步进行研究[48-50];另一种是 时钟漂移,设晶体振荡器的误差为 d ppm,则 t s 时 间间隔产生的时间漂移误差为 $\Delta t = t \times d \times 10^{-6} \text{ s}$, 典型的 CC2430 芯片^[51]配有 32 MHz 晶振,10 ppm 误差,1 µs 的时间间隔将产生 10 ps 的误差, 虽然可 以使用回路方式回避时间同步问题[47](信号发送节 点发送信号并记录信号发送时间 t1,接收节点接收 信号并将其返回,发送节点收到信号并记录接收时 间 t₂),通过回路减小时间误差的方式可以将定位精 度提升至米级[47,52],但时钟漂移[53]仍是其精度提供 需要考虑的问题.

除此之外,尽管 ToA 技术作为一种的室内测距技术被广泛使用,该方法还受到无线传播中多径效应的影响.如何准确判定信号沿视距方向传播的自相关峰值是该问题的一个难点^[47],而使用 UWB 技术提高 ToA 的估计精度被认为是一个值得努力的方向^[54-56].

因此,如上所述,无线信号以光速传播,使用电磁波信号进行 ToA 测距,时间差精度要达到皮砂级,测距误差才可以控制在厘米级或毫米级.

3.1.3 TDoA(Time Difference of Arrival)测量技术

ToA 测距技术受限的一个主要原因是无线信号以光速传播,微小的时间误差将会引起较大的距离误差,如果能以一种低速信号替代光速传播的无

线信号,测距对时间精度的要求就会有所降低,一种解决方案是采用超声波信号^[57],这就是 TDoA 测量测量技术^[58].

如图 4 所示,发送端在 t_1 时刻发送无线信号,经过一段时延后在 t_2 时刻发送超声波信号,接收端在时刻 t_3 接收到无线信号,在时刻 t_4 接收到超声波信号. 如忽略无线电波传播时延,发送端与接收端的时间差可估算为 $t_4-t_2-(t_3-t_1)$. 伯克利大学研发了基于超声波时间差测距 Cricket 节点,且定位精度可达毫米级,Cricket 声称使用了超声波 TDoA 技术,但目前学界对于 TDoA 这一术语含义的解释并不统一,一种是 Cricket 方式的采用两种不同信号进行传输获得时间差[1.58-60],而另一种是利用同一无线信号到达不同节点时间差[0]进行定位的方法[61],本文将在 [0]1. 节对后一种情况进行详细介绍.

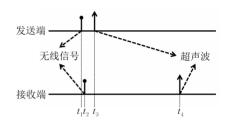
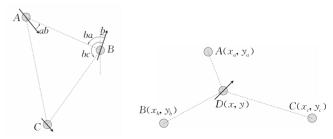


图 4 TDoA 无线信号与超声波传播示意图

3.2 AoA(Angle of Arrival)角度测量

角度测量技术需要无线节点配有天线阵列或者多个超声波接收器来提供方向感知的能力[7,60],每个节点都有自己的主轴方向,可以感知邻居节点方向与主轴方向的夹角. 节点在部署时,主轴朝向随机分布. 如图 5(a) 所示,粗箭头代表了节点的主轴方向. 由于天线阵列或多个超声波接收器的存在,节点可以测量邻居节点方向与节点本身主轴方向的夹角,图 5(a)中,节点 B 可测得节点 A 方向与自身主轴夹角 Δ 方向夹点。同样,节点 A 可测得节点 B 与自身主轴方向夹角 Δ 方向共后,因此,三角定位问题即转化为给定节点间与节点主轴方向夹角的测量值,如何求解节



(a)节点的方向感知能力

(b) 邻居节点角度与位置关系

图 5 角度测量技术[7]

① Multilateration.http://en.wikipedia.org/wiki/Multilateration

点位置与主轴方向的问题.

更进一步,如果节点可以得到邻居节点与自身主轴方向夹角的测量值,那么节点即可获得邻居节点方向间的夹角,如图 5(b)所示,节点 D 可以获得邻居节点方向间的夹角 $\angle ADB$, $\angle ADC$, $\angle BDC$,当 A,B,C 三节点位置已知时,可以使用该角度值计算节点 D 的位置坐标.此时,节点 D 位于经过 AC 两点,圆心角为 $\angle ADC$ 的弧 AC 上,同样位于经过 AB 两点,圆心角为 $\angle ADB$ 的弧 AB 上,弧 AC 与弧 AB 的交点即为 D 点坐标. 弧 AC 所在圆心可求,设为 $O_{AC}(x_{AC},y_{AC})$,半径可求,设为 r_{AC} ,有

$$(x-x_{AC})^2+(y-y_{AC})^2=r_{AC}^2$$
,

同理有

$$(x-x_{AB})^2 + (y-y_{AB})^2 = r_{AB}^2,$$

 $(x-x_{BC})^2 + (y-y_{BC})^2 = r_{BC}^2.$

如此,三角测量问题在数学模型上转化为距离测量问题.

三角测量中,角度测量的精度对定位精度的影响较大,设角度误差为 $\Delta\theta$,节点间距离为 d,则角度误差将产生 $2 \cdot \sin \Delta\theta/2$ 的位置误差. 当角度误差较小时,我们也可以用弧度偏差 $d \cdot \Delta\theta$ 近似估算节点的位置偏差,即角度测量的精度如果为 5° 那么弧度偏差为 $5 \cdot 2\pi/360 = 36\pi$,位置偏差约为节点间距离的 8.7%. 因此三角测量法更适合于短距离定位,远距离定位将取决于角度测量的精度值. 关于角度对定位精度的影响,文献[62]对不同情形下的节点定位误差进行了讨论,指出在邻居节点间夹角为直角时,角度测量具有更好的定位结果,并给出了详细的公式推导. 随着角度测量精度的提高,角度测量技术已经在开放性室内定位中崭露头角,诺基亚研究中心提出的 HAIP 定位技术,即采用角度测量技术,其室内定位精度可达分米级[63].

无论是 ToA,TDoA 还是 AoA 技术,其测量精度的保障都基于视距测量的前提,即测量物体间不存在障碍物遮挡. 视距测量是一个较理想化的模型,在很多应用场景尤其是室内定位^[64]中,非视距问题普遍存在,因此如何识别与排除非视距测量^[65]是无线网络定位中的一个重要课题.

3.3 距离与位置估算

3.3.1 DVhop与MDS

在实际应用中,并不是所有的定位场景都具有 测距技术支持,因此科研人员提出了使用节点间的 跳数对距离进行估计的方法^[66],其中比较典型的是 DVHop 算法^[67-68].在 DVhop 算法中,节点 *p_i*可以 通过网络信息交换的方式获得到网络中任意锚点 A_j 的跳数信息 h_{ij} ,如果可以估计出网络中各点到锚点 A_j 的平均每跳距离 c_j ,即可通过 $h_{ij} \times c_j$ 估算节点 p_i 到锚点 A_j 的距离. 锚点 A_j 到网络中各点的平均每跳距离可以通过如下方式得到: 当锚点 A_j 获得它到其他锚点 A_k 的跳数信息时,由于锚点坐标已知,因此可以通过锚点间距离与跳数的比值进行估算.

$$c_{j} = \frac{\sum_{k} \sqrt{(x_{j} - x_{k})^{2} + (y_{j} - y_{k})^{2}}}{\sum_{j} h_{jk}}$$
 (6)

除了使用跳数进行平均每跳距离估计外,还可以使用网络中的 RSSI 值取代 DVHop 算法中的跳数信息得到 DvDistance 算法.

在多目标网络定位中,经典的 MDS(Multidimensional Scaling)算法^[19]需要网络中任意两点间的距离作为算法输入.而在网络规模较大时,节点通信距离往往只能保证在相邻节点间进行通信和实施测距手段,因此多跳节点间的距离需要采用某种计算方式得到.由于网络构成连通图,因此文献[19]采用两点间最短路径作为距离的估计值.众所周知,两点之间直线距离最短,因此使用最短路径方式作为两点间距离估计往往要比实际距离大.

3.3.2 位置估算技术

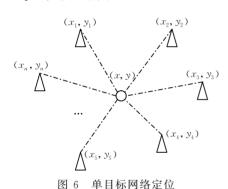
在对定位精度要求不高或不具有测距技术支持的应用场所,也有方法采用通信距离约束直接对待定位点进行位置的粗略位置估计,位置估算技术在文献[69]中称为定位感知技术.距离估算技术可以看作是降低测距精度需求的一种技术,而位置估算技术可以看作是降低测距精度需求的一种极端情况.位置估算技术只是通过节点是否在感知范围内作为测量结果,结合节点的通信半径或感知半径给出位置估计.甚至有些情况下,仅使用连通度信息的有无作为测量结果,这种方法在文献[19]中体现得尤为明显,MDS方法可以仅通过网络中的连通度信息即可对多目标网络进行定位,虽然其定位结果较有精确测距情形差,但在网络明确具有确定性定位性质时,其定位结果在可接受范围内.

