

引文格式: 闫大禹, 宋伟, 王旭丹, 等. 国内室内定位技术发展现状综述[J]. 导航定位学报, 2019, 7(4): 5-12. (YAN Dayu, SONG Wei, WANG Xudan, et al. Review of development status of indoor location technology in China[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2019, 7(4): 5-12.)
DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20190402.

国内室内定位技术发展现状综述

闫大禹, 宋伟, 王旭丹, 胡子烨

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100091)

摘要: 为了进一步研究室内定位技术, 通过介绍几种主流室内定位技术的原理及国内发展情况, 包括有无线保真(WiFi)、蓝牙、超宽带、蜂窝移动网络、伪卫星、惯性导航和地磁, 基于最新国内室内定位技术比测结果, 讨论无额外设备辅助的智能手机定位、允许额外辅助的智能手机定位和允许额外设备辅助的其他终端定位 3 种场景下当前国内成熟的室内定位技术方案, 并在此基础上总结国内室内定位技术方案的发展趋势, 提出多传感器组合导航定位方案的改进优化和新兴室内定位技术的开拓创新思路, 探讨室内定位标准和性能体系构建的可能性。

关键词: 位置服务; 室内定位; 定位技术; 定位方案

中图分类号: P228 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-4999(2019)04-0005-08

Review of development status of indoor location technology in China

YAN Dayu, SONG Wei, WANG Xudan, HU Ziye

(School of Electronic Information and Engineering, Beihang University, Beijing 100091, China)

Abstract: In order to further study on indoor location technology, the paper introduced the principles and domestic development of several main indoor location technologies, including WiFi, bluetooth, UWB, cellular mobile network, pseudosatellite, inertial navigation and geomagnetism and so on; and discussed the mature technology solutions under three scenarios: smartphone positioning without additional equipments, smartphone positioning with additional assistance and free terminal positioning with additional equipments based on the latest comparison results of domestic indoor location technology; then summarized the development trends of indoor location technology in China, and proposed the improvement and optimization of multi-sensor integrated navigation and positioning schemes and the innovation of emerging indoor positioning technology; finally gave the probability of establishing the indoor location standards and performance system.

Keywords: location-based service (LBS); indoor location; positioning technology; positioning scheme

0 引言

基于位置的服务(location-based service, LBS)作为一种生活方式已逐渐渗透到人类生活的方方面面。准确的位置信息是开展 LBS 的前提。目前, 人类可依赖全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)达到亚米级的室外定位精

度; 但是由于卫星信号无法穿透建筑物, 室内定位无法利用 GNSS 实现。

人类平均约有 70 %~90 % 的时间在室内度过, 且在室内对 LBS 的需求更迫切。在 GNSS 无法提供室内定位服务的情况下, 准确的室内位置信息已成为开展室内 LBS 的瓶颈。工业界和学术界均在探求高精度、高可靠性的室内定位技术, 以期在

收稿日期: 2019-02-20

基金项目: 北航北斗技术成果转化及产业化资金资助项目(BARI1806)。

第一作者简介: 闫大禹(1996—), 男, 安徽阜阳人, 硕士生, 研究方向为室内定位。

通信作者简介: 宋伟(1992—), 男, 河南信阳人, 博士生, 研究方向为导航定位。

电磁环境和地理环境复杂的室内环境中获取准确的位置信息。2011 年谷歌依赖有无线保真(wireless fidelity, WiFi) 和移动通信基站等信息发布室内地图, 覆盖包括商场超市、机场、车站等建筑物; 苹果依靠大量 iBeacon 设备和用户的 iPhone 绘制室内地图, 精度优于谷歌; 加拿大 Calgary 大学结合传感器、公共场合无线信号(WiFi、蓝牙) 以及室内环境特征(如磁场环境), 实时、可靠地提供用户在室内的位置。此外韩国三星公司、俄罗斯 Spirit 公司、意大利 Zetesis 公司、德国斯图加特大学、韩国首尔大学、比利时安特卫普大学等都在室内定位领域开展研究。我国于“十二五”期间启动了“羲和”计划, 旨在构建能够提供室内 3 m、室外 1 m 的精密定位服务系统; “十三五”期间在对地观测领域启动了多项室内定位方向的国家重点研发计划, 以国家重点研发计划为支撑, 国内多家企业、高校院所也竞相开展了室内定位技术的研究。

本文以国家遥感中心主办的“2018 年室内导航定位比测”中各参测团队提供的室内定位方案和比测数据为参考, 总结国内现有主流室内定位技术, 讨论不同应用场景下的室内定位方案, 对国内室内定位发展趋势作分析和展望。

