



室内高精度定位技术总结与展望

柳景斌¹ 赵智博¹ 胡宁松¹ 黄格格¹ 龚晓东¹ 杨盛¹

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

摘要:高精度的室内定位技术对于国民经济发展具有非常重要的意义。近年来,随着位置服务需求逐渐增加,技术不断发生迭代,室内定位向着高精度和无缝持续发展。在卫星信号无法覆盖室内的情况下,高精度室内定位技术成为研究热点,发展出多种定位源和对应的定位原理。针对高精度室内定位技术的最新发展现状,依据不同定位原理分为基于几何关系、指纹匹配、增量估计和量子导航的高精度定位方法,并对各类方法的定位原理进行了介绍,对当前技术发展进行探讨和分析,总结出高精度室内定位技术的特点,探讨出多源化、智能化、大众化的未来发展趋势。

关键词:室内定位;高精度定位;融合定位;行人导航;环境感知定位

中图分类号:P228

文献标志码:A

导航与定位是万物互联、位置服务应用的核心技术,关乎国家安全和经济建设发展。高精度的位置信息是提供高精度位置服务的基础,随着科技的进步,尤其是无线通信技术的发展,高精度导航与定位正走进人们的生活。对于室外环境,卫星定位技术的成熟应用意义非凡,通过实时差分定位技术(real-time kinematic, RTK)和精密单点定位技术(precise point positioning, PPP)等相关处理技术,结合地基增强系统等地面跟踪站提供的高精度大气^[1]、轨道改正,可以在室外开阔环境下达到亚米级甚至厘米级的定位精度。但是,卫星定位受制于信号强度的影响,极易受到遮挡和多径效应等信号干扰,在高楼耸立的城市峡谷或者外围封闭的室内环境中,卫星定位不准甚至无法定位。根据美国环境保护局的报告统计,人类有近70%~80%的时间在室内度过,进而衍生出物资寻找、智能机器人、商场导航导购、应急疏导等室内定位需求,为了解决室外导航无法覆盖的“最后一千米”问题,室内定位成为研究机构和相关企业研究的热点问题。

传统的室内定位方法主要有WiFi、蓝牙等方式,指纹识别模式的定位精度一般为2~5 m^[2]。第5代移动通信技术(5th generation, 5G)白皮书中已经明确要求室内外定位精度要优于1 m^[1-4],

随着5G通信、物联网、人工智能、云服务等技术的发展,给物流管理、轨迹追踪、个人问询、万物互联等高精度的位置服务提供了更多的可能,高精度的室内定位得到了快速的发展,因此本文集中对定位精度优于1 m的技术进行讨论和总结。目前,众多学者开展了包括WiFi往返时延(round-trip-time, RTT)、超带宽(ultra wide band, UWB)、音频、伪卫星、5G、磁场、信道状态信息(channel state information, CSI)、惯性导航、视觉里程计、量子导航等在内的多个定位技术的研究,极大地提高了室内定位的精度,解决了部分室内场景的应用需求。本文聚焦于室内高精度定位技术,首先对整体技术情况进行简介,随后基于几何关系、指纹匹配、增量估计的分类对主流室内高精度定位技术的原理、应用做基本阐述,最后对各类技术的特点进行总体分析与归纳,并对未来的发展趋势进行展望。

1 高精度室内定位技术简介

本文中的高精度室内定位技术主要讨论定位精度优于1 m的各类技术手段,对室内定位的分类,文献[5]最早提出基于定位位置类型、全局性、主动性、精度、覆盖范围的分类方法,帮助开

收稿日期:2022-03-21

项目资助:国家自然科学基金(41874031, 42111530064);国家重点研发计划(2021YFB2501102);深圳市科技计划(JCYJ20210324123611032)。

第一作者:柳景斌,教授,博士,博士生导师,主要从事室内外泛在融合定位技术与方法研究。jingbin.liu@whu.edu.cn

通讯作者:赵智博,博士生。zbzhao@whu.edu.cn

发人员更好地评估定位性能。文献[6]提出了基于位置感知技术的分类、基于信号测量技术的分类、基于传感器类型的分类这3种分类方法。文献[7]提出基于空间覆盖范围的广域室内定位和局域室内定位,广域代表是时分和码分-正交频分复用(time and code division-orthogonal frequency division multiplexing, TC-OFDM),以广域网络为基础实现室内定位,局域代表是WiFi、蓝牙等以局域网络实现局部覆盖的室内定位。本文在借鉴以上分类的基础上,根据定位原理将现有的高精度定位技术分为基于几何、指纹、增量估计的高精度室内定位3个类别。

1.1 基于几何关系的高精度室内定位

基于几何关系的高精度室内定位是基于基站和移动站的距离、角度进行定位的,根据几何关系建立观测量与待估参数间的联系,常用的观测量有RTT、到达时间(time-of-arrive, TOA)、到达时间差(time-difference-of-arrive, TDOA)、到达角(angle-of-arrive, AOA)、接收信号强度(received signal strength, RSS)等。TDOA、TOA可通过几何关系衡量,RSS观测量需要通过路径损耗模型进行转化。其中,常见的三边测量定位原理是通过TOA和RSS进行测量,如图1所示。图1中,A、B、C点分别为已知观测点,P为待观测点, R_1 、 R_2 、 R_3 分别为A、B、C这3个点至P点的信号观测量。角度测量原理是根据AOA进行测量,如图2所示。图2中,A、B点为已知观测点,P点为未知点, θ_1 、 θ_2 为AOA。下文中的每一项定位技术均围绕一种或者多种观测量进行介绍,部分几何观测量具有通用性。

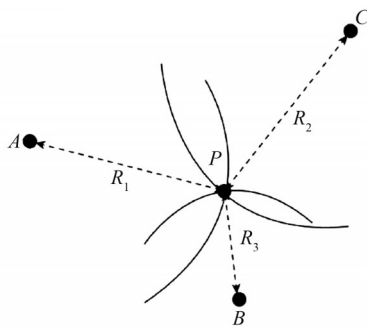


图1 三边测量定位原理
Fig.1 Principle of Three-Side Measurement and Positioning

1.1.1.1 WiFi-RTT定位

2016年12月,随着新版IEEE802.11标准的公布,飞行时间测量(flight time measure, FTM)协议提供了新的WiFi测距功能,其方法为通过用

