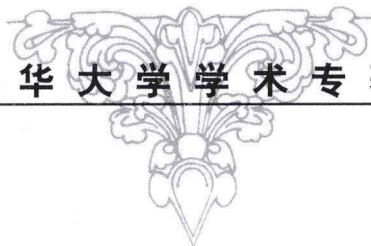


清华大学学术专著

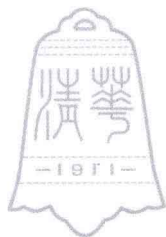


Location-based Computing:  
Localization and Localizability of Wireless Networks

# 位置计算： 无线网络定位与可定位性

杨铮 吴陈沐 刘云浩 著  
Zheng Yang Chenshu Wu Yunhao Liu

孙家广 审



清华大学出版社

清华大学学术专著

Location-based Computing:  
Localization and Localizability of Wireless-Networks

# 位置计算： 无线网络定位与可定位性

杨铮 吴陈沐 刘云浩 著

Zheng Yang Chenshu Wu Yunhao Liu



清华大学出版社

## 内 容 简 介

无线通信技术的高速发展使得以手机、平板电脑、笔记本电脑甚至小型无线传感器节点为代表的移动计算终端迅速普及,目前已超越传统的台式计算机成为互联网最主要的终端设备。移动终端随着使用者的移动或网络部署的变化而随时变换位置,其位置信息对于近些年来在移动计算领域大放异彩的位置服务具有重要意义。本书源自作者10年来在无线定位领域科研工作的总结,包含无线定位的基础知识、技术特点、解决方案以及前沿研究成果。本书按照物理测量、位置计算、数据处理这条主线来安排内容,着重讨论物理测量、单跳位置估计、基于测距的多跳定位、基于非测距的多跳定位、移动连续定位、误差控制、可定位性、室内定位和位置隐私等技术。本书面向所有对定位技术感兴趣的读者。特别地,本书可作为本领域科研人员的参考,研究生专业课程的教材,以及大学本科高年级学生的扩展阅读材料。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。  
版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

位置计算:无线网络定位与可定位性/杨铮,吴陈沐,刘云浩著. —北京:清华大学出版社,2014

清华大学学术著作

ISBN 978-7-302-35113-9

I. ①位… II. ①杨… ②吴… ③刘… III. ①无线电定位 IV. ①TN95

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第144766号



责任编辑:张民 战晓雷  
封面设计:常雪影  
责任校对:梁毅  
责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市中晟雅豪印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×240mm 印 张:10 彩 插:1 字 数:203千字

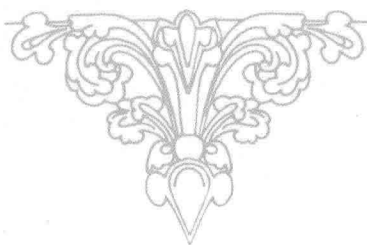
版 次:2014年1月第1版

印 次:2014年1月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00元

产品编号:056208-01



## 作者简介



**杨 铮** 清华大学计算机系工学学士，香港科技大学计算机系工学博士，现任清华大学软件学院助理教授，可信网络与系统研究所助理所长，清华大学教育部信息系统安全重点实验室成员。主要研究方向包括无线网络、普适计算以及移动计算。累计发表论文50余篇，出版英文专著1部。担任INFOCOM (2013, 2014), ICDCS (2012, 2013), MobiHoc 2014等国际学术会议程序委员以及SCI期刊的编委。2011年获得国家自然科学基金二等奖。



**吴陈沐** 清华大学软件学院工学学士，清华大学计算机系博士生。在ACM MobiCom, IEEE INFOCOM等国际会议发表多篇论文。曾获研究生国家奖学金、斯伦贝谢奖学金、清华大学计算机系“学术新秀”称号等。2010年至今担任清华大学软件学院本科生辅导员，2013年获清华大学“林枫辅导员奖”。



**刘云浩** 清华大学长江学者特聘教授、博士生导师，清华大学软件学院院长，ACM中国理事会主席。2008年因传感网创新应用被香港政府授予最佳创新与研究特等奖。2010年获得教育部自然科学一等奖。2011年获得国家自然科学基金二等奖及国家杰出青年科学基金。担任国际期刊《IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems》副主编 (Associate Editors-in-Chief) 和《IEEE/ACM Transactions on Networking》编委。