1 国内主流室内定位技术总结

本文将室内定位技术分为 2 类: 第一类为基于外置信源的室内定位技术, 这类技术的实现依赖于外置信源, 主要包括 WiFi、蓝牙、超宽带(ultra wide band, UWB)、蜂窝移动网络和伪卫星; 第二类为基于天然信源的室内定位技术, 这类技术仅依靠终端的传感器即可实现定位, 包括惯性导航、地磁导航等。随着室内定位技术的不断进步, 定位精度也逐渐提高到米级甚至亚米级, 开始迈入消费级市场水平。表 1 给出了不同室内定位技术的对比情况。

表 1 室内定位技术对比

信号载体	典型定位方式	定位精度	成本	不足
WiFi	基于信号场强定位	米级	高	室内覆盖区域有限, 前期部署成本高
蓝牙	基于信号场强定位	米级	高	
超宽带	基于时延或到达角的几何解算	视距环境可达亚米级	极高	设备成本高, 难以满足消费级需求
伪卫星	基于时延的几何解算	视距环境可达亚米级	高	无其他增值应用
蜂窝移动网络	基于 TC-OFDM 信号进行测距定位	米级	低	对基站依赖程度高
惯性导航	基于航位推算方法	米级	低	存在累积漂移误差
地球磁场	基于信号场强定位或与其他技术组合应用	米级	低	地磁指纹特征差异小

1.1 基于外置信源的室内定位技术

1.1.1 WiFi 定位技术

利用 WiFi 信号实现室内定位有 2 种方法, 测距交汇法和指纹匹配法。测距交汇法是指利用信号强度衰减模型将 WiFi 信号从接入点到接收机的信号衰减强度转化为 2 者之间距离, 采用三角定位法, 根据 3 个以上接入点到接收机之间的距离约束对接收机的位置进行估算。该方法优点在于无需建立维护数据指纹库, 且定位精度比指纹匹配法精度高; 缺点在于信号强度衰减模型与室内环境强相关, 由于室内环境复杂多变且非视距现象严重, 很难获取准确的信号强度衰减模型。

指纹匹配法是将难以直接测量的位置信息和容易获取的信号特征(如无线信号强度)建立映射关系, 即对应每个室内场景的位置坐标建立专属的信号特征指纹, 从而匹配估算出待测目标

的空间位置。指纹匹配法分训练和定位 2 步进行: 训练是将定位环境划分网格, 并在网格点采集信号指纹, 如 WiFi 强度, 建立指纹库; 定位是将接收到的信号特征测量值与指纹库中的值进行比对, 通过相似性分析得到室内位置估计。与测距交汇法相比, 该方法的优点在于不要求解信道衰减模型, 缺点在于指纹库的构建需要耗费大量人力。

目前, 国内有多家单位致力于研究 WiFi 定位技术, 在传统 WiFi 室内定位的多个方面逐步取得技术突破和进步, 主要包括指纹库采集成本降低、指纹库精度提升和匹配方法的优化等等。

基于 WiFi 信号的指纹匹配法首先要经过离线构建指纹库的阶段, 场地栅格化、网格点信号指纹采集、指纹库校正处理都需要消耗一定的人力物力成本, 极大地制约了室内定位技术在实际场合中的投入使用。针对离线建库成本的问题, 文献[1]提

出基于众包数据建立室内定位方法与平台, 由广大用户上传并不断更新指纹数据, 节省离线建库阶段的成本消耗, 同时避免了由于 WiFi 设备和信号波动导致的指纹库时效性问题, 可提供长时间的有效定位保证。采集的 WiFi 信号强度是指纹库构建的重要依据。单条指纹的复杂程度由无线接入点的密度和数量决定。但现实考虑不能无限制的增加路由器设备; 因此如何利用有限的设备产生的 WiFi 信号构建高精度指纹库, 也是指纹匹配法现实应用中面临的难题。文献[2]提出用相邻位置的信号强度差值建立梯度指纹库, 通过 z 检验使梯度库二值化; 文献[3]提出使用基于离群点检测与双阈值滤波算法处理采集到的不同无线接入点信息, 在提高指纹库精度方面具有优秀表现。在线定位匹配阶段, 要实时将定位终端采集到的 WiFi 信息与指纹库匹配。对于信号数据处理和匹配算法的研究, 北京智慧图公司利用虚拟指纹提升接入点 (access point, AP) 稀疏时的定位稳定性。文献[4]在定位场景内均匀部署少量的参考节点以实时监测环境信号变化, 对定位终端测量的接收信号强度指示 (received signal strength indicator, RSSI) 进行动态补偿, 显著提高在线定位阶段的稳定性和精度。