位置估算技术在实际应用中也很常见^[70],例如根据移动终端是否在某基站范围内对移动终端的位置进行粗略估计^[71],利用 Rfid 阅读器确定标签位置^[72]等. 位置估算技术的定位精度受感知半径或通信半径的影响较大,但传感器节点的感知半径很小时,也可以为被感知节点提供相对准确的位置信息,但这要求感知节点的位置信息为已知. 因此可以通

过大量部署锚点的方式为该方法提供基础设施支持,但锚点的定位及其精度仍是一个需要解决的问题.另外,位置估算技术也为大量被称为距离无关的定位算法如质心算法^[78],Amorphous 算法^[74],APIT 算法^[66],Voronoi 图算法^[75]等算法提供了技术基础,大量算法可以通过多个位置估算进行融合得到进一步精确化的定位结果.

4 单目标网络定位模型

根据锚点数目以及与待定位点间的拓扑关系可以将网络定位分成两类,单目标网络定位以及多目标网络定位.单目标网络定位是无线定位中较简单的定位模型,某些多目标网络定位可由多个单目标网络定位聚合而成. 在单目标网络定位模型中,存在n个位置已知的锚点 (x_i,y_i) ($i=1,2,\cdots,n$),与待定位点 p(x,y),如图 6 所示.



4.1 多边定位模型及其扩展

如果待定位点与锚点之间的距离可测或可以估算,设为 \hat{d}_i ,记待定位点(x,y)与锚点i之间的真实距离为 d_i ,有

$$(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 = d_i^2$$
 (7)

则该单目标网路定位问题可转化为函数

$$F = \sum_{i} (\hat{d}_i - d_i)^2 \tag{8}$$

的极小优化问题.

对于该优化问题的求解,研究人员已进行了广泛深入的探讨,二维空间中,当锚点的数目为 3 时,比较经典的是三边测量法(Trilateration) $^{[13-16,76]}$. 当锚节点数目超过 3,对三边测量法进行扩展可得到多边测量法(Multilateration) $^{[18]}$. 可通过对方程组进行求解得到待定位点的坐标估计值 $\hat{p}(\hat{x},\hat{y})$:

$$\begin{cases} (\hat{x} - x_1)^2 + (\hat{y} - y_1)^2 = \hat{d}_1^2 \\ (\hat{x} - x_2)^2 + (\hat{y} - y_2)^2 = \hat{d}_2^2 \\ \cdots \\ (\hat{x} - x_n)^2 + (\hat{y} - y_n)^2 = \hat{d}_n^2 \end{cases}$$
(9)

上述方程组中,当n=3时,即为三边测量法.

对待定位节点位置估计值的求解可以有两种思路,一种思路是将方程组线性化,然后使用最小二乘法或线性方程组理论进行求解,另一种思路是直接对方程组采用泰勒级数法,最小二乘法等最优化方法进行求解.方程组求解的一种简单直观的线性化方法是:将方程组(9)中第1个至第(*n*-1)个方程分别与第*n*个方程相减可得线性方程组,对该线性方程组求最优解可得待定位节点的坐标估计值:

$$X = (\mathbf{A}^{\mathrm{T}} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^{\mathrm{T}} \mathbf{B} \tag{10}$$

其中,

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 2(x_n - x_1) & 2(y_n - y_1) \\ 2(x_n - x_2) & 2(y_n - y_2) \\ \dots & \dots \\ 2(x_n - x_{n-1}) & 2(y_n - y_{n-1}) \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{pmatrix} d_1^2 - d_n^2 + x_n^2 + y_n^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ d_2^2 - d_n^2 + x_n^2 + y_n^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ \dots \\ d_{n-1}^2 - d_n^2 + x_n^2 + y_n^2 - x_{n-1}^2 - y_{n-1}^2 \end{pmatrix}.$$

事实上,方程组中任意一个方程 r 都可被选择, 用来和其他方程做差得到线性方程组,但当锚节点 数目大于 3 时,位置估计值的误差受方程 r 的选择 的影响较大,此时,当待定位点距离锚节点 r 越远, 定位精度越低^[77].避免该现象的其中一种方式仍然 采用该线性化方法,但是减去的是参考方程的平均 值^[13],另一种方式是忽略原方程组中二次型与待定 位点坐标值之间的关系,将原方程组看作是线性方 程组进行求解,如方程组

$$\begin{cases}
-2x_{1}\hat{x}-2y_{1}\hat{y}+\hat{x}^{2}+\hat{y}^{2}=\hat{d}_{1}^{2}-x_{1}^{2}-y_{1}^{2} \\
-2x_{2}\hat{x}-2y_{2}\hat{y}+\hat{x}^{2}+\hat{y}^{2}=\hat{d}_{2}^{2}-x_{2}^{2}-y_{2}^{2} \\
\dots \\
-2x_{n}\hat{x}-2y_{n}\hat{y}+\hat{x}^{2}+\hat{y}^{2}=\hat{d}_{n}^{2}-x_{n}^{2}-y_{n}^{2}
\end{cases} (11)$$

中,令 $z=\hat{x}^2+\hat{y}^2$,并忽略其与 x,y 之间的函数关系,将上述方程组看作是一个关于 \hat{x},\hat{y},z 的线性方程组进行求解. 文献[18]所提出的方法与该方法有着本质上的相似性,该文献首先忽略 $\hat{x}^2+\hat{y}^2$ 项与x,y 之间的函数关系,将其看作一个待定参数,以此求解关于 x,y 的线性方程组,得到参数 $z=\hat{x}^2+\hat{y}^2$ 表示的坐标表达式 x=f(z),y=g(z),然后通过求解方程:

$$f^{2}(z) + g^{2}(z) = z$$
 (12)

得到参数 z 的值,最后将 z 代入到 x = f(z), y = g(z) 求解待定位节点的位置估计.由于该文献基于

ToA 技术讨论定位算法,因此还提出了一种将方程组看作是关于待定位节点位置坐标,时间参数以及待定位节点坐标二次方项的线性方程组的解法,其本质也是忽略了待定位节点坐标与坐标二次方项之间的函数关系.

事实上,根据定位问题选用的距离测量技术的不同,方程(7)会产生不同的形式或者约束,例如采用 ToA 技术进行测距的应用得到的并非距离信息而是时间的测量信息,距离信息表示为时间差与信号传播速度之积.在 GPS 定位技术中,在上述模型中引入了一个新的时间误差信息变量,算法得到的是距离差信息,也被称为 TDoA 技术[61].该方法以不同锚点到达待定位点的时间差(对应距离差)作为定位系统的输入,将时间误差也看作是其中一个参数[18].由于到两个锚点的距离估计意味着待定位点在以锚点为焦点的双曲线或双曲面上,因此该方法又称为 Hyperbolic 算法.该方法往往设置某锚点 (x_1,y_1) 为坐标原点,待定位点(x,y)到锚点 $((x_1,y_1))$ (坐标原点)与锚点 $((x_1,y_1))$ 的信号传播时间差可测,记为 d_{i1} ,则原方程组转化为

$$\begin{cases}
\hat{x}^{2} + \hat{y}^{2} = \hat{d}_{1}^{2} \\
(\hat{x} - x_{2})^{2} + (\hat{y} - y_{2})^{2} = (d_{21} + d_{1})^{2} \\
(\hat{x} - x_{3})^{2} + (\hat{y} - y_{3})^{2} = (d_{31} + d_{1})^{2}
\end{cases}$$
...
$$(\hat{x} - x_{y})^{2} + (\hat{y} - y_{y})^{2} = (d_{y1} + d_{1})^{2}$$

无论采用何种技术,都可以类似将方程组线性化,或采用相关的解法变型得到线性方程组.对于该方程组,可用方程组中后 n-1 个方程减去第一个方程进行方程组线性化,进而求解待定位点位置估计,也可以采用忽略待定位点位置与平方项函数关系的方法进行方程组求解.

如不采用方程组的线性化方法,也可以直接对多边测量法进行优化求解,一种思路是将定位问题转化为目标函数(8)的极小优化问题. 另一种思路是使用极大似然估计法[18,78] 建立极值优化问题. 对于 d 维空间的待定位点 p(x,y) 以及 n 个锚点 $p_i(x_i,y_i)$,假设 t 时刻待定位点 p 发送信号,可以使用 ToA 技术获得无线信号的传播到锚点 p_i 的时刻 t_i ,时间差服从正态分布 $N(t_i,\sigma)$,则待定位点 p 估计位置的概率密度函数为

$$\prod_{i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{i}} e^{-\frac{\sigma_{r}^{-2}}{2}(|x-p_{i}|-|p_{0}-p_{i}|)^{2}}$$
 (14)

其中, $σ_r = cσ$. 可见,极大似然估计法与目标函数(8) 具有相同的优化结果. 目标函数(8)的经典求解方法是泰勒级数展开法 $[x_i]$. 设待定位点坐标为 p(x,y), 到第 i 个锚节点 $p_i(x_i,y_i)$ 的距离设为 $d_i(x,y,x_i,y_i)$, 对 d_i 在点 $(x^{(0)},y^{(0)})$ 进行泰勒级数展开,有

$$d_{i}(x,y,x_{i},y_{i}) = d_{i}(x^{(0)},y^{(0)},x_{i},y_{i}) + \frac{\partial d_{i}}{\partial x}\Big|_{x^{(0)},y^{(0)}(x=x^{(0)})} + \frac{\partial d_{i}}{\partial y}\Big|_{x^{(0)},y^{(0)}(y=y^{(0)})}$$
(15) 忽略无穷小量,令

$$\hat{d}_{i} = d_{i}(x^{(0)}, y^{(0)}, x_{i}, y_{i}) + \frac{\partial d_{i}}{\partial x} \Big|_{x^{(0)}, y^{(0)}(x = x^{(0)})} + \frac{\partial d_{i}}{\partial y} \Big|_{x^{(0)}, y^{(0)}(y = y^{(0)})}$$
(16)

可得一组关于(x,y)的线性方程组,如果给定初始值 $(x^{(0)},y^{(0)})$,可以根据线性方程组求得待定位点坐标的新估计值 $(x^{(1)},y^{(1)})$,由此,可以通过迭代求解待定位点坐标.