# 序

随着信息技术向更广泛的互联互通和更全面的智能化方向发展,物理世界与数字世界无缝融合的需求越来越高,使得无线网络的规模不断增大,对网络自组织能力和移动特性的要求不断提高,如何在相应的计算环境中准确获取无线终端的位置信息成为至关重要而又非常困难的问题。

无线定位即利用无线信号确定物体的位置。无线定位涉及的应用非常广,大到定位飞机、轮船、导弹,小到定位手机、手表、传感器,从军事到民用,从工业到农业,从生产到生活。从计算机科学的角度来看,位置是最重要的上下文之一,是判断物体或者人所处的环境与情境的直接证据,是普适计算、移动计算、物联网以及其他基于位置服务的基础信息。

本书以无线定位中的物理测量、位置计算和误差分析这3个阶段为主线,全面讨论了无线定位的理论、分析、系统、实验和性能,涵盖了来自学术界和工业界的最新成果,有助于读者了解这个领域的基本知识和前沿进展。

本书的作者杨铮和刘云浩分别自2006年和2003年开始从事无线定位方面的研究工作,目前均在清华大学任教,另一位作者吴陈沐目前为清华大学博士研究生。近10年来,他们在无线网络和移动计算领域发表50余篇高质量的论文,其中多篇发表于相关领域的顶级期刊和会议,例如 *IEEE/ACM Transactions on Networking*, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, *ACM Transactions on Sensor Networks*, *ACM MobiCom*, *IEEE INFOCOM*, *IEEE ICDCS* 等。他们关于无线定位的研究成果获得2010年教育部自然科学奖一等奖、2011年国家自然科学奖二等奖。

我鼓励他们多年的工作成果和经验加以总结,出版这部学术著作,并愿意推荐给本领域的研究人员和研究生。希望以此促进学术交流,取得共同进步。

中国工程院院士



2014年1月

# 前 言

无线通信技术的高速发展使得以手机、平板电脑、笔记本电脑甚至小型无线传感器节点为代表的移动计算终端迅速普及,目前已超越传统的台式计算机成为互联网最主要的终端设备形态<sup>①</sup>。移动终端随着使用者的移动或网络系统的部署而随时变换位置,其位置信息对于无线通信技术本身以及近些年来在移动计算领域大放异彩的位置服务(Location-based Services)具有重要意义。因此,无线定位技术成为人们关心的兴趣点、工业界的应用重点以及学术界的 research 热点。

本书作者撰写的 *Location, Localization, and Localizability* 一书由施普林格出版社(Springer)于2010年在纽约出版。一转眼几年过去了,随着无线通信技术与嵌入式技术的飞速发展,特别是以 iPhone 为代表的智能手机的流行,无线定位技术取得了长足的发展,许多新技术和新方法将无线定位提升到更广阔的应用舞台,于是我们有了将这个领域的最新研究与应用成果进行总结和整理,出版一本中文著作的想法。

本书的写作过程也是我们学习和重新学习的过程。许多精巧的设计、高效的算法、出众的性能和实用的系统让我们感叹这一领域的丰富成果以及更广阔的未探索区域。本书的部分内容来自同行公开发表的研究成果,部分来自我们科研团队的工作。定位技术所涉及的内容跨越多个学科,而我们的研究工作只限于其中几个方面,因此本书的写作参考了许多相关方面的著作、论文和技术报告,在此向这些文献的作者表示衷心的感谢。在本书中,我们尝试根据自己的理解去组织、描述和评价现有的工作,争取通过本书勾勒出无线定位技术的发展前沿。

本书按照物理测量、位置计算和数据处理这条主线来安排内容。具体来讲,本书第2章讨论物理测量的方法,包括测量无线信号的传播距离、到达角度、覆盖区域和网络邻近关系等。物理测量是定位的基础,定位的精度受限于物理测量的精度。第3章分析在物理测量基础上的单跳位置计算方法,无论是无线自组网定位还是无线室内定位都以单跳位置计算为核心。第4章和第5章分别介绍网络定位中基于测距的和基于非测距的多跳定位方法。第6章描述利用移动信息的特殊定位方法,网络终端的移动性既为定位带来了难度,也带来了更强的位置时空关联性。第7章讨论当物理测量出现误差或者异常的时候,如何在数据层面保证定位的精度。解决方案包括降低异常数据的权重或者直接剔除异常数据,在没有真实

---

<sup>①</sup> 第30次中国互联网络发展状况统计报告. 中国互联网络信息中心(CNNIC),2012.