1.1.2 蓝牙定位技术

与 WiFi 定位原理相同, 蓝牙定位分为测距交汇法和指纹匹配法。由于绝大多数智能手机终端都自带蓝牙模块, 方便大范围地普及和场地设备的部署; 但是基于蓝牙的定位技术容易受到外部噪声信号的干扰, 信号稳定性较差, 通信范围较小^[5]。最常用的蓝牙定位技术是基于蓝牙 4.0 的低功耗蓝牙技术, 即 iBeacon 技术, 该技术具有低功耗、连接速度更快、传输速率高、信号传输稳定安全无干扰等特点^[6]。iBeacon 技术尚未大规模工程应用, 其原因在于需要高密度部署蓝牙信标, 加之软件费用较高, 使得该系统成本偏高^[7]。

蓝牙设备同样可作为无线接入点, 与 WiFi 定位技术类似; 因此指纹匹配算法同样应用广泛, 针对信号范围小、稳定性差等特点, 经常与 WiFi 组合应用来实现室内定位的小范围区域增强。

国内有几家企业开发了 iBeacon 的产品, 包括 SENSORO、四月兄弟、智石科技和 Drop Beacon; 但针对蓝牙定位技术的理论研究较少, 主要集中于定位算法层面。文献[8]提出了一种基于核岭回归的自适应蓝牙定位算法, 该算法对蓝牙信号强度的动态变化具有较好的适应性和鲁棒性。国内

对蓝牙在室内定位领域的技术研究与 WiFi 有所区别的进展是, 文献[9]充分考虑到蓝牙范围小、布设方便的特点, 研究特定场地下蓝牙设备的数量、密度和位置的最优化布设方案, 提出在小范围内区域如办公室环境中将蓝牙 5~6 个呈放射状排列、直线贯通区域如走廊中呈直线排列, 可以达到最高的定位精度和可靠性。

1.1.3 UWB 定位技术

UWB 定位技术用来传输数据的脉冲信号功率谱密度极低、脉冲宽度极窄, 因此具备了时间分辨率高、空间穿透能力强等特点, 在视距 (line of sight, LOS) 环境下能获得优于厘米级的测距和定位精度。UWB 最初便是用于军事工业用途, 2002 年才发布商用化规范, 就目前的情况而言, UWB 设备价格昂贵, 部署成本比较高, 虽然在专业领域中应用广泛且表现极佳, 但难以进入消费级市场^[10-11]。UWB 定位方法包括信号到达角 (angle of arrival, AOA)、接收信号强度 (received signal strength, RSS)、信号到达时间 (time of arrival, TOA) 和信号到达时间差 (time difference of Arrival, TDOA), 是一种典型的基于测距方法的定位技术。

早在 2001 年我国发布的“十五”国家 863 计划就将“超宽带无线通信关键技术及其共存与兼容技术”作为无线通信共性与创新技术的研究内容, 国内高校如中国科学技术大学、北京邮电大学、东南大学等就 UWB 定位技术开展了研究。文献[12]中研究了超宽带信号接收中的低位宽量化问题, 并对室内复杂环境下的稳健到达时间估计问题进行了研究, 给出了室内环境下的固定节点定位方法。超宽带定位在非视距 (non line of sight, NLOS) 环境下的相关研究也是 UWB 定位技术的一个热点。文献[13]提出了一种基于机器学习的超宽带 NLOS 鉴别方法, 该方法较大地提升了鉴别的准确度和误差消除能力。文献[14]建立了信号的穿墙传播模型, 并提出了一种 NLOS 误差减小方法, 有效减小误差并提高对目标的定位精度。同时, 定位算法的融合也是领域内的研究热点趋势: 文献[15]将 AOA 算法与 TOA 算法进行融合; 文献[16]对 TOA 算法与 TDOA 算法进行融合, 从而有效提高定位精度。

1.1.4 蜂窝移动网络定位技术

随着第二代、第三代到第四代移动通信长期演进 (long term evolution, LTE) 定位技术的发展, 基于基站的蜂窝移动网络定位技术的精度得到了较大提高; 第 5 代移动通信技术 (the fifth generation

of mobile network communication technology, 5G) 协议的投入商用对室内定位领域是一个巨大的契机, 其密集组网技术也使得基站定位具备广阔的应用前景和发展空间^[17]。蜂窝定位技术可以便捷使用搭建的基础设施, 依靠移动通信系统的体系结构和传输信息实现用户的位置坐标推算。利用室内可直接测得的无线电通信信号, 与 WiFi、蓝牙、UWB 技术相同, 既可基于信号强度使用传统的位置指纹匹配方法, 也可以进行 TOA、TDOA、AOA 等测距方式测量。蜂窝移动网络定位技术依赖通信基站, 与基站密度密切相关: 虽然室内信号受基站输出功率的动态调整和非视距传播效应的影响, 定位精度不高; 但在室内外无缝定位需求下, 可作为普适化的室内外坐标一体化的定位方案。