文献[13]对线性最小二乘估计,迭代加权的最小二乘估计以及非线性的最小二乘估计进行了对比分析,指出非线性最小二乘估计方法定位性能较好.此外,该文献亦指出大多数文献在对多边测量法研究的过程中均忽略了一个建模细节,即在建模过程中均含有距离平方项,距离是无偏的,但距离平方后即失去了无偏估计这一性质.而文献[13]将这一因素考虑进来,因此引入 d_r + σ^2 作为与坐标并列的一个变量,视为与坐标无关变量进行线性方程求解.对于更通用的做法,是将极值优化函数中的误差 $\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}-d_i$ 替换为无偏量 $(\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}-d_i)/d_i$.建模或计算中随机变量的无偏性问题是多数文献中存在的普遍问题,应引起科研人员的足够重视.

4.2 电磁定位

20 世纪 70 年代,科研人员即已开始研究以电 磁理论为基础的电磁定位系统,其核心理论基础为 毕奥-萨法尔-拉普拉斯定律. 电磁理论指出,对于一个面积很小的任意形状的平面载流回路磁偶极子,如图 7 所示,在距离为 ρ ,离轴角为 θ 处的磁感应强度的径向和切向分量分别为 $^{[80-81]}$:

$$H_{\rho} = \frac{NIA\cos\theta}{2\pi\rho^3} \tag{17}$$

$$H_{t} = \frac{NIA\sin\theta}{4\pi\rho^{3}} \tag{18}$$

$$M = NIA \tag{19}$$

这里 M 称作磁偶极子的磁矩,电流强度为 I,A 为磁偶极子的面积,N 为线圈数目.

可见,如果得到了空间中某点的磁感应激励,即可唯一确定该点相对于磁偶极子的位置坐标.但由

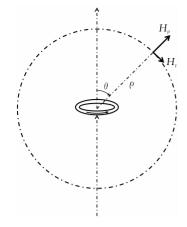


图 7 磁偶极子磁感应强度示意图

于磁偶极子的场强与其姿态有关,因此需要引入磁偶极子的姿态位置参数进行求解^[80,82-83]. 如果使用三轴同质磁偶极子引入姿态位置参数,则通过磁感应强度的理论模型,不仅可以定位出待定位点的位置,还可定位出待定位点的姿态^[80]. 使用该方法进行节点定位需要系统中存在磁偶极子信源节点和磁偶极子感知节点. 设三轴同质磁偶极子 3 个坐标轴的振幅表示为 $f_1 = [f_{1x}, f_{1y}, f_{1z}]^\mathsf{T}$,三轴同质磁偶极子感知节点 3 个坐标轴的输出表示为 $f_3 = [f_{3x}, f_{3y}, f_{3z}]^\mathsf{T}$. 则电磁定位系统可通过以下方式获得感知节点与信源节点之间的关于姿态与坐标的耦合方程^[80]:首先考虑与信源同位置,X 轴姿态与信源指向感知节点同向的激励源 f_2 ,得其与信源的耦合方程为

$$f_2 = T_\beta T_\alpha f_1 \tag{20}$$

其中

$$T_{eta} = egin{pmatrix} \coslpha & \sinlpha & 0 \ -\sinlpha & \coslpha & 0 \ 0 & 0 & 1 \ \end{pmatrix} T_{eta} = egin{pmatrix} \coseta & 0 & -\sineta \ 0 & 1 & 0 \ \sineta & 0 & \coseta \ \end{pmatrix}.$$

考虑与感知节点同位置,与激励源 f_2 同姿态的激励源 f_3 ,耦合方程为

$$f_3 = C/\rho^3 S f_2$$
 (21)
其中,C 为常数,S=
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1/2 & 0 \\ 0 & 0 & -1/2 \end{bmatrix}.$$

考虑与感知节点同位置与信源同姿态的激励源 f_4 ,得耦合方程:

$$f_4 = T_{-\beta} T_{-\alpha} f_3 \tag{22}$$

即

$$f_4 = C/\rho^3 T_{-\beta} T_{-\alpha} S T_{\beta} T_{\alpha} f_1 \tag{23}$$

考虑激励源 f_4 与感知节点之间的耦合关系得方程:

$$f_5 = T_{\varphi} T_{\theta} T_{\psi} f_4 \tag{24}$$

方程(24)即可用来求解感知节点的姿态与位置,其中姿态各方向角度均为相对于激励源 fi 的夹角.值得一提的是,电磁定位中,仅需一个锚点即信源节点即可对感知节点进行定位,但其定位结果是相对信源节点姿态坐标系的坐标值,在实际应用中,定位结果需要同信源节点的姿态相结合才具有实际意义.如果不考虑信源姿态,电磁定位也可进行节点间的距离求解,此时,电磁定位问题即可转化为多边定位模型进而使用多边定位方法进行求解,使用多个信源节点并结合信源节点坐标,可以得到待定位节点的绝对坐标值.

5 多目标网络定位求解算法

相比于单目标网络定位,多目标网络定位的模型无论是在网络拓扑上,待定位节点数目上,还是在采集信息量上都有所不同. 多目标网络定位模型中存在m个待定位点 $p_i(x_i,y_i)(i=1,2,\cdots,m)$ 和 n-m个锚点 $(x_j,y_j)(j=m+1,m+2,\cdots,n)$,如图 8 所示. 如果待定位点间或待定位点与锚点间的一部分距离可测或者可估算,那么令 L 表示实际测得的点间距离集合, $l_{ij} \in L$ 表示实际测得的点 i 同点 j 之间的距离. 则 m 个节点 (p_1,p_2,\cdots,p_m) 的定位问题转化为以下优化问题:

$$\begin{cases} \sum_{l_{ij} \in L} (l_{ij} - d_{ij})^{2} \\ \text{s. t.} \\ d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} (x_{ik} - y_{jk})^{2}}, \ l_{ij} \in L \end{cases}$$
 (25)

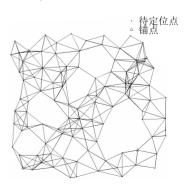


图 8 多目标网络定位

5.1 半定规划

虽然使用距离误差对多目标网络定位问题进行 建模简单直观,但实际应用中,有些网络并不具备测 距功能,或测距技术的误差较大,因此文献[84]提出 使用连通度约束关系对多目标网络定位进行半定规 划建模,对该问题进行求解,降低了定位算法对测距 技术的要求,估计网络中待定位点位置.

在 SDP 中,如果节点 p_i 与节点 p_j 可以通信,则认为它们之间的距离小于某一通信半径 r,构成了一个几何约束,而这些几何约束构成了一个凸集,可以用来限定待定位点的位置. 这些几何约束在 SDP 中被表示为线性矩阵不等式(LMIs),当网络所有几何约束都能通过不等式表达时,不等式组即对应与一个半定规划问题,可以用来估计待定位点坐标. 半定规划问题具有如下数学表达:

$$\begin{cases}
\operatorname{Min} C^{\mathsf{T}} x \\
\operatorname{s. t} F(x) = F_0 + x_1 F_1 + \dots + x_n F_n < 0 \\
Ax < b \\
F_1 = F_1^{\mathsf{T}}
\end{cases} (26)$$

SDP 中主要通过通信距离约束,角度约束,象限约束,梯形约束以及这些约束的集成来确定凸集约束.通信距离约束是凸集约束中最基本的约束模型:如图 9 所示,对于网络中任意两点 p_i , p_j ,节点间的通信距离为 R,如果 p_i , p_j 在有效通信距离之内,则有

图 9 通信距离约束[84]

通信范围是圆是一个理想化的假设,也可以使用椭圆进行约束.而且不同节点间的通信距离约束可以是同一个,也可以是可变的,即 AB 之间的距离约束为 R_{AB} ,AC 之间的距离约束为 R_{AC} ,如图 9 所示.

在光通信中,信号的发送端和接收端由旋转扫描而形成一定的角度,形成角度约束,如图 10(a)所示.除此之外,象限检测,梯形约束以及多种凸约束的集成如图 10(b)、图 10(c)所示.



图 10 凸集约束[84]

值得一提的是,精确距离约束以及距离大于某一常数的约束不是凸集约束:

$$\|p_i-p_j\| \geq R,$$

 $\|p_i-p_j\| = R.$

而且节点间距离大于 R 的不等式在实际应用中受到一定的限制,特别是当节点间通信存在非视距问题时,节点间无法通信并不一定意味着节点间的通信距离大于 R.

半定规划问题的求解是经典的数学问题^[86-87], SDP 具有多项式时间复杂度^[84].

