

引文格式:陈锐志,郭光毅,陈亮,等.室内高精度定位技术研究应用现状与发展趋势[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(10):1591-1600.DOI:10.13203/j.whugis20230212



Citation: CHEN Ruizhi, GUO Guangyi, CHEN Liang, et al. Application Status, Development and Future Trend of High-Precision Indoor Navigation and Tracking[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(10):1591-1600. DOI: 10.13203/j.whugis20230212

室内高精度定位技术研究应用现状与发展趋势

陈锐志^{1,2} 郭光毅¹ 陈亮¹ 牛晓光³

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

2 武汉大学人民医院医学遥感信息研究院,湖北 武汉,430064

3 武汉大学计算机学院,湖北 武汉,430079

摘要:由于全球导航卫星系统定位信号弱而难以穿透建筑物,满足高精度、实时、高可靠需求的室内定位是泛在北斗系统所面临的挑战之一。高精度室内定位作为未来人工智能和超智能应用的时空数字底座核心技术之一,是工业界和学术界的研究热点。首先综述了现有高精度室内定位技术的发展现状,对比了各自优缺点及存在难点,然后分析了典型应用下相关技术的发展趋势,并对室内定位技术未来的发展方向和应用场景进行了展望。

关键词:位置服务;室内定位;数据融合

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2023-07-06

DOI:10.13203/j.whugis20230212

文章编号:1671-8860(2023)10-1591-10

Application Status, Development and Future Trend of High-Precision Indoor Navigation and Tracking

CHEN Ruizhi^{1,2} GUO Guangyi¹ CHEN Liang¹ NIU Xiaoguang³

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

2 Institute of Medical Informatics, Renmin Hospital of Wuhan University, Wuhan 430064, China

3 School of Computer Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Due to the blockage of satellite signals by the buildings and other structures, the high-accuracy, reliability and real-time indoor location-based services is one of the challenges for BeiDou navigation satellite system. As one of the core technologies of the spatio-temporal digital foundation for future artificial intelligence and super-intelligence applications, high-precision indoor positioning has long been a research hotspot in industry and academia. This paper first reviews the development status of existing high-precision indoor positioning technologies, and compares their advantages, disadvantages and difficulties. Then it analyzes the development trend of related technologies under typical applications, and looks forward to the future development direction and application scenarios of indoor positioning technologies.

Key words: location-based services; indoor positioning; data fusion

中国北斗定位导航系统已于2020-06-31实现全球覆盖,已具备在全球范围内的开阔环境下提供厘米级高精度定位服务能力。习近平总书记指出,要把北斗建设成更泛在、更融合、更智能的综合时空体系。更泛在的目标是融合其他非卫星定位技术,把北斗定位能力从室外拓展到室

内,形成无处不在、无时不有的定位时空体系;更融合是指在复杂定位环境里,针对单一定位源无法实现任意环境下高精度定位的问题,融合不同定位与通信信号和不同传感器数据,实现更弹性的高精度室内外无缝定位系统;更智能则是指定位系统具备定位环境自适应、定位源即插即用,

基金项目:国家自然科学基金(42201460);湖北省重点研发计划(42201460)。

第一作者:陈锐志,博士,教授,研究方向为室内外无缝定位、移动地理空间计算、卫星导航。ruizhi.chen@whu.edu.cn

通讯作者:郭光毅,博士,助理研究员。guangyi.guo@whu.edu.cn

在满足用户定位精度需求的前提下,以最低的功耗和成本实现高可用的智能定位系统。高精度的室内定位技术已成为实现高精度室内外无缝定位的主要挑战^[1-2]。

在实际应用场景的不断检验下,传统的室内定位技术^[3],如Wi-Fi指纹匹配、行人航迹推算、蓝牙iBeacon定位和地磁匹配等已经慢慢淡出主流的研究视野。在市场需求和谷歌、苹果、百度等国内外IT巨头的推动以及国家“十三五”期间的重点研发项目支持下,高精度室内定位技术得到了迅猛的发展,并一跃成为了室内定位领域的研究主流。如谷歌、华为采纳并推动的Wi-Fi RTT(round-trip-time)测距技术,苹果、三星、小米推动的基于超宽带(ultra wide band,UWB)的距离感知、寻向和定位技术。此外,近年来发展的高精度室内定位技术还包括音频定位技术、5G定位技术、伪卫星定位技术、蓝牙测角技术和视觉定位技术等。本文将重点讨论近年来不断演进的室内定位技术,并对未来室内定位技术发展与应用趋势进行分析和展望。

1 室内高精度定位技术

1.1 室内高精度定位发展现状

高精度室内定位领域目前处于百花齐放、百家争鸣的状态。尽管在苹果、谷歌等科技巨头的支持下,UWB技术在激烈的竞争中拥有一定的优势,但5G、音频、伪卫星和蓝牙测角等可支持所有大众手机的技术也会让这场竞争更加精彩。