依托广泛部署的分布式皮基站, 文献[18]提出了一种基于 LTE 网络的室内定位系统, 利用基站信号的参考信号强度或时延进行定位。为了解决 LTE 室内分布式网络下不同位置处的信号相似性问题, 文献[19]提出基于相关性测序的定位算法, 显著提升了定位精度。针对空缺的室内外无缝定位技术, 我国自主研发的室内外高精度定位导航“羲和”系统中采用时分正交频分复用 (timecode division-orthogonal frequency division multiplexing, TC-OFDM) 技术。该技术由北京邮电大学提出, 它融合了定位和通信信号体制, 属于蜂窝移动网络通信技术的一种, 可实现高精度的广域室内外无缝定位。国内企业如北京首科信通、苏州羲和北斗作为 TC-OFDM 专用设备、产品、室内外位置服务的推广窗口, TC-OFDM 技术逐渐走向成熟和产业化标准。

1.1.5 伪卫星定位技术

伪卫星是指安装在地面附近的能够发射类似于 GNSS 信号的装置, 其本质是一个 GNSS 信号模拟器, 可以作为室内环境中对 GNSS 信号的补充。伪卫星技术定位的规模化难度比较低, 同时定位精度为亚米级^[20], 能够满足大多数时候的定位需求, 但是较高的基站部署成本使该技术停留在专业领域, 尚未投入市场使用。目前国内上海交通大学、中国电子科技集团 54 所也对伪卫星技术进行了深入的研究, 对伪卫星的组网配置方案进行了详细的研究和分析, 共同探讨伪卫星独立组网配置方案的可行方案^[21-22]。

文献[23]提出了在伪卫星系统中对于线性化误差的检测方法, 分析了自校准伪卫星阵列与 LocataNet 系统的关键技术; 并针对伪卫星独立定

位系统中载波相位双差定位的问题, 提出利用在航解算整周模糊度的方法。由于地基伪卫星位置固定, 在信号连续发射模式下伪卫星信号间的多址干扰会引起相对恒定的测距误差。针对地基伪卫星系统这一特点, 文献[24]提出一种基于反馈串行干扰抵消的测距算法, 抵消强功率伪卫星信号对期望测距信号的干扰。文献[25]提出了适合描述室内导航伪卫星信号传播特性的大尺度对数距离路径损耗模型, 及小尺度莱斯-瑞利-对数正态分布模型, 准确描述室内伪卫星信号的传播效应。

1.2 基于天然信源的室内定位技术

基于天然信源的室内定位技术是指利用传感器将某些与位置相关的天然信源转换为可用于定位的信号以实现定位, 例如: 惯性导航技术利用惯性传感器感知载体的运动状态; 地磁导航技术利用地磁传感器获取当前位置的磁场特征; 气压计测高技术利用气压计测量当前位置的气压等。

1.2.1 惯性导航

惯性导航技术是基于惯性传感器 (inertial measurement units, IMU) 对状态进行预测, 具体是利用加速度计、陀螺仪和磁力计等传感器对前一时刻的位置信息进行处理, 得到当前时刻的相对位置。随着传感器的小型集成化与低成本, 近些年来 IMU 被广泛应用于室内定位导航。惯性导航系统基于航位推算方法实现终端的定位, 具备较强的自主性, 短时间内的定位精度和连续性非常高; 但定位导航精度极大地受限于器件成本, 且不可避免地随着时间的推移产生累积误差, 需要借助外界定位信息源不断对位置推算进行校准。

零速校正是惯性导航技术中的一种误差补偿技术, 可以有效控制长时间的累积误差, 提高系统精度。针对零速点的误判和漏判问题, 文献[26]提出了一种新的零速检测算法, 基于加速度传感器和陀螺仪的输出进行零速点检测, 通过扩展卡尔曼滤波算法进行误差修正, 以提高系统精度。以捷联惯性导航原理为基础, 文献[27]设计基于梯度下降的姿态解算算法, 相对于传统的卡尔曼滤波及其衍生算法, 能以更高的实时性获得行人姿态, 结合零速更新算法获得行人静止区间, 实现实时化的行人自主室内定位。文献[28]采用了一种基于无迹卡尔曼滤波的无线定位与惯性导航系统组合的室内定位算法, 解决了无线定位结果波动幅度过大和惯导系统的累积误差问题。文献[29]将惯性导航系统与室内 WiFi 信息、地磁特征相结合, 多