户端与接入点(access point, AP)端往返时间差来计算二者之间的距离,测量原理如图3所示。首先,用户端发送FTM测距请求,AP端进行响应之后返回确认字符(acknowledge character, ACK)信号,之后AP端率先发起FTM测距信号,多组FTM信号往返于用户端和AP端,图3中 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别为AP端和用户端测得的时间。该测距方法可以同时用于多个发射端和应答端,且由于AP端和用户端的距离是由AP端的时间点和用户端的时间点差值相减获得的,即两倍飞行时间为 $(T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)$,因此该方法直接消去了时钟误差的影响,不需进行时钟同步。

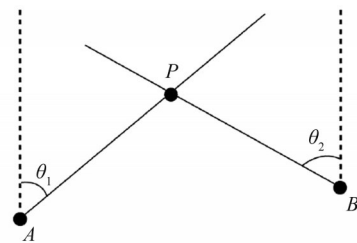


图2 角度测量定位原理
Fig.2 Principle of Angle Measurement and Positioning

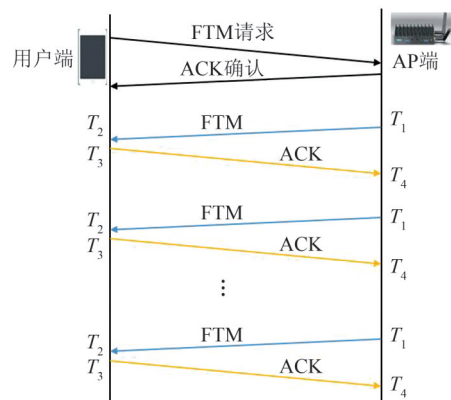


图3 WiFi-RTT的定位原理
Fig.3 Positioning Principle of WiFi-RTT

户端与接入点(access point, AP)端往返时间差来计算二者之间的距离,测量原理如图3所示。首先,用户端发送FTM测距请求,AP端进行响应之后返回确认字符(acknowledge character, ACK)信号,之后AP端率先发起FTM测距信号,多组FTM信号往返于用户端和AP端,图3中 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别为AP端和用户端测得的时间。该测距方法可以同时用于多个发射端和应答端,且由于AP端和用户端的距离是由AP端的时间点和用户端的时间点差值相减获得的,即两倍飞行时间为 $(T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)$,因此该方法直接消去了时钟误差的影响,不需进行时钟同步。

在应用研究方面,文献[8]提出了一种通过WiFi-FTM进行改进的专用短距离通信方法,以执行室外车辆间测距,并讨论了一种时间戳压缩方法,该方法丢弃了每个FTM帧的最高有效位。文献[9]提出了一种基于机器学习的测距方法,该方法通过精确测量值和室内通道模拟值的训练模型有效解决了低带宽问题,提高了测距精度。文献[10]用谷歌Pixel 3a手机和3个AP点进行定位,结果表明中误差为1 m,90%定位精度为6 m。文献[11]提出了一种基于半参数估计的智能手机WiFi-RTT定位方法,充分考虑了相关时延所造成的随机性系统误差,将系统误差作为待估参数考虑到位置估计中,对比原始最小二乘实

现静态 10%~20% 的提升,动态 40%~50% 的提升,达到静态 0.4 m、动态 0.6 m 的定位精度。

在硬件层面上,谷歌、CompuLab 等路由器已支持 WiFi-RTT 功能,为其应用推广奠定了基础,同时国内外只有少部分手机支持 WiFi-RTT 功能,因此也暂未大规模商用。

1.1.2 定位

定位是一种短距离、大带宽的无线通信技术,美国联邦通信委员会规定相对带宽超过中心频率 20%,或者绝对带宽大于等于 500 MHz 的无线信号,均称为信号。UWB 信号是由一系列的极短脉冲组成,单个脉冲长度一般只有几纳秒、甚至不到 1 ns,每一个脉冲拥有极大的频谱带宽,这使 UWB 信号有极高的时间分辨率,传输速度理想的情况下可以达到厘米级的测距精度,此外还具备穿透力强、抗多径、传输速率快等优点。常见的 UWB 定位系统是基于 TOA、TDOA 或双向飞行时间测距 (two-way time of flight, TW-TOF) 原理来进行位置估计。

在应用方面,Ubisense 公司提出了基于 TDOA 和 AOA 的 UWB 室内定位系统,定位精度可达 15 cm,测距范围达到 50 m^[12]。DecaWave 公司推出可供研发人员进行二次开发的低功耗 UWB 芯片,定位精度可达 30 cm。国内工业界开展了 UWB 定位技术的研发,如杭州新华三公司和成都的恒高科技公司均研制了高精度的 UWB 定位系统。文献[13]实现了一个基于 TDOA 和双向测距的超宽带协同定位系统,充分利用了到基站的距离差分观测值和到其他标签的距离观测值,显著提高了定位精度。文献[14]利用 UWB 系统中的距离估计和惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 提供的航向信息实现了对标签和基站同步的位置估计,精度分别达到 0.77 m 和 0.5 m。UWB 定位的主要难点在于非视距的影响,在室内环境多变情况下,视距 (line of sight, LOS) 观测值和非视距 (non line of sight, NLOS) 观测值差异较大,需要用合适的分类方法进行非视距识别,并加以修正。文献[15]用深度学习的方法对 LOS 和 NLOS 环境进行分类,采用卷积神经网络和长短期记忆网络的方式,获得了较高的分类水准。

1.1.3 音频定位

音频定位系统通过测量声音从音频基站到收音设备的传播距离实现定位。由于声音的传播速度仅为 340.29 m/s,因此音频定位系统对时

间同步的要求并不高,达到 0.1 ms 的同步精度即可实现 3.4 cm 的测距精度,同时音频元器件成本较低,易于进行铺设。按照音频类型来分,音频定位信号包括单频信号、正交码调制信号和线性调频 (Chirp) 信号,其中单频信号多在可听声范围内,抗干扰能力差,目前占据主流的是 Chirp 信号,该信号更适合用于移动目标的定位。按照量测类型来分,分为基于 TOA、TDOA、多普勒效应的音频定位方法。

由于受多路径和非视距的影响,在基于 Chirp 信号的音频定位中,检测出扬声器节点发出的音频到信号接收机的最短路径是高精度定位的关键。检测最短路径的方法主要有两种:(1)基于时频分析的方法,它是根据信号频率随时间线性变化的特点完成的;(2)基于互相关函数的方法,该函数可以准确计算扬声器节点信号和接收机信号的匹配程度,常采用最大峰值来搜寻最短路径。