现有室内定位源与信号如图1所示。从定位源信号物理属性区分,目前的定位技术可以大致分为射频信号、声信号、磁信号、运动传感器信号、可见光以及图像;从定位元器件来看,可分为射频传感器^[4]、麦克风^[5-6]、摄像头^[7-8]、磁力计^[9]和惯性测量单元^[10-11]等;依据定位方法的不同,亦可分为三边定位^[12]、指纹匹配^[13]、多源融合定位^[14-15]等。相关室内定位技术的优缺点,国内外学者已有综述文献予以总结^[16-17]。值得一提的是,由于无线设备的广泛部署和射频传感器的广泛使用,无线射频定位技术,如低功耗蓝牙技术(blue-tooth low energy,BLE)^[18]、Wi-Fi^[13]、蜂窝^[19-21],仍然是室内定位技术中使用最广泛的信号。遗憾的是,这些普遍存在的通讯信号并不是为室内定位而设计的,这也使得室内定位技术与方法朝着更多元化的方向发展。

1.1.1 Wi-Fi RTT 定位技术

IEEE 802.11mc 协议^[22]由 IEEE 802.11 协议工作组 Task Group mc 提出,用于测量终端到周围基站距离的 Wi-Fi 通讯协议。该协议围绕一种称为精细定时测量(fine time measurement, FTM)帧的新数据包类型构建,图2展示了 RTT 的基本工作原理。与基于到达时间(time of arrival, TOA)和到达时间差(time difference of arrival, TDOA)的技术相比,Wi-Fi RTT 技术最显著的优势之一是发射机与接收机之间不需要时钟同步,极大地降低了室内定位系统的复杂性和综合成本,提高了系统的可靠性。由于假设了 Wi-Fi AP(access point)时钟和手机时钟以相近的速率运行,因此两个设备之间往返时间的测量误差同距离是相互独立的^[12];作为一种基于时间测量的距离估计方法,由于时钟无法以绝对稳定和准确的速度运行,导致了时间测量中存在误差^[23]。相比基于 RSS(received signal strength)距离估计的方法,标准化的 FTM 协议可以提供高精度的距离测量和更高的更新速率,但在室内环境中也会受到反射、衰减和遮挡的影响^[24]。除此之外,尽管 FTM 协议是标准化的,但是 Wi-Fi 网卡的硬件和固件差异存在不同的处理时间延迟,进一步影响了距离测量的精度^[12];并且作为一种单用户协议,其处理并发请求的能力是有限的^[25],即一个 AP 无法同时响应大量 FTM 请求。该技术通过无线 AP 与智能手机交互,可实现高精度测距和 1~2 m 的定位精度。通过标定和改正 AP 与智能手机的系统测距偏差,并与智能手机的内置惯性传感器融合,可以实现优于 1 m 的定位精度^[14, 26-27]。

1.1.2 超宽带定位技术

UWB 技术最早出现在 20 世纪 60 年代,主要用于军用雷达,之后在解除民用限制后,逐渐应用于通信和定位领域。随着 IEEE 成立 802.15.4a 任务小组对技术方案进行标准化,进一步推动 UWB 技术方案的快速发展。UWB 信号具有高带宽、脉冲短等优势,能够有效降低多径干扰的影响,并且不受其他通信设备或外部噪声的影响。作为目前成熟度最高的高精度定位技术,在理想测试条件下,UWB 可达到 10 cm 的距离感知能力和 30 cm 的定位能力。在芯片方面,Decawave 是当前 UWB 定位芯片的主要供应商;苹果、谷歌、三星、小米也在各自的移动终端、智能家居方案中不断推动着 UWB 技术的发展。



图 1 现有室内定位源与信号

Fig. 1 Current Indoor Positioning Technologies and Signals

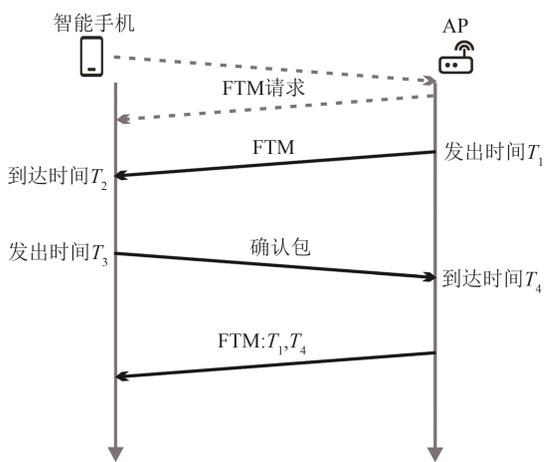


图 2 FTM 协议^[12]

Fig. 2 FTM Protocol^[12]

典型的 UWB 定位模式包括 TWR (two way ranging) 和 TDOA 两种。TWR 方法基于两个设备之间的双向通信,测量 UWB 射频信号的飞行时间实现测距。与 Wi-Fi RTT 类似,其优点是不需要时间同步,缺点也同样是支持用户数量受限制。TDOA 方法与 GPS 非常相似,可以克服用户数量受限的缺点,但需要基站间亚纳秒级的高精度时间同步。TDOA 的定位模式又可细分为下行 TDOA 和上行 TDOA。下行 TDOA 采用广播模式,由终端解算定位结果;上行 TDOA 则是由终端发射信号,服务器端解算定位结果,其优点是用户终端功耗比下行 TDOA 模式更低,适用于标签等位置跟踪设备。除此之外, PDOA (phase difference of arrival) 方法利用到达角相位来测量基站与标签之间方位关系,结合 TWR 方法可为室内无人机的定位、机器人提供定位跟随能力。