5.2 多维标度算法

2003年, Shang 等人^[19,87-88]提出了使用 MDS 方法对网络进行分析,进而得出多目标网络点位置的方法.该方法以节点间的距离矩阵为已知为前提条件,对距离矩阵进行分解得到多目标定位点的位置,该方法仅需若干锚点,可以进行二维定位,也适合于三维定位.求解思路是先求节点间的相对位置,再根据锚点进行平移旋转等保距变换得到待定位点的估计位置.

m 维空间中将n 个节点的坐标看作是n 个向量 $\mathbf{x}_i(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{im})$

$$X=(x_1,x_2,\cdots,x_n)',$$

则任意两点 x_i 与 y_i 之间的欧式距离平方为

$$d_{ij}^2 = \sum_{a=1}^m (x_{ia} - x_{ja})^2$$
.

假设节点间距离矩阵已知:

$$\boldsymbol{D}^{(2)}(X) = \begin{pmatrix} 0 & d_{12}^2 & d_{13}^2 & \cdots & d_{1n-1}^2 & d_{1n}^2 \\ d_{21}^2 & 0 & d_{23}^2 & \cdots & d_{2n-1}^2 & d_{2n}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ d_{n1}^2 & d_{n2}^2 & d_{n3}^2 & \cdots & d_{nn-1}^2 & 0 \end{pmatrix}.$$

则

$$\mathbf{D}^{(2)}(X) = c1' + 1c' - 2XX' \tag{27}$$

其中, $c=\sum_{i=1}^{m}x_{ia}^{2}$.

设B=XX',对其做特征分解,存在正交矩阵Q和对角矩阵 Λ ,使得 $B=Q\Lambda Q$. 由于矩阵D为距离平方实对称,所有特征值非负,因此有 $B=(Q\Lambda^{1/2})(Q\Lambda^{1/2})$. 其中 $\Lambda^{1/2}$ 是将对角矩阵 Λ 中各特征值 λ ,开平方后组成的新对角矩阵. 这里 $Q\Lambda^{1/2}$ 即为网络中各点的相对坐标. 该矩阵的任何旋转平移,镜像等保距变换都不改变实对称矩阵D. 因此,多目标定位的估计值可以通过对 $Q\Lambda^{1/2}$ 进行旋转,平移得到. 这里,我们需要不共线的3个锚点坐标,使得旋转平移后的锚点坐标和给定的锚点坐标的距离平方和最小. 矩阵B可以通过如下方式得到

$$\begin{split} \frac{1}{2}J\mathbf{p}^{_{(2)}}(X)J &= -\frac{1}{2}J(c1' + 1c' - 2XX')J \\ &= -\frac{1}{2}Jc1'J - \frac{1}{2}J1c'J + JXX'J \\ &= -\frac{1}{2}Jc0' - \frac{1}{2}0c'J + J\mathbf{B}J = \mathbf{B} \ \ (28) \end{split}$$

其中, $J = I - n^{-1} 11'$. 因此,采用 MDS 方法进行定位求解的过程是:

- (1) 计算多目标网络中任意两点间的距离平方 矩阵 **D**⁽²⁾;
- (2)对正定实对称矩阵 $\mathbf{D}^{(2)}$ 进行如下运算,得到 矩阵 \mathbf{B} :

$$B = -1/2JD^{(2)}J;$$

- (3) 将矩阵 B 进行特征值分解 $B = Q\Lambda Q$;
- (4) 对于 m 维空间的定位问题, 对矩阵 B 的特征值从大到小排序, 选取前 m 个最大的特征值 Λ_+ 及其对应的特征向量 Q_+ , 计算 m 维空间点的相对 坐标 $X=Q_+\Lambda_+^{1/2}$;
- (5)利用旋转平移变换将 *X* 中锚点的相对坐标与实际坐标相匹配,求解多目标定位估计值.

MDS 算法为许多基于 MDS 的算法提供了理论与技术基础^[89-91],该方法的优点之一是仅需 3 个不共线的锚点即可在二维空间对多目标定位问题进行求解,其计算时间复杂度为 $O(n^3)$,其中 n 为网络内的节点数目.

MDS算法使用最短路径计算任意节点间的距 离,也可以使用有无距离的布尔信息作为距离的估 算. 由于最短距离估计在节点跳数较远时会引起较 大误差,因此 Shang 等人对 MDS 算法从两个方面 进行了改进,改进之一为定位结果提供了一个可选 的定位求精过程,优化方法是将 MDS 得到的结果值 看作中间结果,利用该中间结果作为求精过程的初始 值,使用最小二乘法求精网络相对坐标值.这样将 MDS 算法的快速特点与最小二乘法的准确优势相结 合,同时避免了最小二乘法初值难以选择的问题.改 进之二是提出了分布式 MDS 算法 MDS-Map(p), 可称为定位合并技术,该方法首先将网络按 R 跳子 图使用 MDS 算法求解网络相对坐标,然后选取相 互重叠子图中相同节点作为优化点集,设定旋转角 与平移向量作为优化参数,利用最小二乘法求得误 差最小的参数值,将两子图合并,并逐步合并其他子 图直至全局网络,最后可以利用锚点信息求解网络 内所有点的全局绝对坐标. MDS(P)算法可以有效 解决由多跳网络引起的最短路径误差问题,其定位 结果也优于 MDS 算法.

5.3 CCA 算法

2009年,Thomas 等人 [92]提出了使用高效神经网络非线性映射方法曲元分析 Curvilinear Component Analysis (CCA) 对多目标网络进行定位估计 [93-94]. 在 CCA 算法中多目标网络定位被形式化为如下数学模型:给定 N 个节点的距离矩阵 D,找到所有点的坐标,使得

$$\min \sum_{i,j} (d_{ij} - p_{ij})^2 \tag{29}$$

其中, d_{ij} 是可测或已知的节点 p_i 和节点 p_j 之间的距离. p_{ij} 是通过节点估计值的结果坐标求得的节点 p_i 与节点 p_j 之间的距离.

CCA 算法以 $n \land m$ 维向量作为输入,得到 $n \land s$ 维向量($s \le m$),其结果对于输入向量具有保距性质,即对于任意两个 m 维输入向量 x_i, x_j , CCA 算法可以得到两个 s 维输出向量 y_i, y_j ,使得输出结果最小化以下代价函数:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i} \sum_{i \neq j} (d_{ij} - Y_{ij})^2 F(Y_{ij} - \lambda_y)$$
 (30)

其中, $Y_{ij} = \sqrt{\sum_{k} (y_{ik} - y_{jk})^2}$, $F(Y_{ij} - \lambda_y)$ 是随时间单调递减的有界权值函数.

CCA 算法以多轮迭代的方式逐步最优化输出结果,在每轮的优化过程中,代价函数 E 的更新规则为:设定节点 p_i 的坐标不变,更新其他 p_i 的坐标值,使得

$$\Delta \mathbf{y}_{j} = \alpha(t) F(Y_{ij} - \lambda_{y}) (X_{ij} - Y_{ij}) \frac{\mathbf{y}_{j} - \mathbf{y}_{i}}{Y_{ij}}, \forall j \neq i$$
 (31) 这里 $\alpha(t)$ 随轮次递减. 如此进行更新规则的选择可以避免每轮 $N(N-1)$ 次计算,因此 CCA 算法每轮的计算复杂度为 $O(N)$.

在算法实际输入过程中,CCA 算法以距离矩阵 D 作为初始数据集 x_i 以及 CCA 算法内部距离矩阵元素 d_{ij} 的输入,CCA 算法在给定节点间距离矩阵后,通过两步来完成待定位点估计值的求解:

- (1)将输入数据 **D**的前两列求均值,并以该列标准差对均值进行高斯加噪作为输出向量 **y**_i的初始估计值;
- (2)在 CCA 算法的每轮计算中,选择节点 p_i ($j\neq i$)的新坐标值.

$$\mathbf{y}_{j}(t+1) = \mathbf{y}_{j}(t) + \alpha(t) e^{-\frac{Y_{ij}}{\lambda(t)}} \left(\frac{X_{ij}}{Y_{ij}} - 1\right) (\mathbf{y}_{j} - \mathbf{y}_{i}) (32)$$
这里 $\lambda(t)$ 与 $\alpha(t)$ 每一轮随时间递减,采用如下函数:

$$v(t) = v(0) \times \left(\frac{v(c)}{v(0)}\right)^{\frac{t}{c-1}} \tag{33}$$

其中,c是总的计算轮数,也被称作 CCA 的训练时长.

与 MDS(P)方法类似, CCA 算法针对 R 跳子 图进行定位求解,产生子图相对坐标. 在求解过程中,由于每轮设定了其中一点 i 位置不变,因此具有 $O(k^2)$ 的时间复杂度(k 为节点 i 的平均邻居数目), CCA 算法全局相对坐标的计算复杂度为 $O(k^2n)$, n 为全网节点数目.

6 采集信息对定位算法的影响分析

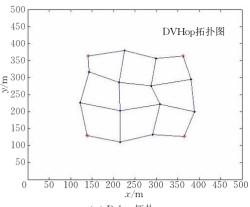
在定位算法中,所采集有用信息量的多少对定位结果有着重要影响. 刘云浩等人[1.61] 将测距技术分为6类,从细粒度到粗粒度测距精度逐渐降低. 对于定位模型而言,这种测距分类对应着所获得的信息量. 与获得测距信息后进行定位相比,直接获得明确位置信息所提供的信息量大;与仅获得网络跳数信息比,有测距信息所带信息量更大;电磁定位由于获得了感知节点与信源节点之间姿态与位置的关系,所携带的信息量更大;而位置估算技术所携带信息量较小,极端情况下的感知定位其信息量仅为1bit,但如果考虑到感知节点的位置与密度信息,位置估算技术所携带的信息量仍可能较大.