数据的情况下,实现这个解决方案并不容易。在第8章中,我们关注的重点转变为判断物理测量所获得的观测信息是否充分,以保证可以计算出目标的位置。对于单跳定位的系统,其可定位性判断相对直观;当应用场景从单跳定位升级为网络定位后,可定位性的判定变得更加复杂。第9章讨论相对成熟但发展依然迅速的无线室内定位技术,相对于以GPS及类似系统占主导地位的室外定位技术,室内定位技术从思想到方法再到系统都是百花齐放的。在第10章中描述定位技术带来的“隐患”,提高定位服务质量与保护用户位置隐私似乎总是一对矛盾。以GPS为代表的卫星定位技术以及机器人定位导航技术在本书中没有涉及。

本书面向所有对定位技术感兴趣的读者。特别地,本书可以作为本领域科研人员的参考,研究生专业课程的教材,以及大学本科高年级学生的扩展阅读材料。本书前3章讲述了无线定位基础知识,对传感网定位感兴趣的读者可以重点阅读第4~8章,对室内定位感兴趣的读者可以重点阅读第9章和第10章。本书整体上是通俗易懂的,我们尽量保持这样一种风格,但从本书所涉及的内容的严谨性角度考虑,部分章节需要读者掌握基本的优化方法、数值计算方法,以及图论的相关知识。

对于本书的完成,我们首先要感谢清华大学孙家广院士、王建民教授、顾明教授,香港科技大学倪明选教授、陈雷教授,美国伊利诺伊理工学院李向阳教授,以及很多国内外的同事和同行,他们是李默、韩劲松、何源、刘克彬、王继良、毛续飞、赵弋洋、杨磊、惠维、王小平、陈涛、简丽荣等。在本书的写作过程中,我们还得到清华大学和香港科技大学的多位研究生的帮助,他们包括刘峻良、周子慕、上官龙飞、孙伟、张幸林、徐涵、魏红亮、熊曦、林琼政、段春晖等。本书的完成得到了国家自然科学基金项目(编号61171067、61190110、61125202)、国家高技术发展研究计划(863)项目(编号2011AA010100)和国家重点基础研究发展计划(973)项目(编号2012CB316200)的资助。清华大学出版社的张民老师对本书的出版给予了大力支持。在此一并表示感谢。

人生是一个不断学习的过程,这本书可以作为我们科研工作的阶段总结。希望大家不吝赐教,我们的电子邮件地址是hmilyyz@gmail.com。

作 者

2014年于清华园

# 目 录

第 1 章 无线定位概述	1
第 2 章 物理测量	6
2.1 距离测量	6
2.1.1 基于信号强度的测距模型	7
2.1.2 基于信号到达时间的测距模型(ToA)	9
2.1.3 基于信号到达时间差的测距模型	15
2.2 角度测量	17
2.3 区域测量	18
2.3.1 单参考点的目标区域估计	18
2.3.2 多参考点的目标区域估计	19
2.4 跳数测量	20
2.5 邻居测量	21
2.6 小结	21
第 3 章 单跳位置估计	23
3.1 基于距离的定位方法	23
3.2 基于到达时间差的定位方法	25
3.3 基于到达角度的定位方法	27
3.4 基于信号指纹的定位方法	28
3.4.1 离线测量方案	28
3.4.2 在线测量方案	29
3.5 小结	31
第 4 章 基于测距的多跳定位	32
4.1 计算组织方式	32
4.2 集中式定位算法	33
4.2.1 多维标度(MDS)	33
4.2.2 半定规划(SDP)	35