1.1.3 音频定位技术

声信号定位主要测量器件是扬声器或麦克风,这使其能够兼容当前绝大多数的智能设备,具有较强的通用性和普适性,是智能手机终端高

精度室内定位与导航最有潜力的解决方案之一^[6]。其成本低、精度高、兼容广的特点,也使得声信号定位系统近年来受到广泛关注。

按定位原理,可将国内外的声信号室内定位系统 (acoustic indoor positioning system, AIPS) 分为飞时 (time of flight, TOF) 系统^[28-29]和 TDOA 系统^[6,30]。TOF 系统需要基站与智能手机时间同步,麻省理工学院在 2000 年提出的 Cricket 系统,将电磁波和超声波结合起来联合估计超声波到达时间进行定位^[31],该套系统限制接入用户数量;加利福尼亚大学 Mandal 团队设计的 Beep 系统^[32],采用移动端播发、音频基站接收的架构,同时将移动端设备同音频基站进行了时钟同步,直接估计音频信号的传播时间实现定位,当多用户接入时,移动端分时播发;之后普渡大学研发的 BeepBeep 系统,利用一个基于双向消息交换的时间同步协议直接实现了音频基站同智能手机的距离估计^[33];2016 年,南京邮电大学研究团队对 BeepBeep 系统进行优化后提出了 oneBeep 系统^[34];圣荷西州立大学团队设计提出的 Guoguo 系统^[35]采用了码分多址的播发架构,采用正交编码调制技术直接估计信号的到达时间。TDOA 系统则无需进行音频基站同智能终端的时间同步,降低了系统的复杂度,也提高了一定的系统稳健性。通常通过无线射频信号实现时钟同步,采用时分多址和频分多址的播发架构,智能手机通过检测音频基站播发信号的到达时间,求解 TDOA 实现定位^[36-38]。

依据声信号播发形式的不同,AIPS 又可分为被动追踪式^[32-33]和主动定位式^[39-42],如图 3 所示。被动追踪式^[43]采用智能手机播发音频信号,在同一时钟系统下的音频基站接收信号,解算 TDOA 实现被动追踪定位。通常这种播发方式

支持不了多个用户,系统扩展能力较差。与之相反,主动定位式原理则同GNSS类似,由扬声器发射定位信号,智能手机接收、检测声波信号实

现实时定位。相比被动追踪模式,主动定位架构通用性强、成本低、响应用户数量不受限制,同时用户隐私性强。

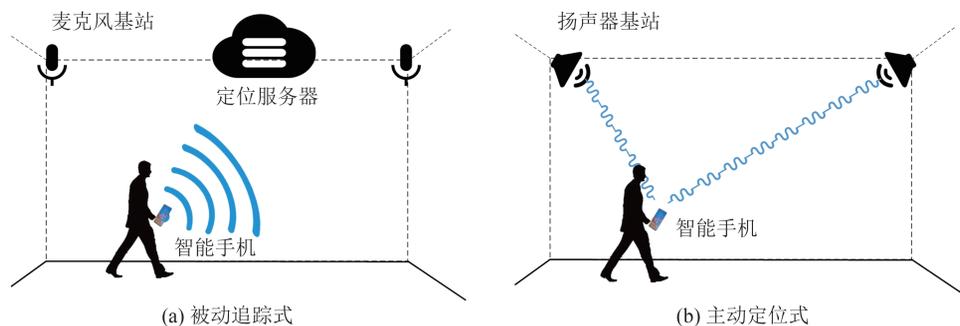


图3 声信号室内定位系统

Fig. 3 Indoor Positioning System Based on Acoustic Signals

1.1.4 5G通信定位技术

目前,第五代(5G)移动网络发展迅速,5G蜂窝网络在2019年开始在全球部署。根据Ericsson Mobility Report的研究报告,截至2020年底,全球的5G用户数量约有2.2亿^[44]。5G NR(new radio)于2019年10月在中国首次投入商用,截至2020年3月,5G用户突破5000万,约占全球总数的70%^[45]。相关文献表明,5G引入了一系列先进技术,包括大规模天线阵列、超密集组网、新的多用户接入方案、全频谱接入和基于软件定义网络等,用以支持具有大容量、高可靠、广覆盖和低延迟等特性的新一代无线通信技术^[46]。

受益于5G引入的小型蜂窝、设备对设备(device-to-device, D2D)通信、异构网络(Het-Net)、大规模多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)和毫米波通信^[47]等关键技术,5G移动通信系统的定位精度有望提高。如通过D2D通信,移动终端或智能手机可以协同定位,能有效提高定位精度,同时又减少了定位延时;大规模MIMO技术也为精确的测角提供了更多的可能性;小型蜂窝密集网络可进行大量的视线传输,大信号带宽可以提高测距精度,从而提高多径分辨率。

具体方法可以分为几何定位和匹配定位两类。几何定位可以进一步分为:利用5G中应用大规模MIMO和智能天线技术来估计到达角(angle of arrival, AOA)和离去角(angle of departure, AOD)^[48-49],基于5G标准中的信号(主同步信号、辅助同步信号、定位参考信号)来实现TDOA/TOA估计实现定位^[50-51],以及基于角度和时序设计的联合估计方法,利用5G上行参考信号来估计和追踪AOA和TOA^[20]。此外,基于

5G信号的匹配定位也受到了广泛关注,相关研究主要包括基于接收信号强度指示器(received signal strength indication, RSSI)的指纹定位和基于信道状态信息(channel state information, CSI)的指纹定位^[52-53]。