如果定位算法的信息集合所提供的信息量有限,那么其定位结果也会相应受到限制.以 DVHop算法为例,在仅知道锚点位置与网络连通度信息时,大多数情况下,所提供的信息量并不足以为DVHop算法提供高精度定位的保证. 为举例说明,本文在500m×500m的区域内部署了12个待定位点和4个锚点,设置传输半径为100m时的拓扑如图11(a)所示.

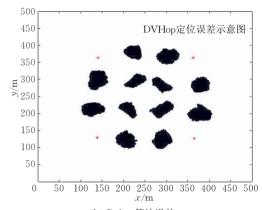
根据 DVHop 算法,在锚点信息不变时,网络连通性信息唯一确定了 DVHop 算法的定位结果.然而,节点在网络中的位置并不是唯一的,而是在一定范围内是可动的.固定锚点不变,保持该连通性信息的网络拓扑并不唯一.本文对各待定位点的可能拓扑进行了枚举,如图 11(b)所示,待定位点可在一定范围内运动,却仍然保持连通性信息不变.

DVHop 算法的信息集合为锚点信息加网络连通度信息,DVHop 算法将该信息映射为位置的定位结果. 如果没有其他有用信息对待定位点的位置进一步限定,我们将无法对网络中节点进行更精确的定位,在已有信息的基础上进行定位的改进是徒劳的. DVHop 算法的定位信息量不足决定了该算法只有较弱的定位分辨能力.

一般来说,信息量越大,我们将有更多更准确的数学模型进行定位.定位结果不仅受测距技术的影



(a) Dvhop拓扑



(b) Dvhop算法误差

图 11 Dvhop 算法误差分析

响,也受锚点数目、位置、密度、拓扑的影响,其他有用信息的提供也会对定位模型与精度产生重要影响.因此为了提高定位精度,需要提供更多的有用信息,在此基础上对有用信息集合到目标集合进行建模,进而求得坐标.目前提高信息量解决思路主要有以下几种:

- (1)提高距离测量技术的测距精度;
- (2)密集部署网络,提供更多更小范围的定位 参考节点以缩小误差范围;
 - (3) 通过不同的技术手段提供更多有用信息.

提高距离测量技术的测距精度^[95-96]是为定位 提供更大信息量的一种基本手段,测距精度的提高 可以改进大多数距离相关定位算法的定位精度;而 提供更多的锚点信息也可以在不改变现有定位技术 的基础上提供更精确的定位服务,如苹果公司采用 iBeacon 技术,通过周边多个 iBeacon 收发器,用户 的位置可以被精确定位至几英尺的范围内,进行"微 定位";除此之外,不同的定位技术还可以根据自身 特点增加有用信息,例如无线信号定位中可以通过 采集定位场景内的指纹信息,建立指纹数据库,提高 定位精度^[97-98],场源定位中可以采用信源阵列的方 式提供更多有用信息^[99],视觉定位可以对摄像头采 集的视频信息进行处理,挖掘定位相关信息^[100-102],使用视频技术对空间有用信息加以利用,谷歌公司通过对建筑物内部的全景图库进行采集的方式提供更丰富的室内信息,利用设备内置的摄像头来进行室内定位修正,修正后的精度可达 1 m 之内.

在导航领域, GPS 的兴起前航位推算(Dead reckoning)是非常经典的导航手段, 如今随着传感器技术的飞速发展, 航位推算技术重又回科研视野, 该技术要求节点上配备高精度的陀螺仪与加速度测量仪来测量节点移动的瞬时信息, 通过角速度与加速度进行积分即可得到节点相对初始点的位移和行进方向[103-104]. 虽然航位推算需要节点配备高精度陀螺仪和加速度测量仪,设备成本较高, 而且需要以节点的初始位置和初始方向作为参考, 但航位推算的信息采集方式不受外界因素影响, 仅需 1 个锚点即可实现定位, 而且不受非视距问题[105] 的影响也使航位推算与其他定位手段相比具有一定优势.

由此可见,定位模型与定位结果均受到定位所 采集信息的制约.如何提供较大的信息量用于定位 是定位研究的一个最基本的可行性思路.可以预计, 随着可穿戴设备的发展,物联网技术的发展,系统获 取信息的手段将越来越多,如何有效管理这些信息, 利用这些有用信息提升定位性能是技术发展与应用 需求为科研人员提出了一项重要课题.

7 定位问题中的分治策略

7.1 定位技术层次关系

从定位系统设计的角度看,目前科研人员对定位问题的研究已取得了丰硕的研究成果,内容涵盖了定位可行性理论、定位所需基本信息获取技术,多种定位系统模型以及定位结果的评价体系.这些定位技术各有优势,从功能上看互为补充,各种定位技术从功能上大致可以分为如下几类:信息采集技术、定位可行性理论、定位模型以及定位优化技术,其相互关系如图 12 所示.

目前的信息采集技术有多种可行的选择,根据定位系统硬件支持的不同,可以选择相应的 ToA 测距、TDoA 测距、RSSI 测距、感知识别、现场指纹信息采集、视觉信息采集等底层信息采集技术. 定位唯一性理论为定位结果的可信性提供了基本的理论保证,当所采集到的信息不足以保证定位唯一性时,定位系统设计人员将需要重新对定位系统的信息采集内容进行新设计,当确保采集到的信息足以保证定位系统性能时,即可选用相应的定位模型对定位结

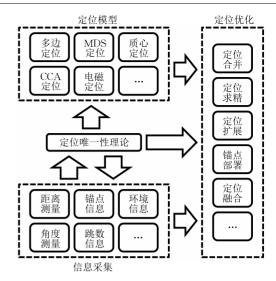


图 12 定位技术层次关系

果进行相应的计算.因此,定位模型与信息采集功能 既相互独立,又相互关联,其相互关系的核心为传递 的数据与使用的模型.

7.2 定位技术分治策略

定位优化技术较信息采集与定位模型而言相对独立,可选择的技术有定位合并、定位求精、定位扩展、锚点部署以及定位融合等.定位技术可采用分治策略,其主要原因基于定位优化技术的相对独立性,优化技术都可成为定位系统中的可选项.定位优化技术的相对独立性,使得定位系统在设计的过程中可以先求相对坐标,再求绝对坐标;可以先求解局部定位问题,再求解全局定位问题;可以采用分布式策略,也可采用集中式策略;可以先解决部分定位问题,再进行迭代扩展定位;先求解定位粗精度估计值,再利用优化方法求精;可采用常规方式进行定位系统设计,也可以采用锚点部署的方式提高定位精度.

就系统设计而言,对于已获取采集信息,要对适合的方案做评估,选取可行的定位技术进行定位,然后使用定位优化技术进行优化.例如大规模网络,采用2跳邻接图的方式求解出相对坐标,将各子图的相对坐标通过定位合并获得全局相对坐标,然后再通过锚点信息得到绝对坐标,进一步还可以采用求精技术提高定位精度.在对网络定位精度有更高要求的情况下,可以采用增加锚点的方式,减小网络定位规模,对小规模的网络的定位结果采用定位合并得到全局定位结果.

8 定位中的误差模型及性能指标

8.1 准确度与精确度

在定位算法中,衡量定位精度的方式有两种:一

种是准确度(accuracy);另一种是精确度(precision)^[1,106].准确度用待定位点估计位置与实际位置的距离表示,而精确度是定位结果相对于准确度的百分比.例如,某系统可以有 20 cm 的准确度,而相对于 20 cm 这一指标,具有 95%的精确度.通常情况下,准确度与精确度应作为统一的度量指标来度量系统性能.

事实上,在具有锚点的定位系统中,定位系统的准确度受到待定位点与锚点间距离以及网络拓扑的影响.一般来说,其他因素不变的情况下,待定位点与锚点之间的距离越大,定位系统的准确度越差.在相关研究中,可以设定测距误差来研究定位算法对定位结果的影响,而测距误差可以分与距离无关测距误差和与距离相关的测距误差两种.与距离无关的测距误差设定随机误差为 $N(0,\sigma)$ 正态分布,若真实距离为d,测距值可设为 $d+N(0,\sigma)$ [75].文献[18]给出了与距离无关的测距误差的技术基础:如果使用ToA技术,基于时间测量数据是独立正态分布 $N(t_k,\sigma)$ 的假设,距离误差服从 $N(0,c\sigma)$ 分布.

还有文献在研究定位误差时使用与距离相关的 测距误差,若真实距离为 d,测距值可设为 $d(1+N(0,\sigma))^{[19,47]}$. ToA 测距中的时钟漂移[53]的误差是 距离相关测距误差存在的技术基础.