在应用研究方面,最早文献[16]开发出了采用双向测距机制的 BeepBeep 系统,利用 2~6 kHz 的 Chirp 信号实现了静态 0.04 m 的测距精度,但无法支持大容量用户,且设备间测距需异步进行,降低了定位的效率。文献[17]采用类似于 Beep 系统的定位系统,利用 18~22 kHz 的 Chirp 信号,实现了 0.3 m 的动态定位精度。文献[18]采用了 3~8 kHz 的 Chirp 信号,在 30 m 的测距范围内达成了优于 0.3 m 的测距精度,相比于传统的匹配滤波方法有较大提升。文献[19]搭建了以扬声器为节点的时分复用 (time division multiple access, TDMA) + 频分复用 (frequency division multiple access, FDMA) 的音频定位系统,提出了基于 TDMA 的组合加权定位算法,运用自适应卡尔曼滤波器和可靠性判断处理音频到达时间 (audio arrival time, AAT) 估计异常,使动态实时定位精度提高 90%。

1.1.4 伪卫星定位

伪卫星定位技术是通过可以发射类似全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) 信号的地面伪卫星进行测距定位,它采用的信号和机制与 GNSS 不同,避免了对 GNSS 卫星造成干扰。伪卫星定位技术中,一类是服务于 GNSS 定位,改善卫星的几何分布结构;另一类可直接用于独立定位,用户端接收类 GNSS 信号并测算出精确坐标。室内定位就是采用第二种方式。伪卫星定位面临的关键问题除了与室外

GNSS类似的时钟同步、多径效应外,还有其固定的星座结构给定位带来的弊端。

相关研究方面,伪卫星定位的研究几乎是伴随着卫星导航系统进行的。最早是由美国搭建的伪卫星——Yuma卫星导航测试场验证全球定位系统(global positioning system, GPS)的性能^[20]。目前,最成熟的室内伪卫星系统是Locata公司的方案,利用时间锁技术实现紧密的时间同步,在处理相位时可以忽略时钟的差异,非差情况下定位的水平误差小于6 cm,高度方向的精度约为15 cm^[21]。文献[22]对数据进行仿真,利用最小二乘模糊度降相关平差法(least square ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA)和扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)验证了模糊度固定后可以实现较高的精度。文献[23]建立了一个新的基于伪卫星的室内定位系统。伪卫星时钟可以彼此同步,并且信号可以由标准接收器处理。仿真结果表明,该方法可以提供静态和动态情况下的高精度水平定位。文献[24]使用改进的粒子群算法来提高模糊度函数法的搜索效率,以实现单个历元的高精度定位,并且精度可以达到厘米级。文献[25]实现了一种不需要在已知点初始化的伪卫星定位,兼顾了LAMBDA方法使用的精度需求,实现了伪卫星模糊度的快速固定,在动态和静态测试中分别达到厘米和毫米级的定位精度。

1.1.5 5G定位

5G是最新一代的蜂窝移动通信技术,具有高速率、低延迟、大容量、高带宽和大规模天线等特点,这些特点可应用于室内定位,高频信道稀疏可以有效抗多径,低时延也有助于测距的精准性,大规模天线可以提供更高空间分辨率的波束,测角精度随着天线数量的增加而增加。目前TOA和AOA定位是5G基站定位研究的主要方向。

相关研究方面,文献[26]提出了基于分布式压缩感知的5G毫米波TOA估计算法,通过加权求和的方式将子载波重构信号恢复为全局信道,有效降低了高斯噪声所带来的影响,且在求解时延前根据空间广义期望最大化原则进行错误元素的剔除,得到精确的主要径时延。文献[27]对毫米波多径信道在上行和下行方式的定位和定向限制进行了分析,对不同系统参数的边界独立性进行了详细的论证。时间同步仍然是5G TOA定位的难点,现行的5G网络的同步误差为50 ns

左右,对测距的影响高达15 m,这是未来需要解决的问题。

在AOA定位方面,文献[28]采用旋转不变算法估计信号参数,使用斜投影技术来对AOA进行估计。文献[29]从理论上推导了毫米波系统在多径信道下进行位置估计的克拉美罗下界,一定条件下的仿真结果展示了毫米级定位精度。在时间同步精度不高以及接收端钟晶振稳定性相对较低的现状下,AOA的定位方式是更合理的。

1.2 基于指纹匹配的高精度室内定位

基于指纹匹配的高精度定位的基本原则是计算测量数据和数据库中参考指纹的差异从而得到最近的匹配结果,定位过程分为离线采集、学习、定位3个阶段,其定位原理如图4所示。其中,AP₁、AP₂、AP₃为信号接入点,RSS₁、RSS₂、RSS₃为接收信号强度,MAC₁、MAC₂为AP₁、AP₂的媒体存取控制(media access control, MAC)位址,RSS_{n1}、RSS_{n2}分别为第n个格网内AP₁、AP₂的信号强度。离线采集阶段将重要的区分性特征从原始信号中提取出来,学习阶段对特征进行处理形成数据库,或是形成相应的有规律的数学模型,定位阶段结合实时采集的新特征和前期学习得到的数据库、数据模型获得实时位置。指纹特征来源于多种传感器,包括磁场特征、蜂窝信号特征、WiFi信号特征、视觉图像特征、雷达点云特征等,本文对基于磁场特征和CSI信道状态信息特征的指纹定位方法进行相关介绍。

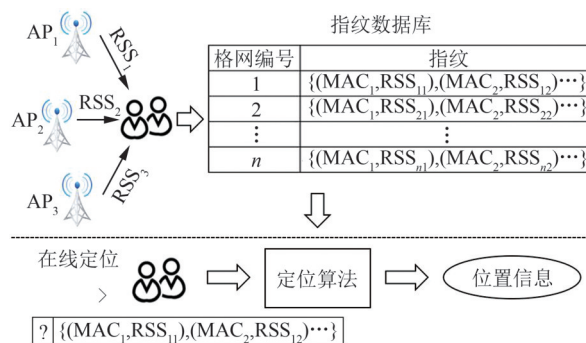


图4 指纹定位原理

Fig. 4 Fingerprint Location Principle

1.2.1 磁场定位

磁场定位技术是指利用行进中的载体实时采集地磁场的特征信息,之后将存储的地磁基准图和采集的地磁数据进行对比,根据准则获得最佳匹配的结果,实现载体的自主定位。室内建筑物对磁场的影响使得磁场产生扭曲,从而具有特

定的纹路,与 RSS 特征相反,建筑物的特征使得磁场特征变得更加唯一,因此测量的特征数据不受时间和障碍物遮挡的影响。磁场定位分为基于有源磁场(外部发射源)和基于无源磁场两种定位方式,有源磁场一般需要部署大量的线圈和设备,一般情况下主要使用无源磁场,即基于地球磁场和环境内磁场畸变产生的磁场进行定位。