总体而言,5G通信技术迅猛发展,商用5G网络大规模部署使得广域覆盖的室内外无缝定位成为可能。然而,新近纳入3GPP标准的5G定位方式采用上下行交互的专用定位参考信号,需要占用额外的通讯带宽,同时也存在用户隐私泄露和定位容量受限问题。基于5G通信技术的室内外无缝定位方案仍然存在着精度低、成本高、推广难的困难和挑战。

1.1.5 蓝牙测角技术

通过天线阵列估计射频信号的到达角度,来进行多基站定位或单机站定位。基于低功耗蓝牙的高精度室内定位技术最初由诺基亚开发,并交由Quuppa^[54]公司商业化。Quuppa系统采用圆形的天线阵列,基于蓝牙4.2协议来测量手机或标签发出的低功耗蓝牙信号的入射角,实现单基站定位^[55]。2019年,蓝牙技术联盟在蓝牙5.1^[56]核心规范中引入了寻向增强功能,以更好地支持位置服务^[57-58]。TI公司和Nordic公司相继基于CC2652R1芯片和nRF52833芯片发布了各自的AOA的定位方案。蓝牙测角技术的定位精度取决于天线阵列的安装高度,从分米级到米级。当天线阵列安装高度低时,其定位精度高,但信号覆盖范围小,因此蓝牙测角技术不适合地下停车场等层高矮的环境。相比于传统基于RSSI的蓝牙定位方法,蓝牙测角技术可以得到更高的定位精度,但室内环境复杂多变,现有方案在天线的选型与设计、切换时隙、IQ数据的处理和角度估

计方法仍然有待突破。除此之外,如何克服多路径干扰以及传统算法存在计算复杂度较高等问题是其面临的挑战。

1.1.6 视觉定位

视觉定位在自动驾驶和室内机器人等算力强大的平台上已经得到广泛推广。即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术是高精度视觉定位的主流技术,但由于对定位平台的算力要求很高,在智能手机和可穿戴设备等移动平台上还难以实现^[15],在行人导航领域主要基于单目视觉。一种方法是基于图像匹配,即通过将当前照片与存储在图像数据库中的照片进行匹配来计算定位。密度匹配和运动恢复结构的方法可以匹配图像特征数据库中的图像特征。另一种方法是基于视觉陀螺仪和视觉里程计技术^[59-60]。视觉陀螺仪利用单目摄像机获得每幅图像消失点,并利用相邻两幅图像的消失点变化来获得航向变化率。基于单张照片的智能手机视觉定位技术也能够实现 0.3 m 的定位精度^[8]。视觉定位技术对定位环境的光照条件要求高,在夜间或光照不足的环境里难以应用。此外,视觉定位技术对定位终端的算力要求高,巨大的计算量很难保证低功耗。但随着智能手机计算性能和存储容量的进一步提高,该方法将在行人导航领域具有更广阔的应用前景。

1.1.7 可见光定位

可见光定位(visible light positioning, VLP)具有高能效、长寿命、低成本、抗多径、高精度等优势,在复杂室内和地下空间定位方面潜力巨大。光信号对衰减、多径和电磁波干扰不敏感^[61],因此可以获得高精度的测量值;但是光信号不能穿透不透明的物体,因此遮挡条件下 VLP 系统通常无法工作^[62]。光信号定位同样可以分为 RSS、TOA、TDOA 和 AOA 几种模式^[63]。其中,基于 RSS 的方法因其对硬件和计算能力要求低、易实现,在 VLP 中研究最为广泛,该类方法可实现 15~20 m 的有效测距范围和 20~30 cm 的测距精度。

1.1.8 伪卫星定位技术

伪卫星定位技术由美国斯坦福大学于 20 世纪 70 年代首次提出,由于该技术要求基站间高精度时间同步和受室内多路径误差大等因素的影响,很长一段时间这一技术发展缓慢。2011 年 9 月,澳大利亚 LOCATA 技术^[64]出现在美国 GPS World 杂志的封面,将这一技术推向新的高潮。

中国在“十三五”期间,中国电子科技集团公司第 54 研究所蔚保国团队攻关研究,进一步推动伪卫星技术的发展^[65]。此外,随着安卓 7.0 后开放 GNSS 原始数据接口,也为伪卫星技术接入智能手机定位提供可能。目前基于智能手机的伪卫星定位精度在 3~5 m 左右,高精度时间同步和室内多路径误差依然是提高其定位精度的难点。

1.2 室内高精度定位发展趋势

1.2.1 现有高精度定位技术的进一步研究

北斗+5G、蓝牙 AOA、音频、伪卫星、UWB、光源等定位技术的成熟度各异,依然是未来几年的研究热点,特别是北斗+5G、音频定位、北斗伪卫星等拥有自主可控的核心定位技术,在大众市场需求(手机支持)和国防与公共安全领域市场需求催动下,在未来的几年会得到进一步的发展和推广。

Wi-Fi RTT、蓝牙 AOA/AOD、可见光定位等技术在未来一段时间内仍然是研究热点。蓝牙 AOA/AOD、可见光定位这两种技术具有低成本、低功耗的优点,虽然单基站信号覆盖能力不占优势,但在室内小空间如办公室,有很高的性价比。在非安全领域,UWB 是目前市场成熟的定位技术之一,但其真正在大型复杂空间如高铁站、飞机场等环境应用落地,还需要技术优化,如时间同步、多路径消除等。