层次约束陀螺仪零偏误差,定位精度可达到 3~5 m,定位结果连续平滑。

1.2.2 地磁定位

地球的磁场特性最先被广泛用于航海和军事等室外定位。地磁定位同样可以采用指纹匹配的方法,通过事先采集并构建精确的地磁指纹数据库,利用传感器获取人员当前位置磁场数据,将实时数据与地磁指纹库基准数据精确匹配获得最佳估测值,从而实现人员在指定区域中的定位^[20]。由于地球磁场分布方向的原因,室内采集到的地磁 3 轴数据本质上只具备 2 个维度的指纹信息,大型建筑物的室内地磁特征差异不明显,在传统的室内区域栅格化指纹匹配方法中表现不佳,因此室内地磁信息多用于室内定位的多源信息融合,与惯性导航系统组合使用,起到辅助和误差纠正的作用。

文献[30]提出了一种基于智能手机的室内地磁定位系统,设计方向和地磁的自适应权重混合位置指纹,通过范围搜寻定位算法匹配室内真实坐标,提高了地磁数据的辨识度和定位精度。针对地磁场特异性不足的问题,文献[31]将动态时间规整算法和粒子滤波算法结合,以路径匹配的方法增加地磁匹配特征的数目,解决了定位结果模糊的现象。文献[32]提出一种基于模糊 C 均值聚类算法及位置区切换的室内地磁定位方法,缩小地磁指纹的匹配范围,减小匹配运算量。

1.3 多源融合定位技术

1.1 节所介绍的各种定位技术各具优势和局限性,如:WiFi、蓝牙和 UWB 信号属于射频信号,易受多径效应的影响;惯性导航虽不依赖外置信源,但定位误差会随时间累积。目前还没有哪种室内定位技术可做到与 GNSS 一样开机即得。目前国内主流的室内定位方法是根据场景需求及各类室内定位技术的特点,选择 2 种及以上的定位技术进行融合以获得当前位置的最优估计。融合方法有 2 种,松耦合和紧耦合法,2 者的区别在于:松耦合需要各类传感器提供定位结果,而紧耦合需要各类传感器直接提供观测信息;松耦合易于实现,但要求各类传感器均输出定位结果,紧耦合较松耦合相比实现难度大,但各类传感器值需提供观测信息即可。信息融合的实现依赖滤波算法,如卡尔曼滤波、无迹滤波和粒子滤波,目前工程应用多采用卡尔曼滤波。

融合定位的信息源可以是多种多样的,GNSS 信号、加速度计/陀螺仪、基站信号、WiFi、蓝牙、

气压计、地磁、视觉、室内地图等等;但融合定位模型和方案同样需要考虑室内定位结果的精度和可靠性:多种信息的协同融合可以带来精度的提升,同样可能会导致灾难性的定位失准。获得传感器数据后需要对多来源信息进行预处理以剔除原生和融合噪声,从数据中提取特征后要根据不同应用情景、设备条件和具体需求进行特征级融合,赋予不同的权重,结合地图信息和各种状态估计滤波算法后进行决策级融合。

2 不同应用场景下室内定位方案

室内定位的需求主要集中于大型公共场所,如体育场馆、机场车站、地下车库、会展中心、大型商超和博物展览馆等。不同的公共场所、不同的群体对室内定位的需求不同,例如:在机场,乘客的终端为智能手机,其需求为找到安检口、登机口等目标位置,定位精度和可靠性要求低;机场地勤工作人员的终端可以是特制的小型手持设备,其需求为准确获取故障设备、突发事件的具体位置,定位精度和可靠性要求高;在体育场馆中,观众的终端为智能手机,其需求为找到观赛座位,定位精度要求高,可靠性要求低;志愿者的终端为某种轻型可穿戴设备,组委会工作人员需获取志愿者的大概位置,以及时调配人力应用突发情况,定位精度要求低,可靠性要求高。考虑到各种室内定位技术的优势和缺陷,应针对不同的应用场景设计不同的室内定位技术方案,在定位性能达标的前提下尽量降低成本。

根据终端类型和额外辅助设备的添加情况,本文将室内定位的应用场景概括为 3 类:无额外设备辅助的智能手机定位场景,允许额外设备辅助的智能手机定位场景和允许额外设备辅助的其他终端定位场景。此处的额外辅助设备是指除室内环境中原有的外置信源外,额外添加的其他外置信源。