在相关研究方面,最早利用地磁场进行定位是用于机器人的自定位,文献[30]利用室内结构对地磁信息的扰动特征对机器人进行自定位,完成了走廊中初步位置的确定。文献[31]进一步发现,钢筋混凝土的建筑框架对室内环境的磁场造成了系统层面上的扰动,使得每个室内场景中的地磁场分布都有着其独特的模式,基于地磁特征的指纹定位技术可达到 90% 以上的定位准确度。然而地磁信号在不同位置的强度可能非常相似,且不同时间段存在差异,因此基于单一点位的磁场强度匹配会有大量误匹配,后来研究人员发现室内相同轨迹的地磁序列在不同时段具有相似性,基于地磁序列的匹配可降低误匹配率。文献[32]以地磁强度模值为特征,将动态时间规整算法(dynamic time warping, DTW)用于地磁定位,实时匹配定位达到 1 m 的定位精度。文献[33]以三轴地磁为特征,用时域卷积网络(temporal convolutional network, TCN)提取地磁序列特征,当网格长度为 10.2 m 时,匹配精度优于 0.7 m。

1.2.2 基于 CSI 的定位

传统的 RSS 信号强度是信道多径传播的叠加效果,而 CSI 表达的是信道状态信息,可以刻画信号的多径传播,相较于 RSS, CSI 具有更丰富的信号特征,一是从时域上的时延和频域上的衰减可以粗略区分传播路径,二是可以获得各个子载波的幅度特性,增加了更多的指纹特征^[34]。CSI 自 2011 年被提出之后^[35]便被广泛研究和应用。

相关研究主要集中于 WiFi 和长期演进技术(long term evolution, LTE)等宽带通信系统。对 WiFi 而言,文献[36]首次将 CSI 数据用于指纹匹配,实现了室内定位系统,文献[37]基于反馈决策树分析子载波幅度值并建立随机森林,在 4 个 WiFi AP 点的 LOS 和 NLOS 环境中分别实现了优于 0.2 m 和优于 0.4 m 的定位精度。在 LTE CSI 方面,目前还没有消费级的产品,智能手机仅能通过应用程序编程接口(application programming interface, API)获得周边基站的接收信号强

度指示(received signal strength indication, RSSI)、参考信号接收功率(reference signal receiving power, RSRP)、参考信号接收质量(reference signal receiving quality, RSRQ), CSI 信息需要专业的通用软件无线电外设(universal software radio peripheral, USRP)设备,文献[38]将 CSI 信道频率响应的峰度、平整度等谱的形状作为描述特征,有效提升了运算效率,在 4 个描述子的前提下取得 2.11 m 的平均定位误差。随着后续物理层信号特征面向手机等终端设备的逐步放开,基于 CSI 的定位会有更大的应用前景。

1.3 基于增量估计的高精度室内定位

基于增量估计的高精度定位是指通过积分、匹配等方式测量前后历元间的位置、姿态变化来获取当前位置的定位手段,属于相对定位,常见的具体定位技术包括惯性导航、视觉里程计导航、激光雷达里程计导航等。

1.3.1 惯性导航

惯性导航系统(inertial navigation system, INS)通过 IMU 获得运载体的惯性信息和旋转信息,结合 INS 初始导航状态(位置、姿态和速度)进行积分,获得当前时刻运载体的物理信息来完成定位导航。根据传感器的平台安装位置又可分为两种惯性导航系统:平台式惯性导航系统(gimbaled inertial navigation system, GINS)和载体上的捷联惯导系统(strap-down inertial navigation system, SINS)。INS 是基于航位推算方法实现的^[39],因此随着时间会产生累积误差,其定位精度取决于传感器质量和传感器安放位置。相关研究表明,绑在脚上的惯性导航可采用零速校正限制漂移实现定位误差小于行走距离的 1%^[40-41],对室内场景来说,基于智能手机的行人航迹推算(pedestrian dead reckoning, PDR)是近些年来的研究热点。

在应用研究方面,文献[42]提出了一种扩展卡尔曼滤波方法对二维的机械编排与零速进行更新,其结果精度达到了 1.6 m。文献[43]提出了一种用户行为感知的 PDR 方法,通过对自然走路下的不同步态进行识别,获取行人的连续多个行为,将这些行为跟可能发生的行为进行匹配,进而提高 PDR 的精度。文献[44]提出了一种改进型惯性定位算法,基于动态阈值判断和方向数据的梯度化处理在矩形、1 形、U 形等 3 种典型室内路径下定位精度均优于 1 m。

1.3.2 视觉里程计

视觉里程计(visual odometry, VO)是视觉同时定位与制图(simultaneous location and mapping, SLAM)的前端,目标是建立观测数据的匹配关系^[45],于2004年被大众所熟知,其作用与轮式里程计相似,通过增量形式估计移动机器人的运动参数,不同之处是轮式里程计通过记录车轮转动的圈数获得行驶里程,而VO通过相机拍摄图像进行,不易受不良地形条件的影响。对图像间的特征匹配选择同名点,根据该点在前后帧中的坐标变化估计相机的位姿变化,串联成运动轨迹^[46]。当相机为单目时,根据两组二维点来估计相机的运动,常采用对极几何来定位,定位原理如图5所示。位姿估计阶段分为直接法和特征点法,直接法利用全部图像信息,对相邻图像同名点,基于灰度不变假设最小化相邻帧的灰度误差来估计位姿;间接法是提取每一帧图像的特征点,之后利用描述子或者光流^[47]进行匹配,建立不同图像的位置关联进而估计位姿。

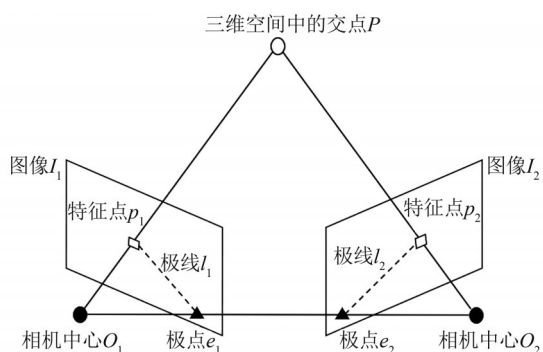


图5 对极几何定位原理

Fig.5 Principle of Polar Geometric Positioning

在相关研究方面,文献[48]提出了一种改进的尺度不变特征转换(scale invariant feature transform, SIFT)模式来提取图像特征点,根据特征点尺度旋转不变特性,精确匹配图像中的投影点。文献[49]提出了密集跟踪和实时映射(dense tracking and mapping in real-time, DTAM),使用直接法得到实时的稠密地图,相机的位姿根据匹配的整个图像得到,是第一次使用直接法进行SLAM定位的系统。文献[50]提出了直接大规模单目即时定位和地图构建算法,该算法能够得到高精度的位姿,同时还可以将三维环境地图重构为关键帧的姿态图和半稠密的深度地图。文献[51]通过卷积神经网络提取特征建立图像数据库索引,随后用快速导向和简单旋转(oriented fast and rotated brief, ORB)检测算法提取相同特