除此之外,为了满足复杂室内环境和应用场景多样化的需求,并弥补现有单一定位技术的局限,构建一套室内 PNT(positioning, navigation, and timing)系统,实现多种技术互相配合协同作用,提供一个室内全域可信定位服务平台具有重要的现实意义。

1.2.2 定位新理论、新方法研究

随着定位技术和传感器的不断演进,采集的数据类型和质量也越发丰富,这都对定位理论和方法提出了新的发展要求。如针对运动不可交换性的超精确计算问题,文献^[66]提出函数迭代积分惯导解算新理论,消除了捷联惯导系统的计算误差因素。借鉴大脑海马区、内嗅皮层中的神经元工作机制的新型仿生智能导航理论,也将随着脑区空间导航神经机制的深入研究,展现出更强的智能性和适应性。此外,智能设备的算力提升,因子图优化方法也逐渐在导航领域显示出优于传统卡尔曼滤波的性能^[26];基于深度学习的数据驱动,数据与模型双驱动等新的定位理论与方法^[15],都值得未来进一步探索。

2 服务大众的室内高精度定位应用趋势

北斗和室内定位技术已经在满足国家重大需求、促进世界科技前沿和推动经济主战场发展等方面发挥了很重要的作用。但在服务数字治理、应急响应、康养医疗、元宇宙等领域还缺乏相应研究,仍然存在着很大的发展空间和广泛的应用前景。

2.1 面向应急响应的数字接触追踪

数字接触追踪技术(digital contact tracing, DCT)是麻省理工学院2021年十大突破性技术之一,其原理是通过采用手机应用程序或其他设备收集人们的位置数据、社交网络活动等信息(如图4所示),并结合追踪算法,追踪人们在公共场所的行踪并分析传播疾病的风险的方法^[67]。在疫情流行期间,DCT成为全球范围内防控疫情的重要手段之一。

典型的实现方法包括:(1)近距离无线通信;(2)GPS定位;(3)网络行为跟踪等。其中基于蓝牙接近技术的距离感知技术应用最为广泛,但其在精度和可靠性上还是不能满足病毒传播链精准跟踪的要求。更加精细化的数字追踪技术将有助于更好地预测疫情的发展趋势,及时发现和隔离疑似感染者,从而更加准确地控制和管理疫情。

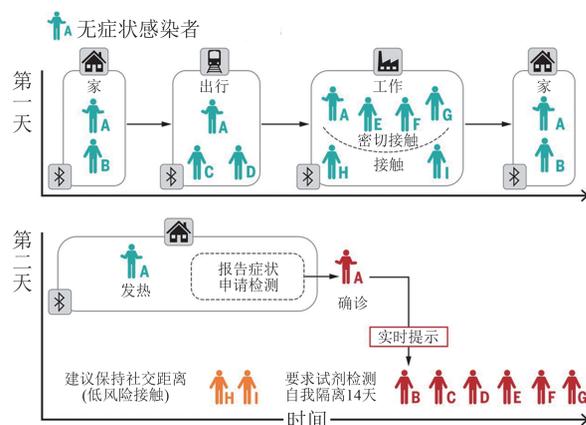


图4 疫情防控中数字接触追踪技术^[67]

Fig. 4 Outbreak Control with DCT^[67]

DCT在未来将朝着更加精细化、智能化、多元化的方向发展,不再局限于疫情防控和公共卫生管理,还将广泛应用于交通、旅游、安全等领域。此外,作为一种应用广泛的数字化技术手段,DCT在隐私保护和数据安全问题方面也需要更强的约束,才能更好地发挥作用。

2.2 面向体内微空间的医疗机器人定位

体内微空间医疗机器人定位如图5所示,该技术也是未来发展趋势之一,主要用于精准医疗,目前已在医疗(胶囊)机器人、胶囊内镜上得到应用,已成为了广泛应用的消化道检查手段。相比于传统有线消化道内窥镜而言,它具有无痛、无交叉感染、行动不受限的特点。但目前还缺乏体内微空间的胶囊内镜定位技术,以支撑消化道的精准三维建模、病灶精准定位以及药物精准投放等精准医疗手段。体内微空间是一个柔性体,与目前接触的刚性室内外定位场景不一样,在定位理论及方法上不能直接套用。该项技术的突破是导航定位领域的学科交叉和导航定位技术的应用拓展。

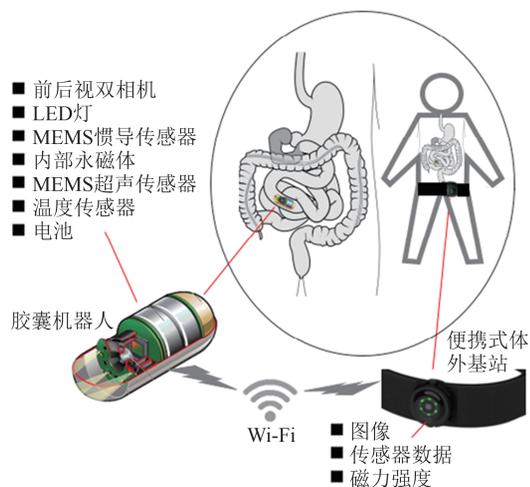


图5 体内空间胶囊机器人定位

Fig. 5 Localization System for Robotic Endoscopic Capsules

2.3 面向康养的无源定位与行为感知

无源定位是一种通过接收被动信号来确定目标位置的定位技术,它主要依靠目标发射或者反射的电磁辐射、声波、红外等被动信号,并通过接收这些信号的设备来分析信号的频率、相位、强度等特征来确定目标的位置信息。它可以在不被目标察觉的情况下进行定位,但是它所依赖的信号质量、接收器性能以及对目标信号的处理算法都可以影响定位精度。