4.3	分布式定位方法	37
4.3.1	基于锚节点的网络定位	37
4.3.2	坐标系拼接	40
4.4	小结	45
<b>第5章</b>	<b>基于非测距的多跳定位</b>	<b>47</b>
5.1	基于跳数的定位	47
5.2	各向异性网络中基于跳数算法的改进	48
5.2.1	各向异性网络中的基于PDM的定位	48
5.2.2	带洞网络中的染色路径	50
5.2.3	基于Delaunay复体的定位	53
5.3	基于相邻性的定位算法	57
5.3.1	PIT测试	57
5.3.2	垂直线相交	58
5.3.3	相对距离估计	60
5.4	小结	62
<b>第6章</b>	<b>移动连续定位</b>	<b>64</b>
6.1	概述	64
6.2	蒙特卡罗定位	65
6.2.1	粒子滤波器	65
6.2.2	序贯蒙特卡罗定位	66
6.3	凸近似定位	68
6.4	移动基线定位	71
6.5	小结	74
<b>第7章</b>	<b>误差控制</b>	<b>75</b>
7.1	测量误差	75
7.1.1	距离测量误差	75
7.1.2	含噪声测距结果的负面影响	76
7.2	误差特征	76
7.2.1	什么是CRLB	77
7.2.2	多跳定位的CRLB	77
7.2.3	单跳定位的CRLB	78
7.3	定位歧义性	79

---

7.4	位置精化	81
7.4.1	位置精化的框架	81
7.4.2	位置精化的度量	82
7.5	抗异常值定位	85
7.5.1	显式筛选	85
7.5.2	隐式弱化	89
7.6	小结	93
<b>第8章</b>	<b>可定位性</b>	<b>94</b>
8.1	网络可定位性	94
8.2	图刚性理论	95
8.2.1	全局刚性图	95
8.2.2	网络可定位性与图刚性理论	97
8.3	构造全局刚性图的一般方法	97
8.3.1	三边测量法	97
8.3.2	轮图	99
8.4	节点可定位性	103
8.5	小结	110
<b>第9章</b>	<b>室内定位</b>	<b>111</b>
9.1	室内定位的特点	111
9.2	室内定位技术	113
9.2.1	基于专用设备的定位	113
9.2.2	基于 WiFi 信号测距的定位	115
9.2.3	基于 WiFi 信号指纹的定位	118
9.3	新方法与新挑战	127
<b>第10章</b>	<b>位置隐私</b>	<b>129</b>
10.1	位置隐私概述	129
10.2	位置隐私面临的威胁	130
10.2.1	信息窃取	130
10.2.2	隐私泄露的后果	130
10.3	位置隐私保护策略	131
10.3.1	制度约束	131
10.3.2	隐私方针	132

---

10.3.3	身份匿名	133
10.3.4	数据混淆	133
10.4	基于匿名的位置隐私保护	134
10.4.1	$k$ -匿名	135
10.4.2	混合区域	136
10.4.3	傀儡位置	138
10.4.4	路径混淆	139
10.4.5	基于匿名的位置隐私保护方法的比较	141
10.5	小结	142
参考文献		143

# 第 1 章 无线定位概述

位置,位置,位置。——佚名

西方谚语说:一个便利店的成功取决于三个因素:位置,位置,还是位置。在中国,军事家用“天时地利人和”将地理信息置于影响战争的三要素之一。位置是人或物体在物理世界中的自然属性,也是生活中人们非常关心的信息,小到“超市在哪里”,大到“拉登在哪里”,都和位置有关。

位置信息有多重要?例子太多了,人们第一个想起的可能是“不教胡马度阴山”的飞将军李广。据《史记》记载,李广死于汉朝与匈奴的决定性战役漠北之战中,但并非死于敌人的弓箭长矛,而是自刎身亡。元狩四年(公元前 119 年),李广任前将军,因迷失道路,未能参战,愤愧自杀。李广的遗言“广结发与匈奴大小七十余战,今幸从大将军出接单于兵,而大将军又徙广部行回远,而又迷失道,岂非天哉!且广年六十余矣,终不能复对刀笔之吏”让王勃感叹“冯唐易老,李广难封”。古往今来许多人分析了“李广难封”的原因,性格、战法、时势等不一而足。我们认为位置信息缺失也是其中一个主要原因。茫茫大漠中行军作战,发现自己以及敌人的位置是赢取战争的先决条件,李广的战法又何尝不受限于当时的定位技术。