8.2 定位误差的统计学指标

8.2.1 Cramer Rao 下界

在对定位误差分析的研究中,定位误差的Cramer Rao 下界受到研究人员的广泛关注^[45,77,107-109]. Cramer Rao 下界给出了任意无偏估计的方差下界,因此可以用来度量定位系统的均方误差^[110]. 由于 Cramer Rao 下界是 Fisher 信息的倒数,因此,研究人员使用 Fisher 信息来表示 Cramer Rao 下界:

$$\sigma_{\text{CRLB}}^2 = Tr\{I(x)^{-1}\},\,$$

$$I(x) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N} \frac{(x - \mathbf{x}_{i})^{2}}{\sigma_{i}^{2} d_{i}^{2}} & \sum_{i=1}^{N} \frac{(x - \mathbf{x}_{i})(y - \mathbf{y}_{i})}{\sigma_{i}^{2} d_{i}^{2}} \\ \sum_{i=1}^{N} \frac{(x - \mathbf{x}_{i})(y - \mathbf{y}_{i})}{\sigma_{i}^{2} d_{i}^{2}} & \sum_{i=1}^{N} \frac{(y - \mathbf{y}_{i})^{2}}{\sigma_{i}^{2} d_{i}^{2}} \end{bmatrix},$$

其中,N 个锚点坐标分别为 $p_i(\mathbf{x}_i,\mathbf{y}_i)$;待定位节点 坐标为 p(x,y),待定位点到锚点 p_i 的测距信息的 方差为 σ_i^2 .

8.2.2 CEP 指标

除 Cramer Rao 下界外,圆概率偏差(Circular Error Probability,CEP)[111]是另一个可以用于定位精度度量的指标,对于多个定位估计值,以各定位估计的均值为圆心,包含有一半估值的圆的半径即该估计的 CEP 指标,如图 13 所示. 如果定位估计是无

偏的,那么 CEP 表征了定位估计的不确定性. 因此, CEP 值越小,定位估计越可靠[110].

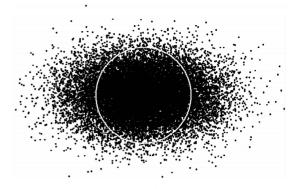


图 13 圆概率偏差 CEP

图 13 中圆的半径即为定位 CEP 指标,但从图中可见,定位估计概率分布的总体轮廓更接近椭圆,因此,使用椭圆概率偏差对定位估计的可靠性表达将更准确[111].

8.2.3 DOP 指标

锚点的部署以及与待定位点的相对位置对定位结果会产生一定的影响,在 GPS 系统中,称为 DOP (Dilution Of Precision)[15,112]. DOP 主要由卫星的几何位置引起,如图 14 所示,从卫星几何位置的影响看,图 14(a)的定位效果要优于图 14(b). 对与GPS 定位而言,较为理想的卫星分布方式为一颗卫星在定位点的正上方,3 颗卫星等距离分布在定位点的地平线方向.

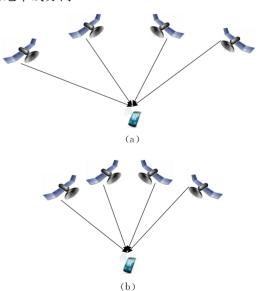


图 14 GPS 定位 DOP 指标

GPS 定位系统中的 DOP 指标与文献[62]对不同情形下的节点定位误差具有相似的结论,当待定位点与各锚点的方向具有正交关系时,定位结果更精确.

9 总结与展望

从定位模型的研究内容看,目前学界对定位问题的研究无论是从定位的可行性理论,测距技术信息获取手段,还是定位模型计算方式,对定位结果的评估都已取得了丰硕的研究成果,为系统设计者提供了多样化的技术选择,相关的研究还在不断进行.同时,从系统设计的层面上看,定位系统性能提高主要有以下系统设计思路:(1)提高距离测量技术的测距精度;(2)密集部署网络,提供更多更小范围的定位参考节点以缩小误差范围;(3)通过不同的技术手段提供更多有用信息.

然而,虽然定位系统设计的可选技术与策略十分丰富,但信息技术的发展以及普及的速度是惊人的,人们对定位的需求的增长也在不断提高,科技在发展的同时也挖掘了人们对信息技术新的需求,某些场合与应用,受限于场景、精度、成本等因素,有效定位服务的提供还尚待改善,尤其在室内定位领域,定位系统的实际需求已为科研的进一步突破指明了方向.具体来说,定位问题仍存在以下主要挑战:

- (1)新的测量技术上寻求突破.对于定位系统而言最大的问题是定位精度问题,而定位系统往往依赖于测距精度.目前测距精度高的技术往往需要节点配备额外的硬件设备,无论是从成本还是使用上对定位系统的应用都产生了一定的影响.而受无线电波的传播速度影响,已被广泛应用的无线节点还不能提供足够精确的测距支持.因此,如何提高现有已被广泛使用的无线节点的测距性能,或研发低成本的节点改进方法,使测距精度能够满足更多的定位需求,其遇到的问题是无线信号以光速传播,需要精准的时间同步、双程测量等技术才能提高测距精度,超声波虽以声速传播,对节点间时间同步的要求并不苛刻,但超声波对方向性较为敏感,阻碍了定位系统的广泛应用.因此新的测量技术上寻求突破是定位技术能否被推广使用所面临的一项挑战.
- (2)新的可用信息待挖掘. 电子技术的飞速发展使得视频设备、传感设备越来越低廉,可穿戴设备、智能终端对人们生活的影响越来越大. 有些设备位置相对固定,可以通过定位使其成为锚点,同时有些设备还可以具有信息采集功能;可穿戴设备以及一些传感设备虽然位置可移动,但节点在移动过程中所采集的信息量也较大,因此,如何利用这些设备提供更多信息用于定位,挖掘有用信息是定位技术发展的一个有益的方向. 而如何对用于定位的信息

进行筛选,对其误差进行评估,如何利用这些进行定位挖掘或融合定位,是该方向所面临的挑战.

- (3)大规模网络定位部署的便捷性上寻求突破.就目前大多数定位技术而言,提高定位的一个有效思路是密集部署网络,提供更多更小范围的定位参考节点以缩小误差范围.一方面大规模的网络部署为系统定位提供了更大的信息量,定位精度可以显著提高;而另一方面,网络规模的扩大使得网络部署成为一项繁重而复杂的工作.而定位系统要想更好地走向人们的日常生活,应当将定位的部署任务最小限度地对用户可见.如何对某一网络规模与拓扑的系统定位性能进行智能评估并提供定位系统性能的有效建议,减小网络部署工作量,是定位技术所面临的又一挑战.
- (4) 研究面向具体场景与应用的定位技术. 由于定位系统性能受到的影响因素较多,有测距因素,有锚点部署因素,不同的应用所要求的定位精度又有所不同,因此定位系统有较强的定位场景与应用相关性,针对不同的应用(针对性能与服务需求)或场景,如室内定位应该有不同的定位系统设计思路.这就要求对应用相关的定位系统进行设计,其挑战在于如何挖掘特定定位场景的定位需求,提出应用于该场景有效的定位解决方案.
- (5)新的定位模型上寻求突破. 随着视频分析技术,传感器技术以及可穿戴设备的飞速发展,系统获取信息的技术手段将越来越多,如何筛选可获得的有用信息,建立数学模型将这些信息进行综合利用,并在此基础上设计新的定位系统,是定位技术所面临的一个挑战. 这要求科研人员要在信息获取的技术层面进行取舍,在定位的数学模型上进行创新,以获得更好的定位结果.

参考文献

- [1] Liu Yunhao, Yang Zheng, Wang Xiaoping, Jian Lirong. Location, localization, and localizability. Journal of Computer Science and Technology, 2010, 25(2): 274-297
- [2] Gu Yang, Chen Yiqiang, Liu Junfa, Jiang Xinlong. Semisupervised deep extreme learning machine for Wi-Fi based localization. Neurocomputing, 2015, 166(C): 282-293
- [3] Tsirmpas C, Rompas A, Fokou O. An indoor navigation system for visually impaired and elderly people based on Radio Frequency Identification (RFID). Information Sciences, 2015, 320(C): 288-305
- [4] Ji Yi-Ming. Navigation using environmental constraints// Proceedings of the Consumer Communications and Networking Conference 2009. Las Vegas, USA, 2009: 1-5

Amundson I, Koutsoukos X D. A survey on localization for [5] mobile wireless sensor net-works//Proceedings of the Mobile Entity Localization and Tracking in GPS-less Environments. Seattle, USA, 2009: 235-254