随着老龄化、高龄化趋势以及传统家庭结构的发展,中国居家养老者的养老问题愈发突出。对于不同场景有不同的养老解决方案需求,其核心仍围绕着老人的居家安全、生活护理、异常监测和及时救治为主,目前仍然缺乏行之有效的智慧养老硬件生态和解决方案。24h的实时看管需要借助室内精准定位与行为感知技能来完成。

定位与感知起居活动,感知老年人在不同生活空间的停留时间和活动模式,需要在不侵犯老人隐私的前提下实现;但要求老年人佩戴一个可穿戴定位设备,在实际应用层面操作难度大。因此,不向被定位的对象发射定位信号的无源定位技术成为了解决这一问题的理想手段。

2.4 面向新一代可穿戴设备定位技术

在移动互联网发展的 20 年里,移动通信技术快速的发展,使得面向智能手机的室内定位技术一直是研究的热点。在未来,新一代的可穿戴设备也将通过搭载更加丰富的传感器、高性能数据传输、更加智能的交互方式来满足人们的不同生活、办公、娱乐的需求,如苹果公司最新发布的混合显示产品、谷歌眼镜等。

因此,面向新一代可穿戴设备的高精度的位置服务仍然是虚拟现实/增强显示、数字孪生体和元宇宙等未来智能应用的重要组成部分。新一代可穿戴设备存在体积小、重量轻、算力有限和功耗低等诸多约束条件,现有的基于智能手机的定位理论与方法未必能满足这些条件。因此,研究高性能、低功耗的专用定位芯片将会成为一个重要的研究热点。

3 结 语

高精度的定位技术是未来人工智能和超智能应用的核心技术之一。在室外,北斗卫星定位技术及其应用已融入人们的工作生活,并服务于国防、大众民生和国民经济的发展。但是,面向室内环境的高精度定位挑战仍然存在,现有的 Wi-Fi RTT、UWB、音频、5G、蓝牙测角等高精度定位技术在未来一段时间内仍将会是研究热点。与此同时,新一代可穿戴设备的突破和发展,对高精度室内定位与导航新理论和新方法提出了更高的要求。在服务大众应用方面,高精度的室内定位技术作为时空数字底座核心,在数字治理、应急响应、康养医疗和元宇宙等场景中具有广泛的应用前景和巨大的发展空间。

参 考 文 献

- [1] 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.)
- [2] Liu Wanke, Tao Xianlu, Zhang Chuanming, et al. Pedestrian Indoor and Outdoor Seamless Positioning Technology and Prototype System Based on Cloud-end Collaboration of Smartphone[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(12): 1808-1818. (刘万科, 陶贤露, 张传明, 等. 云-端协同的智能手机行人室内外无缝定位技术及其原型系统验证[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(12): 1808-1818.)
- [3] Chen Ruizhi, Ye Feng. An Overview of Indoor Positioning Technology Based on Wi-Fi Channel State Information[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2064-2070. (陈锐志, 叶锋. 基于 Wi-Fi 信道状态信息的室内定位技术现状综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2064-2070.)
- [4] Bergeron F, Bouchard K, Gaboury S, et al. Indoor Positioning System for Smart Homes Based on Decision Trees and Passive RFID[C]//Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Cham, Germany, 2016.
- [5] Chen R Z, Li Z, Ye F, et al. Precise Indoor Positioning Based on Acoustic Ranging in Smartphone [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 9509512.
- [6] Chen Ruizhi, Guo Guangyi, Ye Feng, et al. Tightly-coupled Integration of Acoustic Signal and MEMS Sensors on Smartphones for Indoor Positioning [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(2): 143-152. (陈锐志, 郭光毅, 叶锋, 等. 智能手机音频信号与 MEMS 传感器的紧耦合室内定位方法[J]. 测绘学报, 2021, 50(2): 143-152.)
- [7] Chen Y J, Chen R Z, Liu M Y, et al. Indoor Visual Positioning Aided by CNN-based Image Retrieval: Training-Free, 3D Modeling-free [J]. *Sensors*, 2018, 18(8): 2692.
- [8] Wu D W, Chen R Z, Chen L. Visual Positioning Indoors: Human Eyes vs. Smartphone Cameras [J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 2645.
- [9] Kuang J, Niu X J, Zhang P, et al. Indoor Positioning Based on Pedestrian Dead Reckoning and Magnetic Field Matching for Smartphones[J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4142.
- [10] Zhuang Y, Yang J, Qi L N, et al. A Pervasive Integration Platform of Low-cost MEMS Sensors and Wireless Signals for Indoor Localization [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(6): 4616-4631.
- [11] Qiu C, Xu Y Z, Zhu Y, et al. MAGINS: Neural Network Inertial Navigation System Corrected by