定位不一定要通过特殊的定位技术。生活中找人、找物、找商场、找饭店都采用了各种朴素的定位方法。通俗来讲,定位就是通过观察测量确定一个物体的位置。这个位置可以是物理世界中的坐标,例如 GPS 提供的以地球为参照系的经纬度坐标;也可以是逻辑位置,例如室内定位中依据建筑内部结构图给出的房间号。采用不同的技术,定位的精度从毫米到千米都有可能,适用于不同的应用场景。

要定位一个物体总少不了对这个物体的观测。“众里寻他千百度,蓦然回首,那人却在灯火阑珊处”,这是以可见光为观测手段的定位;“姑苏城外寒山寺,夜半钟声到客船”,这是以声波为观测手段的定位。无论是可见光还是声波,广义上讲都是无线信号,在此基础上的定位技术都可以归为无线定位。然而以人为主体的眼观耳听毕竟有局限,自 20 世纪开始,人们开始使用无线电作为信号。最早的应用大都是军事用途,例如雷达定位、卫星定位,依赖于专业人员、专业设备以及保密的技术。

无线定位技术第一次与人们日常生活的亲密接触要归功于 GPS 的普及。GPS 是全球定位系统(Global Positioning System)的简称,已成为目前世界上最常用的卫星导航系统。GPS 计划开始于 1973 年,1989 年正式开始发射 GPS 工作卫

星,1994年第24颗工作卫星的发射标志着GPS卫星组网的完成,从此GPS正式投入使用,为地球表面绝大部分地区(98%)提供准确的定位。2000年5月1日,美国总统克林顿命令取消GPS系统在民用上的诸多限制,从此民用GPS信号可以达到几米到十几米的精度,大大拓展了GPS的可用性。十几年来,GPS已成为室外定位的龙头老大,从轮船、汽车到手机、手表,都可以配备上GPS定位模块,完成定位和导航的功能。GPS定位的基本原理很简单,首先测量接收机与多个GPS卫星之间的距离,然后通过三点定位方式确定接收机的位置。与GPS类似的系统还包括俄罗斯的GLONASS全球卫星导航系统、我国的北斗一号区域性卫星导航系统以及欧盟的伽利略定位系统。我国目前正在建设自主研发的北斗二号全球卫星导航系统,届时将可提供全球范围的信号覆盖。

GPS是室外定位的龙头老大,但到了室内就力不从心了。由于建筑物对卫星信号的遮蔽,GPS终端在室内或者建筑物密集的室外很难搜索到卫星信号,同样的道理,森林和地下环境也是GPS的软肋。在这种情况下,定位技术由室外拓展到室内的接力棒就交给了以WiFi定位为代表的室内定位技术。WiFi定位的流行完全可以归功于WiFi作为无线接入技术的流行。WiFi网络基础设施和终端的普及使得WiFi定位变得十分方便且成本低廉。主流的WiFi定位技术是基于信号指纹的,其过程分为训练和运行两个阶段。在训练阶段,工程师现场勘测室内区域内每个位置的无线信号指纹(通常表示为该位置可侦测到的多个网络接入点的信号强度所构成的向量),这些指纹及其相应的位置最终形成由二元组<指纹,位置>构成的指纹数据库,供下一步查询使用。在运行阶段,用户将其所在位置的指纹作为关键字查询指纹数据库,定位系统根据特定算法将指纹数据库中最匹配的指纹所对应的位置作为用户的定位结果。当然,用户的历史位置和运动信息能进一步提高定位精度。WiFi定位可以实现房间级别(或米级)的精度,可用于人员、资产的定位和管理,例如,医生在哪个病房,打印机在会议室的哪个角落。如果需要更高精度的定位,例如厘米级的精度,单纯凭借WiFi指纹就不够了。

随着无线定位技术的普及,“基于位置的服务”(Location Based Service,LBS)正向我们展现出广阔的市场前景。广义上说,位置信息不只是空间信息,应该包括所处的地理位置、处在该地理位置的时间以及处在该地理位置的对象(人或设备)。也就是说,位置信息承载了“时间”、“空间”和“人物”三大关键信息。利用这些信息,不仅可以“因地制宜”,提供所在地附近的相关服务,还可以根据时间“见机行事”,提供时效性更佳的服务,更可以“因人而异”,提供个性化的定制服务。什么时候提供什么样的服务取决于用户的位置,到了饭馆周围提供当日特价菜,到了电影院周围提供影讯,到了教学楼提供附近教室课程信息等等,这些信息不仅避免了广告的盲目性,还给用户贴心的感觉。LBS广告利用位置信息将线上流量导入到线下商店,成为未来具有竞争优势的广告投放模式,其最热门的应用行业是餐饮类,