6期

- [6] Jin Pei-Quan, Wang Na, Zhang Xiao-Xiang, Yue Li-Hua. Moving object data management for indoor spaces. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(9): 1777-1795(in Chinese) (金培权, 汪娜, 张晓翔, 岳丽华. 面向室内空间的移动对象 数据管理. 计算机学报, 2015, 38(9): 1777-1795)
- Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system (APS) using AoA//Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications, Infocom 2003. San Francisco, USA, 2003: 1734-1743
- Kwon Young-Min, Gul A. Passive localization: Large size sensor network localization based on environmental events// Proceedings of the 7th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '08). Washington, USA, 2008: 3-14
- [9] Cheng Long, Wu Chengdong, Zhang Yunzhou, et al. A survey of localization in wireless sensor network. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, 2012(1): 1-12
- Jamali-Rad H, Ramezani H, Leus G. Sparse multi-target localization using cooperative access points//Proceedings of the 2012 IEEE 7th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM). Hoboken, USA, 2012; 353-356
- [11] Li Wei, Zhang Wei. Multiple target localization in wireless visual sensor networks. Frontiers of Computer Science, 2013, 7(4): 496-504
- $\lceil 12 \rceil$ Han Guangjie, Xu Huihui, Duong T Q, et al. Localization algorithms of wireless sensor networks: A survey. Telecommunication Systems, 2013, 52(4): 2419-2436
- [13] Shah B, Kim K-I. A survey on three-dimensional wireless ad hoc and sensor networks. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014, 2014(2): 1-20
- 「14 □ Thomas F, Ros L. Revisiting trilateration for robot localization. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(1): 93-101
- [15] Kumar A, Khosla A, Saini J S. Range-free 3D node localization in anisotropic wireless sensor networks. Applied Soft Computing, 2015, 34(C): 438-448
- Kim E, Choi D. A 3D ad hoc localization system using aerial sensor nodes. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(7): 3716-
- [17] Vanheel F, Verhaevert J, Laermans E. Pseudo-3D RSSIbased WSN localization algorithm using linear regression. Wireless Communications & Mobile Computing, 2015, 15(9): 1342-1354
- [18] Mathias A, Leonardi M, Galati G. An efficient multilateration algorithm//Proceedings of the Digital Communications Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. Capri, Italy, 2008: 1-6
- [19] Shang Yi, Ruml W, Zhang Ying, Fromherz MPJ. Localization from mere connectivity//Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking &

- Computing. Annapolis, USA, 2003: 201-212
- Hightower J, Borriello G. Location systems for ubiquitous computing. Computer, 2001, 34(8): 57-66
- Hightower J, Borriello G. A survey and taxonomy of location [21] systems for ubiquitous computing. University of Washington, Computer Science and Engineering, Washington: Technical Report UW-CSE 01-08-03, 2001
- Jackson B, Jordán T. Connected rigidity matroids and unique realizations of graphs. Journal of Combinatorial Theory, Series B, 2005, 94(1): 1-29
- Connelly R. Generic global rigidity. Discrete & Computa-[23] tional Geometry, 2005, 33(4): 549-563
- Asimow L, Roth B. The rigidity of graphs. Transactions of the American Mathematical Society, 1979, 68(1): 171-190
- Gluck H. Almost all simply connected closed surfaces are [25] rigid//Glaser L C, Rushing T B eds. Geometric Topology. Lecture Notes in Mathematics 438. Berlin Heidelberg: Springer, 1975; 225-239
- [26] Jackson B, Jordan T, Szabadka Z. Globally linked pairs of vertices in equivalent realizations of graphs. Discrete & Computational Geometry, 2006, 35(3): 493-512
- [27] Hendrickson B. The molecule problem: Exploiting structure in global optimization. SIAM Journal on Optimization, 1995, 5(4): 835-857
- [28] Saxe J B. Embeddability of weighted graphs in k-space is strongly NP-hard//Proceedings of the 17th Allerton Conference on Communications, Control, and Computing. Allerton, England, 1979: 480-489
- Hendrickson B. Conditions for unique graph realizations. SIAM Journal on Computing, 1992, 21(1): 65-84
- Gabow N H, Westermann H H. Forests, frames and games: Algorithms for matroid sums and applications//Proceedings of the 20th Annual Symposium on the Theory of Computing. Chicago, USA, 1988: 407-421
- Imai H. On combinatorial structures of line drawings of polyhedra. Discrete Applied Mathematics, 1985, 10(1): 79-92
- Sugihara K. On redundant bracing in plane skeletal structures. Bulletin of the Electro Technical Laboratory, 1980, 44(5): 78-89
- [33] Goldenberg D K, Bihler P, Cao Ming, et al. Localization in sparse networks using sweeps//Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Los Angeles, USA, 2006: 110-121
- [34] Fang Jia, Cao Ming, Morse A S, Anderson B D O. Localization of sensor networks using sweeps//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, America, 2006: 4645-4650
- Eren T, Goldenberg DK, Whiteley W. Rigidity, computation, and randomization in network localization//Proceedings of the IEEE InfoCom 2004 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Hong Kong, China, 2004: 2673-2684

- [36] Yang Zheng, Liu Yunhao, Li Xiangyang. Beyond trilateration: On the localizability of wireless ad-hoc networks. IEEE/ ACM Transactions on Networking, 2010, 18(6); 1806-1814
- [37] Chen Chi-Chang, Chang Chi-Yu, Li Yannong. Range-free localization scheme in wireless sensor networks based on bilateration. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 2013(1): 893-900
- [38] Xie Guodong, Li Long, Ren Yongxiong, et al. Performance metrics and design considerations for a free-space optical orbital-angular-momentum multi-plexed communication link. Optica, 2015, 2(4): 357-365
- [39] Jiang Zhiyuan, Molisch A F, Giuseppe C, Niu Zhisheng. Achievable rates of FDD massive MIMO systems with spatial channel correlation. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(5): 2868-2882
- [40] Laura B, Thomas Z, Fredrik T, et al. Time- and frequency-varying K-factor of non-stationary vehicular channels for safety relevant scenarios. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(2): 1007-1017
- [41] Youssef C. Localization in Wireless Sensor Networks [M. S. dissertation]. Royal Institute of Technology, Paris, 2005
- [42] Parameswaran A T, Husain M I, Upadhyaya S. Is RSSI a reliable parameter in sensor localization algorithms an experimental study//Proceedings of the Field Failure Data Analysis Workshop (F2DA'09). New York, USA, 2009: 1-5
- [43] Elnahrawy E, Li Xiaoyan, Martin R P. The limits of localization using signal strength: A comparative study// Proceedings of the Sensor and Ad Hoc Communications and Networks 2004. Suzhou, China, 2004; 406-414
- [44] Guvenc I, Chong Chia-Chin. A survey on TOA based wireless localization and NLOS mitigation techniques. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(3): 107-123
- [45] Caffery J. A new approach to the geometry of TOA location// Proceedings of the 52nd Vehicular Technology Conference. Boston, USA, 2000; 1943-1949
- [46] Wang Xin, Wang Zongxin, O'Dea B. A TOA-based location algorithm reducing the errors due to non-line-of-sight (NLOS) propagation. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2003, 52(1): 112-116
- [47] Gunther A, Hoene C. Measuring round trip times to determine the distance between WLAN nodes//Proceedings of the Networking. Waterloo, Canada, 2005; 768-779
- [48] Sundararaman B, Buy U, Kshemkalyani A D. Clock synchronization for wireless sensor networks: A survey. Ad Hoc Networks, 2005, 3(1): 281-323
- [49] Lasassmeh S M, Conrad J M. Time synchronization in wireless sensor networks: A survey//Proceedings of the IEEE SoutheastCon. Charlotte, USA, 2010: 242-245
- Behrendt K, Fodero K, Schweitzer Engineering Laboratories.

 The perfect time: An examination of time synchronization techniques//Proceedings of the DistribuTECH. Tampa, USA, 2006: 1-6

- [51] Texas Instrument CC2430db demonstration board user manual. Texas: Technical Report SWRU125, 2007
- [52] Werb J, Lanzl C. Designing a positioning system for finding things and people indoors. IEEE Spectrum, 1998, 35(9): 71-78
- [53] Ostrovsky R, Patt-Shamir B. Optimal and efficient clock synchronization under drifting clocks (extended abstract)// Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing. Atlanta, USA, 1999: 3-12
- [54] Arias-de-Reyna E, Murillo-Fuentes J J, Boloix-Tortosa R. Blind low complexity time-of-arrival estimation algorithm for UWB signals. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(11): 2019-2023
- [55] Wang Fangqiu, Zhang Xiaofei, Wang Chenghua. Joint estimation of TOA and DOA in IR-UWB system using a successive propagator method. International Journal of Electronics, 2015, 102(10); 1765-1788
- [56] Tomasi R, Sottile F, Pastrone C. Leveraging BIM interoperability for UWB-Based WSN planning. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(10): 5988-5996
- [57] McCarthy M, Duff P, Muller H L, Randell C. Accessible ultrasonic positioning. IEEE Pervasive Computing, 2006, 5(4): 86-93
- [58] Priyantha N B, Chakraborty A, Balakrishnan H. The cricket location-support system//Proceedings of the 6th ACM Mobi-Com. Boston, USA, 2000: 32-43
- [59] Priyantha N B. The Cricket Indoor Location System [Ph. D. dissertation]. Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2005
- [60] Priyantha N B, Miu A K L, Balakrishnan H, Teller S. The cricket compass for context-aware mobile applications// Proceedings of the 7th ACM MobiCom. Rome, Italy, 2001: 1-14
- [61] Liu Yun-Hao, Yang Zheng. Location, localization, and localizability: Location-awareness Technology for Wirelelss Networks. New York: Springer, 2011
- [62] Kelly A. Precision dilution in triangulation based mobile robot position estimation//Proceedings of the 8th Intelligent Autonomous Systems. 2004: 1046-1053
- [63] Belloni F, Ranki V, Kainulainen A, Richter A. Angle-based indoor positioning system for open indoor environments// Proceedings of the 6th Workshop on Positioning, Navigation and Communication 2009 (WPNC'09). 2009; 261-265
- [64] Stojanović D H, Stojanović N M. Indoor localization and tracking: Methods, technologies and research challenges.