- Magnetic Information[C]//2021 IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC), Austin, USA, 2021.
- [12] Guo G Y, Chen R Z, Ye F, et al. Indoor Smartphone Localization: A Hybrid Wi-Fi RTT-RSS Ranging Approach [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 176767-176781.
- [13] Peng X S, Chen R Z, Yu K G, et al. A New Wi-Fi Dynamic Selection of Nearest Neighbor Localization Algorithm Based on RSS Characteristic Value Extraction by Hybrid Filtering [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32 (3) : 034003.
- [14] Guo G Y, Chen R Z, Ye F, et al. A Robust Integration Platform of Wi-Fi RTT, RSS Signal, and MEMS-IMU for Locating Commercial Smartphone Indoors [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(17): 16322-16331.
- [15] Chen Ruizhi, Qian Long, Niu Xiaoguang, et al. Fusing Acoustic Ranges and Inertial Sensors Using a Data and Model Dual-driven Approach [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7) : 1160-1171. (陈锐志, 钱隆, 牛晓光, 等. 基于数据与模型双驱动的音频/惯性传感器耦合定位方法 [J]. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1160-1171.)
- [16] Hou X Y, Bergmann J. Pedestrian Dead Reckoning with Wearable Sensors: A Systematic Review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(1): 143-152.
- [17] 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. (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.)
- [18] Ye F, Chen R Z, Guo G Y, et al. A Low-cost Single-anchor Solution for Indoor Positioning Using BLE and Inertial Sensor Data [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 162439-162453.
- [19] Dammann A, Jost T, Raulefs R, et al. Optimizing Waveforms for Positioning in 5G [C]//2016 IEEE 17th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Edinburgh, UK, 2016.
- [20] Chen L, Zhou X, Chen F F, et al. Carrier Phase Ranging for Indoor Positioning with 5G NR Signals [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9 (13): 10908-10919.
- [21] Ruan Y L, Chen L, Zhou X, et al. Hi-Loc: Hybrid Indoor Localization via Enhanced 5G NR CSI [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 5502415.
- [22] IEEE Computer Society LAN/MAN Standards Committee. IEEE Standard for Information Technology Telecommunication and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements Part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment1: Radio Resource Measurement of Wireless LANs. [S/OL]. [2009-05-08] <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11n-2009.pdf>.
- [23] Hamilton B R, Ma X L, Zhao Q, et al. ACES: Adaptive Clock Estimation and Synchronization Using Kalman Filtering [C]//The 14th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, San Francisco, USA, 2008.
- [24] Ibrahim M, Liu H S, Jawahar M, et al. Verification: Accuracy Evaluation of Wi-Fi Fine Time Measurements on an Open Platform [C]//The 24th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, New Delhi, India, 2018.
- [25] Banin L, Bar-Shalom O, Dvorecki N, et al. High-accuracy Indoor Geolocation Using Collaborative Time of Arrival [J]. *IEEE Wireless Transaction*, 2017, 11(2): 512-560.
- [26] Guo G Y, Chen R Z, Niu X G, et al. Factor Graph Framework for Smartphone Indoor Localization: Integrating Data-driven PDR and Wi-Fi RTT/RSS Ranging [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(11): 12346-12354.
- [27] Xu S H, Chen R Z, Yu Y, et al. Locating Smartphones Indoors Using Built-in Sensors and Wi-Fi Ranging with an Enhanced Particle Filter [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 95140-95153.
- [28] Lazik P, Rajagopal N, Shih O, et al. ALPS: A Bluetooth and Ultrasound Platform for Mapping and Localization [C]//The 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Seoul, South Korea, 2015.
- [29] Rajagopal N, Lazik P, Pereira N, et al. Enhancing Indoor Smartphone Location Acquisition Using Floor Plans [C]//The 17th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), Porto, Portugal, 2018.
- [30] Chen X, Chen Y H, Cao S, et al. Acoustic Indoor Localization System Integrating TDMA+FDMA Transmission Scheme and Positioning Correction Technique [J]. *Sensors*, 2019, 19(10): 2353.
- [31] Priyantha N B, Chakraborty A, Balakrishnan H.