征点,建立对应关系,计算姿态变化矩阵,针对伦敦帝国理工学院和爱尔兰国立大学梅努斯分校数据集实现了优于0.1 m的平均定位精度和优于0.2°的姿态精度。

1.4 量子导航

量子定位系统最早是由文献[52]提出的,它是基于量子纠缠产生的。粒子在由两个或者两个以上的粒子组成的系统中相互影响,改变其中任意一个粒子,会对其他粒子产生影响,进而改变其粒子性质,这种粒子之间相互影响的现象称为量子纠缠。量子理论可以应用于星基量子导航系统和惯性导航。星基量子导航系统类似于传统的GNSS卫星的定位原理,与GNSS发射的电磁波信号不同,其测距信号是具有量子特征的脉冲信号,由没有电荷和质量的光子组成。在应用研究方面,文献[53]建立了从低轨卫星到接收机间的量子通信通道,在实验的基础上证明了量子通信的可能性。文献[54]详细分析了干涉星的星基定位系统,通过位置精度因子得到了定位误差和星座分布的关系。文献[55]提出了一种基于不动点迭代原理的近地空间量子定位算法,并对其进行了仿真,结果显示当测量误差为1 μm时,定位精度达到了1 cm。2016年8月,中国发射世界首颗量子科学实验卫星“墨子号”,使得中国在地上首次实现了卫星和地面间的量子通信,构建了天地一体化的量子保密通信的实验体系。

另外,基于量子纠缠和压缩特性原理而建立的新一代惯性导航系统——量子惯性导航定位系统,其结构中使用的量子陀螺仪、量子加速度计、原子时钟具有高灵敏度和极低零偏漂移的优点,相对传统的惯导系统而言,其精度更高,误差更小,姿态检测的灵敏度也更高,同时由于量子的不可克隆和测不准原理使得量子导航具备高保密特性,这对于惯导的发展提供了新的契机。美国Northrop Grumman公司研发出世界上第一台核磁共振的陀螺仪样机,经过校准之后,其陀螺零偏漂移优于0.05°/h^[56]。文献[57]研制出了中国第一台核磁共振陀螺样机,其陀螺零偏漂移优于2°/h。文献[58]利用量子的转移特性,提出了一种基于杂化纠缠量子信号的测角方法,该方法在精度上优于经典方案,且具有强干扰能力。总之,量子导航作为一种新兴的导航技术,具有优于传统定位技术的特点。

2 高精度室内定位技术的特点

基于几何关系、指纹匹配和增量估计的高精度室内定位技术具有观测值精度高、空间依赖性

强,但是环境适应性差等特点,需要采取多传感器融合的思路进一步提高室内定位的精确性和可靠性。表 1 列出了目前高精度定位技术的优点和缺点。

表 1 高精度定位技术对比

Tab.1 Comparison of High-Precision Positioning Technologies

定位原理	定位技术	优点	缺点
几何关系	WiFi-RTT	消除了时钟同步问题,不需时间同步	易受多路径和NLOS影响,成本较高
	UWB	高通信速率、低功耗、多径分辨能力强	易受电磁干扰和NLOS影响
	音频	时间同步要求低,成本低,易于铺设	易受多路径和NLOS影响
	伪卫星	精度非常高,可达到厘米级甚至毫米级	需考虑时钟同步、多径效应、固定的星座结构问题
	5G	高速率、低延迟、大容量、高带宽	布设成本较高
指纹匹配	磁场	不受时间和障碍物遮挡的影响	建立指纹库耗时耗力
	CSI	灵敏度、稳定性高	建立指纹库耗时耗力
增量估计	惯性导航	质量高的器件的精度高,健壮性好	误差累积明显
	视觉里程计	精度高,可扩展性好	复杂度较高,易受环境光线影响

1)观测值精度高。基于几何关系的高精度室内定位技术主要依赖于时间同步的精确性和距离、角度估计的准确性。TDOA定位方法只要求基站间进行时间同步,如在音频定位中由于声波的速度较低,很容易达到时间同步,此时主要关注第一径的探测,避免多径传播造成时间上的较大误差,即可得到较高的定位精度。对于基于TOA原理的定位方法,需要发送端和接收端进行高精度的时间同步,保证距离的测量精度,如信号,其高带宽的特点造就了极高的时间分辨率,使得其估计精度较高,在定位中主要考虑硬件的时延带来的影响。对于基于AOA方法的室内定位,多天线的5G信号提供了高精度的角度,从而得到高精度的定位结果。

2)空间依赖性强。基于指纹匹配的高精度定位技术主要依赖于空间特征和地理位置间的联系,有较强的空间依赖性。指纹的建立和目标的定位阶段往往是异步的,基于CSI的WiFi和LTE的定位是基于较为稳定的特征指纹,在定位阶段中信号的遮挡对于定位结果的影响较大,对空间较为敏感。基于地磁信号的定位是基于之前采集的地磁基准图和当前的地磁信息进行对比得到定位结果,空间变化越明显,地磁信息越显著,空间中物理信息的变化将会直接影响到地磁基准图的准确性。

3)环境适应性差。基于增量估计的定位方法的误差随时间累积,定位精度较低。惯性传感

器可以根据测得的三轴加速度和自身角速度获得绝对信息,同时其采样率较高,但是长时间的速度积分和位移积分会使得误差变大。视觉里程计的相机在场景纹理较弱或者运动速度过快时,容易丢失关键特征点信息,且无法获得绝对信息。特别地,当场景中出现动态目标时,视觉和激光里程计将受到干扰,导致精度和可靠性降低。

3 高精度室内定位技术的发展趋势

随着知名企业和科研所在高精度室内定位领域的研究,消费级的市场正在不断涌现出新的产品,高精度室内定位的机器人目前已经部署在部分大型商场,已经能够提供服务,而更多的应用场景也亟待开发与应用,高精度室内定位技术正向着多源化、智能化、大众化发展,主要表现为环境感知增强的多源融合、与深度学习的学科交叉和研究低成本、开放性、普适性的技术方案。