2.1 无额外设备辅助的智能手机定位

智能手机是当今社会人手必备的电子产品,对于个人用户,LBS 的开展大多依赖于智能手机。以智能手机为终端实现室内定位有 2 个优势:一是用户不需要额外配置其他专门用于室内定位的手持终端;二是智能手机内置多种可用于室内定位的信号接收器和传感器,包括蜂窝移动信号接收器、WiFi 信号接收器、蓝牙信号接收器、加速度计、陀螺仪、磁力计、气压计等,尽管这些信号接收器和传感器都不是为定位专门设置的,但是它们均可定位为定位所用。

在无额外设备辅助的智能手机定位场景中,国内目前成型的技术方案皆以惯性导航系统为核心,利用场景内可实时测得的 WiFi 信号、基站信号信息进行辅助定位,利用气压计进行测高以完成楼层识别,结合地图匹配技术和滤波算法完成定位精度为 5~10 m 的坐标推算。

根据“2018 年室内导航定位比测”结果,无额外设备辅助的智能手机定位场景下,最优的室内定位技术方案为惯导+WiFi+气压计+地磁+地图约束,水平定位精度优于 3.2 m、高程定位精度优于 1.2 m (95 %置信区间)。此场景下影响定位精度的因素主要包括传感器灵敏度、指纹库的精度、外置信源的几何布局和强度,以及信息融合算法对多元定位信息的优化程度。

2.2 允许额外设备辅助的智能手机定位

目前多数大型公共室内环境中, WiFi、蓝牙和移动蜂窝基站等外置信源的布设是为了通信而非定位,其布设密度远远达不到室内高精度定位的需求。由于室内定位精度与外置信源的部署密度呈正相关,以智能手机为终端的室内定位可通过增加额外的 WiFi 路由器、蓝牙信标和移动蜂窝基站等额外辅助设备来提升定位精度。由于增设移动蜂窝基站需要运营商完成,实施难度大;因此在以智能手机为终端的室内定位场景下,多采用增设 WiFi 路由器和蓝牙信标的方式。

WiFi 信号虽然覆盖范围大,但信号易受干扰,同时路由器的部署需要电源和网络接口,体积相对较大,部署成本较高;蓝牙信标体积小、功耗低,能内置电池独立工作,部署方便;因此国内成熟的技术方案多以添加蓝牙信标辅助智能手机定位。

根据“2018 年室内导航定位比测”结果,以蓝牙信标为额外辅助设备,在蓝牙信标部署密度受到限制条件下,智能手机水平定位精度优于 0.94 m、高程定位精度优于 0.2 m (95 %置信区间)。此场景下影响定位精度的因素主要包括额外辅助设备硬件性能和几何布局、传感器灵敏度、指纹库的精度,以及信息融合算法对多元定位信息的优化程度。

2.3 允许额外设备辅助的其他终端定位

由于智能手机中的信号接收器和传感器种类及性能有限,对于有室内定位高精度需求的应用场景,在原有的室内环境中,可额外增加特殊信源,该信源可以是智能手机无法接收的,再根据信源开发与之匹配的终端。目前,在允许额外设备辅助

的其他终端定位场景下,国内成熟的技术方案主要有 2 套方案:一套是基于超宽带定位技术的 UWB 系统;另一套则是基于激光雷达的即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)系统,都可以保证高精度的专业室内定位需求。

根据“2018 年室内导航定位比测”结果,允许额外设备辅助的其他终端定位场景下,国内专业技术团队采用 UWB+惯导+气压计方案,实现水平定位精度优于 0.2 m、高程定位精度优于 0.1 m (95 %置信区间)。此场景下影响定位精度的因素主要包括定位设备的选择及其硬件性能和几何布局,以及终端的软硬件设计。

3 国内室内定位发展趋势

目前国内主流的室内定位方案主要是针对不同的应用需求选用 WiFi、蓝牙、UWB、惯导、气压计和磁场中 2 种以上信源,并对不同信源提供的定位信息进行融合。与室外相比:室内信道环境和空间拓扑关系复杂,虽然室内信源种类繁多,但各种信源都有一定的局限性;不同定位信息的融合目前仍采用最简单的扩展卡尔曼滤波技术,不具备抗差能力;室内定位方案的选择多数以成本和定位精度为衡量指标,尚未构成与 GNSS 定位类似的完整的室内定位性能评估体系。

结合国际室内定位技术的发展趋势,考虑目前国内室内定位技术的成熟度,可对国内室内定位的发展趋势进行总结,主要包括以下 3 个方面:

1) 探索新的室内定位技术。由于各种成熟室内定位技术的局限性,国际上开始探索新的室内低位技术,试图寻找一种服务性能媲美 GNSS 的室内定位技术。目前,新室内定位技术的研究热点集中于视觉、光源、音频、蓝牙 5.0 和 5G 信号。除视觉定位外,其他几种都需要外置的信号源。视觉定位以相机为传感器,在场景光线和图线特征充足的条件下,定位精度可达分米级甚至厘米级。光源定位技术即光源编码定位技术,以安装在天花板上的扇格发光二极管(light emitting diode, LED)光罩为信号源,通过旋转光罩使终端接收扇格在地面的光投影来确定其位置,定位精度可达厘米级。音频定位通过测量声音从音频基站到终端的传播距离来确定终端的位置。与 WiFi、蓝牙等射频信号相比,由于声音的传播速度慢,因而对时间同步的要求低。例如,要达到分米级的定位精度,时间同步精度只需 0.1 ms。蓝牙 5.0 与蓝牙 4.0

相比,在通信速度、功耗、通信距离和容量方面均有显著提高,单一蓝牙 5.0 信标的信号覆盖范围将是蓝牙 4.0 信标的 16 倍,故蓝牙 5.0 的使用将大大降低信标布设成本。5G 作为新一代的移动蜂窝网络在设计时就考虑了室内定位的功能,5G 白皮书已明确要求室内定位精度优于 1 m; 5G 信号可能成为室内外无缝定位最可靠的信源。上述技术均处于理论研究阶段,从理论研究转换为工程应用仍需要突破许多技术壁垒。

2) 发展多源定位信息融合技术。由于各类室内定位技术的局限性,将 2 种以上具备互补特性的定位技术组合使用以获得优于单一技术的定位性能,是目前实现室内定位的主流。在选择定位技术的基础上,需设计高效的信息融合方案以提高系统的定位性能。以高精度或高可靠性的定位源为基准,采用紧耦合的方式融合其它定位源以获得位置的最优估计,是目前业界认可的信息融合方案设计基础。以此为前提,在信息融合过程中增加粗差探测和信源互检以确保整个系统的稳定性和可靠性是需要进一步探讨的技术难点。

3) 建立室内定位技术标准体系。通过目前国内外室内导航定位技术的对比,发现各技术存在多方面的差异。室内定位技术数据来源五花八门,用户提供、网络、线下搜集、信标参考等均是可能的来源,而且不同来源的数据表现形式、信息量和精度等均有所不同。目前室内定位技术缺乏统一的标准规范,即一套完整的室内空间数据采集、处理、编码、更新、集成、应用和服务标准和技术规范体系,对室内数据的采集、处理与集成过程中的元数据信息、数据模型、交换格式、数据精度等具体细

节进行统一规定,使得室内导航服务的生产、更新、维护和数据共享成为可能。

4) 建立室内定位性能评估体系。GNSS 作为一种技术成熟的室外定位技术,拥有完整的导航服务性能评估体系,该评估体系以定位精度、完好性、连续性和可用性为指标,衡量 GNSS 提供导航服务的质量。其中定位精度是最基础的导航服务性能需求。当前室内定位技术尚未达到与 GNSS 相当的成熟度,对其研究焦点还集中在提升定位精度上。但是,随着室内定位技术的不断发展,当定位精度的需求能够满足时,为提升服务质量,需额外考虑定位结果的可靠性、定位服务的连续性等其他服务性能指标。与 GNSS 相比,室内定位的实现是多种室内定位技术组合使用的结果,一套完整的室内定位方案往往包含多种异构定位源;因此对室内定位性能的评估要比对 GNSS 服务性能的评估要复杂的多。考虑到其必要性及实施难度,室内定位性能评估体系的建立可作为室内定位领域的一个新的研究方向。

4 结束语

作为 LBS 的核心技术之一,室内定位技术在即将到来的人工智能和万物互联时代有着不可或缺的作用,是目前学术界和工业界的研究热点。本文通过对国内几种主流室内定位技术的介绍,以及对不同场景下室内定位方案的分析,表明当前国内室内定位技术亟须进一步提升精度,探索新的室内定位技术、进一步发展多源定位信息融合技术以及建立室内定位性能评估体系是国内室内定位未来的发展方向。