也包括快消零售类、金融银行类、汽车类和日化类等其他行业。值得注意的是,定位技术也是把双刃剑,位置信息丰富的内涵使得越高精度的定位技术就越让我们置身于更大的安全风险之中。不法分子可以利用我们的位置信息推测出各种各样关于我们个人的隐私信息。如何在使用 LBS 的同时做好位置隐私保护的工作是 LBS 面临的重要挑战。

无论是 WiFi 还是 GPS,其网络结构都是单跳的,终端设备(GPS 中是接收机、WiFi 中是无线网卡)直接与基站通信(GPS 中是卫星、WiFi 中是接入点),形成以基站为中心的星形网络。随着以传感网、物联网为代表的无线自组织网络技术的发展,定位技术也相应地从基站定位(单跳定位)升级为网络定位(多跳定位)的方式:网络中少量节点(一般称为信标节点或者锚节点)通过手工设置或 GPS 拥有全局位置信息,其余大量节点先获取与邻居节点的相对位置关系,再通过无线网络交换数据相互配合进而获得全局位置。这种定位方式还有合作定位、迭代定位等其他名称,这些名称的共性都强调当被定位的终端不能与信标直接通信时,需要其他终端的配合确定与信标的相对位置。在无线自组织网络中,位置与无线网络的关系不再是单一地通过无线网络计算位置,位置同样也可以反作用于网络:不仅使感知数据具有地理意义,还能辅助其他网络功能和管理,例如路由、拓扑控制和边界发现等。

无论是何种定位技术,都离不开以下 3 个主要环节。

(1) 物理测量。对物理世界的测量手段包括 WiFi、GPS、BlueTooth、ZigBee、UWB、红外、光波、声波和超声波等,最新的研究工作还使用了广播信号和地磁场;测量结果的表示包括距离、时间、方向、区域、连接关系和信号指纹等。一方面,定位对于物理测量手段并没有什么限制,任何信号都能用来定位,只要这种信号具有位置区分性,即不同位置上信号的观测结果是不同的。例如一般情况下空气成分就不太能作为区分位置的手段,因为很多地方、很大区域内空气成分都是相同的;但是,一旦某个地方的空气中有特殊成分,那么空气成分不失为一种有效的定位手段。另一方面,不同的测量手段各有千秋。超声波、声波等传播速度较慢的信号可以准确测量信号传播时间从而计算出传播距离(厘米级别的精度);而无线电波传播速度快,只能依赖于信号衰减模型计算传播距离(一般还达不到米级的精度),但是易于获取信号指纹,同时又可用于数据通信。有些无线电波如 UWB 适用于信号到达时间差的计算,也可将定位精度提高到厘米级别。

(2) 位置计算,即与信标节点相对位置的估计。如果未知位置节点可以直接与信标节点进行物理测量,这就是单跳(single-hop)定位,例如 WiFi 定位、手机基站定位等。单跳定位的计算方法根据测量结果的表示不同而不同,例如,测距方法通常使用最小二乘法计算位置,指纹方法通常使用最相似匹配估计位置。如果未

知位置节点不能直接与信标节点进行物理测量,这就是多跳(multi-hop)定位,例如传感网和无线自组网络。一般来讲,在多跳定位中,能够与信标节点直接通信的节点率先计算出自身相对于信标节点的位置,待计算完成后将自己标记为信标节点,这样一来自己的位置信息可以用于其他节点的位置计算,使得那些在最开始的时候不能与信标节点直接通信的节点也能够完成位置计算。按照这样的计算方式不断迭代下去,位置信息从信标节点开始,一层一层地逐渐扩散到网络边缘,直到全网节点都完成位置计算。因此,多跳定位除了要考虑单跳定位的所有因素之外,还要考虑网络节点的计算顺序以及信标节点的选取等独有的因素。