3.1 多源化:环境感知增强的多源融合

环境感知可分为场景类型的感知、运动目标的感知等。场景类型的感知是部分定位源对周围环境中障碍物的遮挡敏感,需要对含障碍物的环境进行感知,如音频信号、WiFi-RTT、等测距信号,在NLOS环境下测距精度会降低,可以结合惯性导航系统在一段时间内进行融合定位,提

高定位精度和可靠性。移动目标感知是定位源对移动目标敏感,需要检测出移动目标从而避免干扰,如视觉里程计技术,在前端进行特征点匹配时,如果图像中有运动目标,会对特征匹配造成干扰。采用环境感知方法分割剔除动态目标(如深度学习),从而提高视觉里程计的定位精度和可靠性。由此可见,由于各种导航定位技术都有各自的优缺点以及合适的使用场景,而室内环境相对来说比较复杂,采用单一的定位技术在定位精度和可靠性等方面有一定局限,需要组合多种定位源并实时感知环境知识实现高精度定位。

在进行多源融合的过程中,不仅需要选取具有互补特征的定位技术,同时也需要设计出高效融合的实验方案。在实验方案的设计中需要考虑融合方式和融合算法,融合方式主要包括松耦合和紧耦合,松耦合是各个定位源独立工作,通过滤波算法得到最终的结果,而紧耦合是将各个定位源的原始观测值作为量测输入,通过滤波算法估计出组合结果。较常用的融合算法有卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)、EKF和无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filter, UKF)和粒子滤波^[59-61]等算法。

3.2 智能化:与深度学习的学科交叉

未来室内高精度定位技术将更进一步与深度学习相结合,主要体现在以下3个方面。

1)运动场景及行为识别。当前各种室内定位解决方案依然存在诸多问题,包括设备数据质量不高、定位源信号不稳定等,导致系统稳定性得不到保障。正确感知用户所在场景及行为语义,可使得室内定位应用更加普适与稳健,也是未来智能位置服务的关键。相比传统方法中人工定义的低层级特征进行场景分类及运动行为识别,深度神经网络可自动提取各定位源数据的高层级特征,实现更高的识别准确率。

2)数据增强。数据增强是一种利用算法让有限的数据库产生更多的数据,扩展样本数量及多样性,可通过数据增加约束来提供先验知识,以减少无用信息特征的负面影响对深度学习网络模型性能的影响。在视觉定位中,传统的二维图像数据增强方法包括几何变换、色彩变换及像素变换。而对于WiFi、蓝牙等指纹定位方法,传统的一维传感器数据一般通过增加随机噪声进行指纹库数据增强。目前,自动数据增强、基于生成对抗网络及基于自动编码器和生成对抗网络组合的数据增强方法已成为现阶段较为常用的

手段,以期产生更好的样本数据。

3)误差估计建模。基于KF的数据融合在室内高精度定位中具有十分重要的地位。基于数据驱动深度学习模型不依赖于系统的物理描述而是统计特征,可从输入及输出数据学习与估计定位系统。因此,将深度学习算法与卡尔曼滤波器相结合,实现对误差的建模及预测。例如,GNSS/INS系统由于其倾向于非线性系统,在考虑随机误差时不遵循任何简单的运动模型,从而导致微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)传感器的误差建模困难。在典型应用中,一般是将惯导系统的位置误差与基于神经网络的误差预测算法相结合,实现卡尔曼滤波的外部优化。除此之外,还可利用深度学习算法建立多源融合系统内部的卡尔曼滤波增益及观测值之间的关系,学习滤波内部信号的传递规则,在观测数据较少或缺失的卡尔曼滤波器中,整个系统能够快速响应以满足实时定位需求,从而进一步提高定位精度。

3.3 大众化:研究低成本、开放性及普适性的技术方案

未来的高精度室内定位技术具有低成本和开放性的特性。一方面是传感器的低成本化,主要是摄像头、激光雷达、MEMS惯性传感器等器件的低成本化,传感器的低成本为高精度室内定位技术的发展奠定了基础;另一方面是更加开放的数据接口,单一的定位源在定位过程中具有局限性,如手机端开放更多的物理层信息,可以通过API端获取LTE信息、5G信息子载波的幅值等特征值,从而提供了更多源的数据进而服务于多源融合定位。

高精度室内定位的各种定位源异构,因此建立了适用不同需求的定位系统,但是从高精度室内定位的角度而言,需要有无缝接入场景的能力及新技术更新的能力。因此需要建立一个具有普适性的高精度室内定位系统框架,该框架应具备以下几个特征:具有与技术无关的拓展性,方便新技术的接入;提供统一的服务接口,方便进行位置服务;具有较强的迁移功能与无缝接入能力。通过普适性框架的构建,为高精度室内定位的大众化应用奠定基础。

4 结 语

随着室内定位导航的日趋成熟和人们对高精度室内位置服务需求的不断增加,高精度、低

成本、高可用性的室内定位技术得到进一步的发展,目前高精度的室内定位主要分为基于几何关系、基于指纹匹配、基于增量估计的高精度定位,同时量子导航也将发挥其特定的价值。现有的各类定位技术具有观测值精度高、空间依赖性强等特点,同时这些室内定位技术易受环境影响,环境适应性较差。因此,未来室内高精度定位将向环境感知增强的多源融合,与深度学习的学科交叉,研究低成本、开放性、普适性的方向蓬勃发展。伴随着新一代通信技术的应用以及相关硬件性能的提升,室内高精度定位技术将走进千家万户,极大地便利人们的生活。