 Automatic Control and Robotics, 2004, 13(1): 57-72
- [65] Sun Dayang, Zhang Hongrun, Qian Zhihong. A Non-Lineof-Sight mitigation localization algorithm for sensor networks using clustering analysis. Computers and Electrical Engineering, 2004, 40(2): 433-442
- [66] He Tian, Huang Chengdu, Blum B M, et al. Range-free localization schemes for large scale sensor networks//

- Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA, 2003, 81-95
- [67] Nicolescu D, Nath B. Ad-hoc positioning system//Proceedings of the IEEE GlobeCom. San Antonio, USA, 2001
- [68] Krishna E Rama, Kumar G Rajesh, Rajinikar G, Reddy N Rajendar. A framework for wireless sensor network localization using triangular flips//Proceedings of the IEEE & CSI sponsored National Conference on Mobile and Ad Hoc Networks NCMAN-2010. Pollachi, Indian, 2010: 23-30
- [69] Zhou Ao-Ying, Yang Bin, Jin Che-Qing, Ma Qiang. Location-based services: Architecture and progress. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(7): 1155-1171(in Chinese) (周飯英,杨彬,金澈清,马强. 基于位置的服务: 架构与进展. 计算机学报, 2011, 34(7): 1155-1171)
- [70] D' Roza T, Bilchev G. An overview of location-based services. BT Technology Journal, 2003, 21(1): 20-27
- [71] Trevisani E, Vitaletti A. Cell-ID location technique, limits and benefits: An experimental study. Mobile Computing Systems and Applications, 2004: 51-60
- [72] Ni L M, Liu Yunhao, Lau Y C, Patil A P. LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID. ACM Wireless Networks, 2004, 10(6): 701-710
- [73] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 28-34
- [74] Nagpal R. Organizing a global coordinate system from local information on an amorphous computer. MIT A. I. Laboratory, Boston: Technical Report A. I. Memo 1666, 1999
- [75] Wang Jichun, Huang Liusheng, Xu Hongli, et al. A novel range free localization scheme based on voronoi diagrams in wireless sensor networks. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45: 119-125
- [76] Yu Zhou. A closed-form algorithm for the least-squares trilateration problem. Robotica, 2011, 29(3): 375-389
- [77] Güven I, Chong Chia-Chin, Watanabe F. Analysis of a linear least-squares localization technique in LOS and NLOS environments//Proceedings of the 65th IEEE Vehicular Technology Conference. VTC Dublin, Ireland, 2007: 1886-1890
- [78] Zhao Mingbo, Servetto S D. An analysis of the maximum likelihood estimator for localization problems//Proceedings of the 2nd International Conference on Broadband Networks. Boston, USA, 2005; 982-990
- [79] Foy W H. Position-location solutions by taylor-series estimation.

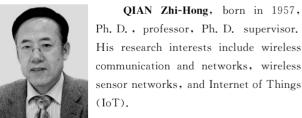
 IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,

 1976, AES-12(2): 187-194
- [80] Raab F H, Blood E B, Steiner T O, Jones H R. Magnetic position and orientation tracking system. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1979, AES-15: 709-718
- [81] Kraichman M B. Handbook of Electromagnetic Propagation in Conducting Media. 2nd Edition. Headquarters Naval

- Material Command, University of Michigan Library, USA, 1976
- [82] Lin Dong, Chen Xin. Mathematical models of 3D magnetic field and 3D positioning system by magnetic field. Applied Mathematics & Information Sciences, 2014, 8(4): 1647-1654
- [83] Tsumura T, Yoshioka H, Hidenori S. Magnetically preloaded aerostatic guideway for high speed nanometer positioning.

 Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, 2014, 8(4): 1-11
- [84] Doherty L, Pister K S J, El Ghaoui L. Convex position estimation in wireless sensor networks//Proceedings of the Infocom 2001, Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Columbia, America, 2001; 1655-1663
- [85] Jia Jiteng, Sogabe T, Li Sumei. A generalized symbolic Thomas algorithm for the solution of opposite-bordered tridiagonal linear systems. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2015, 290; 423-432
- [86] Nesterov Y, Nemirovskii A. Interior-point polynomial algorithms in convex programming. Philadelphia, USA: SIAM, Society for Industrial & Applied Mathematics, 1994
- [87] Borg I, Groenen P J F. Modern Multidimensional Scaling, Theory and Applications. New York, USA: Springer, 2005
- [88] Yi Shang, Ruml W. Improved MDS-based localization// Proceedings of the InfoCom 2004, Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Hong Kong, China, 2004; 2640-2651
- [89] Vivekanandan V, Wong V W S. Ordinal MDS-based localization for wireless sensor networks. International Journal of Sensor Networks, 2006, 1(3): 169-178
- [90] Vivekanandan V, Wong V W S. Ordinal MDS-based localization for wireless sensor networks//Proceedings of the 2006 IEEE 64th Vehicular Technology Conference (VTC-2006). Montreal, Canada, 2006; 1-5
- [91] Ji Xiang, Zha Hongyuan. Sensor positioning in wireless ad hoc sensor networks using multidimensional scaling//Proceedings of the IEEE InfoCom, 2004. Hong Kong, China, 2004: 2652-2661
- [92] Demartines P, Herault J. Curvilinear component analysis: A self-organizing neural network for non linear mapping of data sets. IEEE Transactions on Neural Networks, 1997, 8(1): 148-154
- [93] Li Li, Kunz T. Cooperative node localization using nonlinear data projection. ACM Transactions on Sensor Networks, 2009, 5(1): 1-26
- [94] Alikhani S, St-Hilaire M, Kunz T. iCCA-MAP: A new mobile node localization algorithm//Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. Marrakech, Morocco, 2009: 382-387
- [95] Kusy B, Ledeczi A, Maroti M, Meertens L H. Node density independent localization//Proceedings of the 5th International

- Conference on Information Processing in Sensor Networks. San Francisco, USA, 2006: 441-448
- [96] Selmi I, Samama N, Vervisch-Pisois A. A new approach for decimeter accurate GNSS indoor positioning using carrier phase measurements//Proceedings of the 2013 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Montbeliard, France, 2013: 1-6
- [97] Sun Guolin, Chen Jie, Guo Wei. Signal processing techniques in network-aided positioning: A survey of stateof-the-art positioning designs. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 12-23
- Brunato M, Battiti R. Statistical learning theory for location [98] fingerprinting in wireless LANs. Computer Networks, 2005, 47(6): 825-845
- [99] Krim H, Viberg M. Two decades of array signal processing research the parametric approach. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(4): 67-94
- [100] Holzmann C, Hochgatterer M. Measuring distance with mobile phones using single-camera stereo vision//Proceedings of the 32nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Macau, China, 2012: 88-93
- Afia A B, Deambrogio L, Salos D. Review and classification [101] of vision-based localisation techniques in unknown environments. IET Radar Sonar and Navigation, 2014, 8(9): 1059-1072
- [102] Albarelli A, Cosmo L, Bergamasco F. Phase-based spatiotemporal interpolation for accurate 3D localization in camera networks. Pattern Recognition Letters, 2015, 63(C): 1-8
- Rabbou M A, El-Rabbany A. Tightly coupled integration of [103] GPS precise point positioning and MEMS-based inertial



Background

The area of localization in wireless networks has draw great focuses of researchers and many important contributions are achieved. This paper gives a survey of these from the aspect of mathematical model, and gives a universal formal description of wireless localization. We also state the problems and challenges with new rapidly growing requirements and ideas for localization improvements.

The work is supported by the National Natural Science Foundation of China with Granted No. 61071073, the New Teacher Fund for Doctor Station, the Ministry of Education

- systems. GPS Solutions, 2015, 19(4): 601-609
- [104] Yoon Y-J, Li K H H, Lee J S. Real-time precision pedestrian navigation solution using inertial navigation system and global positioning system. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(3): 1-9
- [105] Wylie M P, Holtzman J. The non-line of sight problem in mobile location estimation//Proceedings of the 1996 5th IEEE International Conference on Universal Personal Communications 1996. Piscataway, USA, 1996: 827-831
- [106] Karl H, Willig A. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. Wiley, 2005
- [107] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905-1915
- [108] McGuire M. Plataniotis K N. A comparison of radiolocation methods for mobile terminals by distance measurements// Proceedings of the Biennial Symposium on Communications. Kingston, Canada, 2002: 312-315
- [109] Chan Y-T, Hang H Y C, Ching P-C. Exact and approximate maximum likelihood localization algorithms. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(1): 10-16
- Γ1107 Cheung K W, So Hing-Cheung, Ma Wing-Kin, Chan Yiu-Tong. Least squares algorithms for time-of-arrival-based mobile location. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(4): 1121-1130
- [111] Torrieri D J. Statistical theory of passive location systems. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984, AES-20: 183-197
- [112] Langley R B. Dilution of precision. GPS World, 1999, 10(5): 52-59

SUN Da-Yang, born in 1979, Ph. D., lecturer. His research interests include wireless sensor networks, localization theory and technologies for wireless networks.

LEUNG Victor, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His research interests include wireless networks and mobile systems.

with Granted No. 20120061120056 and the Post Doctoral Foundation of China with Granted No. 2012M511340. One concrete work of the projects is to investigate a new theory of wireless network classification using transmitting ranges as weak constraints to improve the feasibility of localizable determinacy algorithms, by weaken the conditions of unique realization and rigid graph theory. The main goal of the projects is to improve the accuracy of localization systems and to make the systems more easy to deploy and more easy to use