(3) 数据处理。对数据的处理贯穿定位的每个环节。例如,测量两个无线终端之间的距离,如何应对环境因素带来的随机误差?如何剔除明显的错误数据?这些都需要误差控制技术,从最简单的取平均值到复杂的鲁棒统计学,都是处理误差和发现异常的有效手段。再如传感网定位中,如果网络中节点间距离信息过少,那么网络中部分节点就不能计算出唯一位置。这个“过少”应该如何量化呢?这就是网络定位中的可定位性问题,需要利用图刚性理论进行分析。如果节点间距离信息过多呢?需要优化算法来计算尽量满足所有观测值的最优解,也需要用统计方法来估算定位计算所能达到的精度。

好的定位方法不单单追求定位精度,而是以满足应用需求、适应环境特点为追求目标。上面所说的无论是物理测量,还是位置计算、数据处理等,都包括多种多样的具体方法,需要因地制宜地进行选取和组合,没有哪一种方法可以在所有环境中胜出。精度高的方法也很可能在硬件成本或者普及性方面存在天然劣势。

进入 21 世纪以来,随着信息技术向更广泛的互联互通和更全面的智能化方向发展,物理世界与数字世界无缝融合的需求越来越高,使得无线网络的规模不断扩大,对网络自组织能力和移动特性的要求不断提高。这种趋势愈演愈烈,在我国称之为“物联网”,美国称之为 Cyber-Physical System,欧盟称之为 Internet of Things。在物联网中,物体既是物理世界中的实体,也是数字世界中的对象,而定位成为沟通物理世界和数字世界的桥梁。数目巨大的联网设备、层出不穷的联网终端、多种多样的无线通信技术等给定位技术带来了全新的机遇和挑战,也构成了定位技术发展向前的驱动力。

我们从不把定位看作单纯的冷冰冰的技术,只用来定位飞机、导弹、汽车、轮船;与之相反,定位是为人们带来方便的技术,是含情脉脉的技术。曾经听说过一个让人印象深刻的故事:在通信和定位还不发达的时代,两个年轻人偷偷恋爱私定终身。男人去北京闯荡,而女人几个月后也坐火车辗转到北京,两人约在火车站前的广场。不幸的是,女人等了好几天也没有等到男人,为了维持生计就在火车站

前开了一个小卖部,一边卖东西一边等。男人没等到女人很失望,想尽一切办法也联系不上,甚至寻到女人老家,可女人在老家也没有什么亲人。6年后,男人出差返京,错误地在北京前一站丰台就下了火车,正寻思怎么回去,走到一个小卖部买烟……这才了却了6年的相思。如果使用定位技术,则可不再让错过变成过错,不再让空间上的迷失造成心灵上的迷失。这也是人们追求定位技术不断发展的驱动力之一。



## 第2章 物理测量

一个物体在空间中的位置可以通过一系列物理量来描述。这些物理量包括但不限于距离、方向和区域等。对这些物理量的观测(即物理测量)是定位中必不可少的一环。根据测量设备能力的不同,将物理测量方法按照测量精度从高到低的顺序分为以下6大类(如图2-1所示):目标的精确位置、目标与参考点之间的距离、目标与参考点之间的角度、目标所在区域、目标与参考点之间的网络跳数,以及目标邻居节点信息。



图 2-1 物理测量

在这6类测量方式中,最有效的便是直接获取目标的精确位置。除此之外,其他5类测量方式都是基于给定的参考点来对目标进行定位。在这5类定位方式中,获取目标与参考点之间的距离或者角度是基于测距的方式,而获取目标与参考点之间的网络跳数或者目标的邻居节点是基于无线网络的连通性(即非测距的方式)。最后,获取目标所在区域的定位方式既可以基于测距又可以依靠网络连通性,依区域自身的属性而定。

### 2.1 距离测量

现实世界中,很多物理现象都直接或者间接包含着距离约束。例如,信号强度随距离的增加而衰减,信号的传播时间随距离的增加而延长。通过对信号物理特性的探究,学者们提出了多种数学模型将测量得到的信号值转化为被测物体与观察者之间的距离。在本节中,主要关注3种典型的测距数学模型:基于接收信号强度的测距模型(Received Signal Strength, RSS)、基于信号到达时间的测距模型(Time of Arrival, ToA),以及基于信号到达时间差的测距模型(Time Difference of Arrival, TDoA)。