参 考 文 献

- [1] Weiser M. The Computer for the 21st Century[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 1999, 3(3): 3-11
- [2] Chen Ruizhi, Chen Liang. Indoor Positioning with Smartphones: The State-of-the-Art and the Challenges[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10):1316-1326(陈锐志,陈亮. 基于智能手机的室内定位技术的发展现状和挑战[J]. 测绘学报,2017,46(10):1316-1326)
- [3] NGMN Alliance. 5G White Paper[R]. Frankfurt, Germany: NGMN Board, 2015
- [4] 3GPP TR 38.913. Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies [R]. Seoul, Korea: Technical Specification Group Radio Access Network, 2018
- [5] Hightower J, Borriello G. Location Systems for Ubiquitous Computing[J]. *Computer*, 2001, 34(8): 57-66
- [6] Liang Yuancheng. Research and Implementation of Indoor Location Technology Based on Wireless LAN [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009(梁元诚. 基于无线局域网的室内定位技术研究及实现[D]. 成都:电子科技大学, 2009)
- [7] Deng Z, Yu Y, Yuan X, et al. Situation and Development Tendency of Indoor Positioning [J]. *China Communications*, 2013, 10(3): 42-55
- [8] Niesen U, Ekambaram V N, Jose J, et al. Inter-vehicle Range Estimation from Periodic Broadcasts [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(12): 10637-10646
- [9] Dvorecki N, Bar-Shalom O, Banin L, et al. A Machine Learning Approach for WiFi RTT Ranging [C]//International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Reston, USA, 2019
- [10] Gjøvåg C W. WiFi RTT for Indoor Localization Using Google WiFi and Google Pixel 3a[D]. Ingeniørvitenskap, Norwegian University of Science and Technology, 2020
- [11] Guo Xiaochen, Li Zishen, Wang Liang, et al. WiFi-RTT Positioning Method Based on Semi-parameter Estimation for Smartphone [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, DOI: 10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.06.0080(郭笑尘,李子申,汪亮,等. 基于半参数估计的智能手机 WiFi-RTT 定位方法[J]. 导航定位与授时, 2020, DOI: 10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.06.0080)
- [12] Jiménez A R, Seco F. Comparing Decawave and Bespoon Location Systems: Indoor/Outdoor Performance Analysis [C]// International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Alcalá de Henares, Spain, 2016
- [13] Djaja-Josko V, Kolakowski J. A New Method for Wireless Synchronization and TDOA Error Reduction in Positioning System [C]//The 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications, Krakow, Poland, 2016
- [14] Gentner C, Ulmschneider M. Simultaneous Localization and Mapping for Pedestrians Using Low-Cost Ultra-Wideband System and Gyroscope [C]//International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sapporo, Japan, 2017
- [15] Jiang C, Shen J, Chen S, et al. NLOS/LOS Classification Using Deep Learning Method [J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(10): 2226-2230
- [16] Peng C, Shen G, Zhang Y, et al. BeepBeep: A High Accuracy Acoustic Ranging System Using Cots Mobile Devices [C]//The 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Sydney, Australia, 2007
- [17] Höflinger F, Zhang R, Hoppe J, et al. Acoustic Self-calibrating System for Indoor Smartphone Tracking (Assist) [C]//International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sydney, Australia, 2012
- [18] Zhang L, Chen M, Wang X, et al. TOA Estimation of Chirp Signal in Dense Multipath Environment for Low-Cost Acoustic Ranging [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 68(2): 355-367
- [19] Cao Shuai, Research on Key Technologies of Acoustic Indoor Positioning for Smart Mobile Devices [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020(曹帅. 面向智能移动终端的音频室内定位关键技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大

- 学, 2020)
- [20] Parkinson B W, Enge P, Axelrad P, et al. Global Positioning System: Theory and Applications Volume I [M]. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996
- [21] Rizos C, Roberts G, Barnes J, et al. Experimental Results of Locata: A High Accuracy Indoor Positioning System[C]//International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Zurich, Switzerland, 2010
- [22] Wan Xiaoguang. Research on Pseudolite Positioning Technique [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011 (万晓光. 伪卫星组网定位技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011)
- [23] Xu R, Chen W, Xu Y, Ji S, et al. A New Indoor Positioning System Architecture Using GPS Signals [J]. *Sensors*, 2015, 15: 10074 - 10087
- [24] Li X, Zhang P, Guo J, et al. A New Method for Single-Epoch Ambiguity Resolution with Indoor Pseudolite Positioning [J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 921
- [25] Zhao Yinzhi, Guo Jiming, Zhang Peng, et al. Application and Accuracy Analysis of RTK Technology in Indoor Pseudo-Satellite System [C]//China Satellite Navigation Conference, Harbin, China, 2018
- [26] Shahmansoori A, Garcia G E, Destino G, et al. 5G Position and Orientation Estimation Through Millimeter Wave MIMO [C]//IEEE Globecom Workshops, San Diego, USA, 2015
- [27] Abu-Shaban Z, Zhou X, Abhayapala T, et al. Error Bounds for Uplink and Downlink 3D Localization in 5G Millimeter Wave Systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17 (8) : 4939-4954
- [28] Wan L, Han G, Shu L, et al. The Critical Patients Localization Algorithm Using Sparse Representation for Mixed Signals in Emergency Healthcare System [J]. *IEEE Systems Journal*, 2015, 12(1): 52-63
- [29] Wang P, Pajovic M, Orlik P V, et al. Sparse Channel Estimation in Millimeter Wave Communications: Exploiting Joint AoD-AoA Angular Spread [C]//IEEE International Conference on Communications, Paris, France, 2017
- [30] Suksakulchai S, Thongchai S, Wilkes D M, et al. Mobile Robot Localization Using an Electronic Compass for Corridor Environment [C]//International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Tennessee, USA, 2000
- [31] Haverinen J, Kempainen A. Global Indoor Self-Localization Based on the Ambient Magnetic Field [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2009, 57(10): 1028-1035
- [32] Zhou Jiapeng, Wang Yunjia, Li Xin, et al. Research on Geomagnetic Indoor Positioning Technology [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(1): 18-22 (周家鹏, 汪云甲, 李昕, 等. 地磁室内定位技术研究 [J]. 测绘通报, 2019(1): 18-22)
- [33] Sun Yaoqi, Gong Pengbo, Xu Zhefeng, et al. A Novel Indoor Positioning Based on Geomagnetic Trajectory Signal [J]. *Journal of Signal Processing*, 2021, 37(6): 952-957 (孙垚棋, 巩鹏博, 徐浙峰, 等. 基于地磁轨迹信号的新型室内定位 [J]. 信号处理, 2021, 37(6): 952-957)
- [34] Huang B, Liu J, Sun W, et al. A Robust Indoor Positioning Method Based on Bluetooth Low Energy with Separate Channel Information [J]. *Sensors*, 2019, 19(16): 3487
- [35] Halperin D, Hu W, Sheth A, et al. Tool Release: Gathering 802.11 n Traces with Channel State Information [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2011, 41(1): 53-53
- [36] Wu K, Xiao J, Yi Y, et al. CSI-Based Indoor Localization [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2012, 24(7): 1300-1309
- [37] Wang Y, Xiu C, Zhang X, et al. WiFi Indoor Localization with CSI Fingerprinting-Based Random Forest [J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 2869
- [38] Pecoraro G, Di Domenico S, Cianca E, et al. CSI-Based Fingerprinting for Indoor Localization Using LTE Signals [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2018, 2018(1): 1-18
- [39] Yang Sheng, Li Leilei, Liu Jingbin, et al. Effective Cycle Slip Detection and Repair for PPP/INS Integrated Systems [J]. *Sensors*, 2019(3): 502
- [40] Foxlin E. Pedestrian Tracking with Shoe-Mounted Inertial Sensors [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2005, 25(6): 38-46
- [41] Soehren W, Hawkinson W. Prototype Personal Navigation System [J]. *Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2008, 23(4): 10-18
- [42] Frank K, Krach B, Catterall N, et al. Development and Evaluation of a Combined WLAN and Inertial Indoor Pedestrian Positioning System [C]//The 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Savannah, USA, 2009
- [43] Zhou Baoding, Li Qingquan, Mao Qingzhou, et al. User Activity Awareness Assisted Indoor Pedestrian Localization [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(6): 719-723 (周宝定, 李清泉, 毛庆洲, 等. 用户行为感知辅助的室内