参考文献

- [1] 黄正宇,陈益强,刘军发,等. 基于众包数据的室内定位方法和平台[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(11): 1476-1484.
- [2] SHU Yuanchao, HUANG Yinghua, ZHANG Jiaqi, et al. Gradient-based fingerprinting for indoor localization and tracking[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 63(4): 2424-2433.
- [3] 王培良,张婷,肖英杰. 改进指纹库精度下的室内定位算法研究[J]. 电子技术应用, 2018, 44(10): 97-101, 105.
- [4] 郭红成,罗海勇,尹浩,等. 基于线性插值和动态指纹补偿的分布式定位算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(12): 1795-1801.
- [5] CHEN Liang, KUUSNIEMI H, CHEN Yuwei, et al. Information filter with speed detection for indoor bluetooth positioning[C]//The Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Proceedings of 2011 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS). Tampere, Finland: IEEE, 2011:47-52.
- [6] VARSAMOUS M, ANTONAKOPOULOS T. A bluetooth smart analyzer in iBeacon networks[C]//The Institute of Electrical and Electronic Engineers(IEEE). Proceedings of 2014 IEEE Fourth International Conference on Consumer Electronics Berlin(ICCE-Berlin). Berlin, Germany: IEEE, 2014: 288-292.

- [7] 张胜军, 林若琳. 浅谈室内定位技术现状[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(7): 128-131.
- [8] 江德祥, 胡明清, 陈益强, 等. 基于核岭回归的自适应蓝牙定位方法[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(9): 3487-3489, 3492.
- [9] 郭磊, 甄杰, 杨东辉. 基站布设方案对蓝牙指纹定位精度的影响[J]. 导航定位学报, 2018, 6(2): 93-96, 110.
- [10] 邓中亮, 尹露, 唐诗浩, 等. 室内定位关键技术综述[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(3): 14-23.
- [11] 张瑞峰, 张忠娟, 吕辰刚. 基于质心-Taylor 的 UWB 室内定位算法研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2011, 23(6): 717-721.
- [12] 张宴龙. 室内定位关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [13] 李伟杰, 张霆廷, 张钦宇. 基于机器学习的超宽带 NLOS 鉴别方法[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(3): 750-754.
- [14] 陈晨, 李欣, 丁宏, 等. 减小超宽带穿墙定位中 NLOS 误差的方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(5): 451-457.
- [15] 肖竹, 谭光华, 李仁发, 等. 无线传感器网络中基于超宽带的 TOA/AOA 联合定位研究[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(3): 453-460.
- [16] 黄亚萍. 基于 TDOA 和 TOA 的无线定位技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
- [17] 杨奎河, 胡新红. 室内定位技术研究综述[J]. 信息通信, 2018(8): 106-109.
- [18] 杨宇, 陈明, 刘大庆. 基于分布式 LTE 网络的室内定位系统[J]. 电信科学, 2018, 34(6): 91-97.
- [19] 李玲霞, 郭可可, 田增山, 等. 基于相关性测序的 TD-LTE 分布式系统室内定位算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(5): 1059-1065.
- [20] 李占营. 基于伪卫星技术的室内定位系统硬件设计及实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [21] 王亚宾. 伪卫星室内独立定位演示验证系统研究和设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [22] 戴超. 室内伪卫星实时定位技术及其实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [23] 万晓光. 伪卫星组网定位技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [24] 何成龙, 蔚保国. 地基伪卫星系统多址测距误差的校正算法[J]. 中国空间科学技术, 2015, 35(5): 8-14.
- [25] 李雅宁. 室内导航伪卫星信道模型技术研究[C]//中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心. 第七届中国卫星导航学术年会论文集. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2016: 94-98.
- [26] 陈国通, 王小娜, 张晓旭, 等. 基于惯性导航的室内定位误差修正算法[J]. 河北工业科技, 2018, 35(3): 185-190.
- [27] 贾浩男, 贾瑞才, 王博远. 基于惯性传感器的行人室内定位算法研究[J]. 无线电工程, 2018, 48(8): 619-623.
- [28] 曾辉, 邓中亮, 薛宸, 等. 基于无迹卡尔曼滤波的无线定位与 IMU 组合室内定位算法[C]//中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心. 第六届中国卫星导航学术年会论文集. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2015: 48-52.
- [29] 李由. 基于 MEMS 惯性传感器、WiFi、磁场特征的移动智能终端室内行人导航算法[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
- [30] 江聪世, 刘佳兴. 一种基于智能手机的室内地磁定位系统[J]. 全球定位系统, 2018, 43(5): 9-16.
- [31] 黄鹤, 仇凯悦, 李维, 等. 基于粒子滤波联合算法的室内地磁定位精度研究[J/OL]. [2019-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20180530.1808.030.html>.
- [32] 宋宇, 喻文举, 程超. 基于 FCM 聚类及位置区切换的室内地磁定位研究[J]. 现代电子技术, 2018, 41(14): 96-100.