- The Cricket Location-support System[C]//The 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Boston, USA, 2000.
- [32] Mandal A, Lopes C V, Givargis T, et al. Beep: 3D Indoor Positioning Using Audible Sound[C]//The 2nd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, Las Vegas, USA, 2005.
- [33] Peng C Y, Shen G B, Zhang Y G. BeepBeep[J]. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 2012, 11(1): 1-29.
- [34] Tan C M, Zhu X H, Su Y, et al. A Low-cost Centimeter-level Acoustic Localization System Without Time Synchronization[J]. *Measurement*, 2016, 78: 73-82.
- [35] Liu K K, Liu X X, Li X L. Guoguo: Enabling Fine-grained Indoor Localization via Smartphone [C]//The 11th annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, Taipei, Taiwan, China, 2013.
- [36] Lopes S I, Vieira J M N, Reis J, et al. Accurate Smartphone Indoor Positioning Using a WSN Infrastructure and Non-invasive Audio for TDoA Estimation[J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2015, 20: 29-46.
- [37] Kim S, Chong J W. Chirp Spread Spectrum Transceiver Design and Implementation for Real Time Locating System [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015, 11(8): 572861.
- [38] Guo G Y, Chen R Z, Yan K, et al. Large-scale Indoor Localization Solution for Pervasive Smartphones Using Corrected Acoustic Signals and Data-driven PDR[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(17): 15338-15349.
- [39] Zhang Lei. Key Technologies of Acoustic Indoor Localization Systems for Smart Mobiles [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (张磊. 基于声音的智能移动终端室内定位关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.)
- [40] 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.)
- [41] Zhang L, Huang D J, Wang X H, et al. Acoustic NLOS Identification Using Acoustic Channel Characteristics for Smartphone Indoor Localization [J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 727.
- [42] Cao S, Chen X, Zhang X, et al. Effective Audio Signal Arrival Time Detection Algorithm for Realization of Robust Acoustic Indoor Positioning [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(10): 7341-7352.
- [43] Lazik P, Rowe A. Indoor Pseudo-ranging of Mobile Devices Using Ultrasonic Chirps [C]//The 10th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, Toronto, Canada, 2012.
- [44] Report E M. More than 1 Billion People Will Have Access to 5G Coverage by the End of 2020 [EB/OL]. [2020-11-30]. <https://www.ericsson.com/en/press-releases/2020/11/more-than-1-billion-people-will-have-access-to-5g-coverage-by-the-end-of-2020>.
- [45] Intelligence G. The Mobile Economy China 2021 [EB/OL]. (2021-05-02). <https://www.gsma.com/mobileeconomy/china/>.
- [46] Shafi M, Molisch A F, Smith P J, et al. 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [47] Talvitie J, Valkama M, Destino G, et al. Novel Algorithms for High-accuracy Joint Position and Orientation Estimation in 5G mm Wave Systems [C]//2017 IEEE Globecom Workshops, Singapore, 2017.
- [48] Zheng Z, Fu M C, Wang W Q, et al. Mixed Far-field and Near-field Source Localization Based on Subarray Cross-cumulant [J]. *Signal Processing*, 2018, 150: 51-56.
- [49] Han K, Liu Y, Deng Z L, et al. Direct Positioning Method of Mixed Far-field and Near-field Based on 5G Massive MIMO System [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 72170-72181.
- [50] Rahman M M. Investigations of 5G Localization with Positioning Reference Signals [D]. Tampere: Tampere University, 2020.
- [51] Song Weiwei, Lin Wei, Lou Yidong, et al. TDOA Positioning with BDS+5G Space-time Datum [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1170-1179. (宋伟伟, 林巍, 楼益栋, 等. 北斗+5G时空基准的TDOA定位方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1170-1179.)
- [52] Meng J Y, Sharma A, Tran T X, et al. A Study of Network-side 5G User Localization Using Angle-based Fingerprints [C]//2020 IEEE International Symposium on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN), Orlando, USA, 2020.
- [53] Klus R, Klus L, Solomitckii D, et al. Deep

- Learning Based Localization and HO Optimization in 5G NR Networks [C]//2020 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), Tampere, 2020.
- [54] Saloranta E. Quoppa-paikannusjärjestelmän paikannustarkkuuden määrittäminen ja käyttöohje [EB/OL]. (2016-11-21). <https://core.ac.uk/download/pdf/45600559.pdf>.
- [55] Saloranta E. Quoppa [EB/OL]. [2017-12-03]. <http://quoppa.com/technology/>.
- [56] SIG. Bluetooth Core Specification Version 5.1 Feature Overview : 2019 [S/OL]. [2019-09-20]. <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-core-specification-v5-1-feature-overview>.
- [57] SIG. Bluetooth 5.1 Direction Finding : 2019 [S/OL]. [2019-09-20]. <https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2019/05/BTAsia/1145-NORDIC-Bluetooth-Asia-2019Bluetooth-5.1-Direction-Finding-Theory-and-Practice-v0.pdf>.
- [58] SIG. Bluetooth Legacy Specification : 2019 [S/OL]. [2019-09-20]. https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2023/02/2301_5.4_Tech_Overview_FINAL.pdf.
- [59] Ruotsalainen L. Visual Gyroscope and Odometer for Pedestrian Indoor Navigation with a Smartphone [C]//The 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation, Nashville, 2012.
- [60] Ruotsalainen L, Kuusniemi H, Bhuiyan M Z H, et al. A Two-dimensional Pedestrian Navigation Solution Aided with a Visual Gyroscope and a Visual Odometer [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17 (4) : 575-586.
- [61] Zhuang Y, Hua L C, Qi L N, et al. A Survey of Positioning Systems Using Visible LED Lights [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(3) : 1963-1988.
- [62] Karunatilaka D, Zafar F, Kalavally V, et al. LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(3) : 1649-1678.
- [63] Sun X, Zhuang Y, Huai J Z, et al. RSS-based Visible Light Positioning Using Nonlinear Optimization [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9 (15) : 14137-14150.
- [64] 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.
- [65] Xia Yan, Pan Shuguo, Yu Baoguo, et al. Carrier Multipath Error Mitigation Method for the Indoor Pseudolite System [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(2) : 62-72. (夏炎, 潘树国, 蔚保国, 等. 室内伪卫星载波多径误差抑制方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2) : 62-72.)
- [66] Wu Y X. INavFIter: Next-Generation Inertial Navigation Computation Based on Functional Iteration [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, 56(3) : 2061-2082.
- [67] Elmokashfi A, Sundnes J, Kvalbein A, et al. Nationwide Rollout Reveals Efficacy of Epidemic Control Through Digital Contact Tracing [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5918.
- [68] Ferretti L, Wymant C, Kendall M, et al. Quantifying SARS-COV-2 Transmission Suggests Epidemic Control with Digital Contact Tracing [J]. *Science*, 2020, 368(6491) : eabb6936.