- 行人定位[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(6):719-723)
- [44] Chang Hui. Research on Indoor Positioning Based on Inertial Navigation [D]. Beijing: North China University of Technology, 2020(常慧. 基于惯性导航的室内定位研究[D]. 北京:北方工业大学, 2020)
- [45] Liu Yi. Real-Time High Precision Localization Method Research with Monocular Vision [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018(刘毅. 基于单目视觉的实时高精度定位方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2018)
- [46] Wang Z, Zhang Q, Li J, et al. A Computationally Efficient Semantic SLAM Solution for Dynamic Scenes[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1363
- [47] Baker S, Matthews I. Lucas-Kanade 20 Years on: A Unifying Framework [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 56(3): 221-255
- [48] Lü Qiang. Research on Monocular Vision Odometer Based on Feature Point Extraction [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007(吕强. 基于特征点提取的单目视觉里程计的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007)
- [49] Newcombe R A, Lovegrove S J, Davison A J. DTAM: Dense Tracking and Mapping in Real-Time [C]//International Conference on Computer Vision, Barcelona, Spain, 2011
- [50] Engel J, Schöps T, Cremers D. LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM [C]//European Conference on Computer Vision, Zurich, Switzerland, 2014
- [51] Chen Y, Chen R, Liu M, et al. Indoor Visual Positioning Aided by CNN-Based Image Retrieval: Training-Free, 3D Modeling-Free [J]. *Sensors*, 2018, 18(8): 2692
- [52] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Quantum-Enhanced Positioning and Clock Synchronization [J]. *Nature*, 2001, 412(6845): 417-419
- [53] Villoresi P, Jennewein T, Tamburini F, et al. Experimental Verification of the Feasibility of a Quantum Channel Between Space and Earth [J]. *New Journal of Physics*, 2008, 10(3): 033038
- [54] Yang Chunyan, Wu Dewei, Yu Yonglin, et al. Research on Optimal Constellation Distribution of Interferometric Quantum Positioning System [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2009 (12): 1-6 (杨春燕, 吴德伟, 余永林, 等. 干涉式量子定位系统最优星座分布研究[J]. 测绘通报, 2009 (12): 1-6)
- [55] Wang Zhigang, Yang Xuan, Deng Yifan. Research on the Near-Earth Spacecraft Quantum Positioning Determinacy Algorithm [J]. *Flight Dynamics*, 2015 (6): 551-554 (王志刚, 杨绚, 邓逸凡. 近地空间航天器量子导航定位算法[J]. 飞行力学, 2015 (6): 551-554)
- [56] Larsen M, Bulatowicz M. Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope: For DARPA's Micro-technology for Positioning, Navigation and Timing Program [C]//International Frequency Control Symposium Proceedings, Baltimore, USA, 2012
- [57] Song Peishuai, Ma Jing, Ma Zhe, et al. Research and Development Status of Quantum Navigation Technology [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 29-43(宋培帅, 马静, 马哲, 等. 量子定位导航技术研究与发展现状[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 29-43)
- [58] Ren Zhaoheng, Miao Qiang, Wu Dewei, et al. Navigation Angle Measurement Scheme Based on Hybrid Entangled Quantum Signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 244-252(任钊恒, 苗强, 吴德伟, 等. 基于杂化纠缠量子信号的导航测角方案[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 244-252)
- [59] Yang S, Liu J, Gong X, et al. A Robust Heading Estimation Solution for Smartphone Multisensor Integrated Indoor Positioning [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, DOI: 10.1109/JIOT. 2021. 3077912
- [60] Wu T, Liu J, Li Z, et al. Accurate Smartphone Indoor Visual Positioning Based on a High-Precision 3D Photorealistic Map [J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1974
- [61] Liu J, Chen R, Pei L, et al. A Hybrid Smartphone Indoor Positioning Solution for Mobile LBS [J]. *Sensors*, 2012, 12(12): 17208-17233

Summary and Prospect of Indoor High-Precision Positioning Technology

LIU Jingbin¹ ZHAO Zhibo¹ HU Ningsong¹ HUANG Gege¹
GONG Xiaodong¹ YANG Sheng¹

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: High-precision indoor positioning technology is of great significance to the development of national economy. In recent years, with the increasing demand for location services and the continuous iteration of technology, indoor positioning continues to develop towards high precision and seamless. In the case that the satellite signal cannot cover the indoor, the high-precision indoor positioning technology has become a research hotspot, and a variety of positioning sources and corresponding positioning principles have been developed. Aiming at the latest development status of high-precision indoor positioning technology, we divide into high-precision positioning methods based on geometric relation, fingerprint matching, incremental estimation and quantum navigation according to different positioning principles. We introduce the positioning principle of various methods, discuss and analyze the current technology development, summary the characteristics of high-precision indoor positioning technology, and discuss the future development trend of multi-source, intelligent and popular. Through the analysis of different positioning principles and technologies, it has reference value for the future study of indoor high-precision positioning sources and fusion positioning methods of different positioning sources.

Key words: indoor positioning; high-precision positioning; fusion positioning; pedestrian navigation; environment sensing localization

First author: LIU Jingbin, professor, PhD, specializes in indoor and outdoor ubiquitous fusion positioning technology and methods. E-mail: jingbin.liu@whu.edu.cn

Corresponding author: ZHAO Zhibo, PhD candidate. E-mail: zbzhao@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41874031, 42111530064); the National Key Research and Development Program of China(2021YFB2501102); Shenzhen Science and Technology Plan (JCYJ20210324123611032).

引文格式: LIU Jingbin, ZHAO Zhibo, HU Ningsong, et al. Summary and Prospect of Indoor High-Precision Positioning Technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(7):997-1008. DOI:10.13203/j.whugis20220029(柳景斌, 赵智博, 胡宁松, 等. 室内高精度定位技术总结与展望[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(7):997-1008. DOI:10.13203/j.whugis20220029)