

# 室内定位技术及其在无缝导航应用研究进展<sup>①</sup>



刘宇<sup>1,2,3</sup>, 刘双<sup>1,2,3</sup>, 韩雨辰<sup>1,2,3</sup>, 朱平<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>(安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 淮南 232001)

<sup>2</sup>(安徽理工大学矿山采动灾害空天地协同监测与预警安徽普通高校重点实验室, 淮南 232001)

<sup>3</sup>(安徽理工大学矿区环境与灾害协同监测煤炭行业工程研究中心, 淮南 232001)

通信作者: 刘宇, E-mail: 2361203186@qq.com

**摘要:** 如今, 全球导航卫星系统 (GNSS) 基本解决了室外开阔环境下的实时高精度定位问题. 然而, 随着城市化进程加快, 为受到 GNSS 信号干扰的密集建筑物场所提供行人导航服务也产生了大量需求, 并推动室内定位技术近年来取得了较大进展. 在此基础上, 由于目前还没有任何单一普适的定位方式解决室内外环境的无缝过渡, 因此, 为了解决导航领域“最后一公里”的难题, 无缝导航技术开启了新的热点与课题. 本文总结了行人室内导航的多传感器融合技术: (1) 从基于无线射频信号到非电信号分别分析比较单一传感器在室内定位中的优势与局限性; (2) 介绍了室内多传感器融合领域的定位手段, 包括多模式指纹融合、基于几何测距融合与基于 PDR 技术融合. 最后, 研究了室内定位技术应用于无缝导航的解决方案, 展示了室内外环境下无缝定位的挑战与前景. 本工作为后续实现高精度无缝定位研究提供参考与帮助.

**关键词:** 室内定位; 多源融合; 无缝导航; 研究进展

引用格式: 刘宇, 刘双, 韩雨辰, 朱平. 室内定位技术及其在无缝导航应用研究进展. 计算机系统应用, 2023, 32(1):29-40. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8909.html>

## Research Progress of Indoor Positioning Technology and Its Application in Seamless Navigation

LIU Yu<sup>1,2,3</sup>, LIU Shuang<sup>1,2,3</sup>, HAN Yu-Chen<sup>1,2,3</sup>, ZHU Ping<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>(School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

<sup>2</sup>(Key Laboratory of Aviation-aerospace-ground Cooperative Monitoring and Early Warning of Coal Mining-induced Disasters of Anhui Higher Education Institutes, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

<sup>3</sup>(Coal Industry Engineering Research Center of Mining Area Environmental and Disaster Cooperative Monitoring, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Nowadays, the global navigation satellite system (GNSS) has basically achieved real-time positioning with high precision in outdoor open environments. With the acceleration of urbanization, however, providing pedestrian navigation services for densely built-up sites disturbed by GNSS signals generates great demand, which has significantly promoted indoor positioning technology in recent years. Furthermore, as there is no single universal positioning method to realize the seamless transition between indoor and outdoor environments, seamless navigation technology introduces new hot spots and research topics to solve the “last-kilometer” problem in the navigation field. This study summarizes the multi-sensor fusion technology for indoor pedestrian navigation: (1) The advantages and limitations of a single sensor in indoor positioning are analyzed and compared from the perspective of radio frequency signals and non-electrical signals separately; (2) the positioning methods in the field of indoor multi-sensor fusion are introduced, including multimodal

① 基金项目: 国家自然科学基金 (41474026)

收稿时间: 2022-06-02; 修改时间: 2022-07-01; 采用时间: 2022-07-18; csa 在线出版时间: 2022-08-24

CNKI 网络首发时间: 2022-11-16

fingerprint fusion, geometric ranging fusion, and PDR-based fusion. Finally, the solution to the application of indoor positioning technology in seamless navigation is studied, and the challenges and prospects of seamless positioning in indoor and outdoor environments are presented. The research provides references and assistance to the follow-up research on high-precision seamless positioning.

**Key words:** indoor positioning; multi-source fusion; seamless navigation; research progress

目前,导航功能已成为人们在户外或室内提供基于位置的服务(LBS)的关键要素。随着物联网(IoT)、多传感器集成技术的快速发展,定位的需求与应用变得更加广泛,例如智慧城市的建设、自动驾驶技术的研发等<sup>[1]</sup>。尤其自 COVID-19 疫情防控以来,位置感知系统对相关接触人员的定位跟踪发挥了重要作用<sup>[2]</sup>。其中以 GPS、北斗等为代表的 GNSS 技术在近十年经历了突破性进展,文献 [3] 中综述了最先进的 GNSS 信号处理算法,并将提高 GNSS 接收机的精度、可用性与鲁棒性作为未来发展的关键技术驱动力。然而,当行人处于机场、展厅、商场等建筑结构复杂的城市中心或大型室内环境中,GNSS 卫星信号在非视距情况下造成的衰减现象使得其定位可靠性降低。为了弥补精度下降的缺陷,人们开发了不同的基于物联网移动终端的室内导航系统,为老人、小孩、视障人士等特殊群体的出行导航提供了安全保障<sup>[4,5]</sup>。此外,由于室内外环境变得复杂,将室外与室内区域相结合以实现高精度、高可用性、低成本的无缝导航仍然是一个巨大的挑战。

总的来说,无缝定位技术可概括为人们通过融合不同的定位手段,使得在活动范围的空间区域内,达到室内与室外环境的连续覆盖<sup>[6]</sup>。在 2004 年,文献 [7] 初期讨论了无缝导航需要解决的定位与映射问题,并具体分析将一种室内定位技术(如 WLAN、蓝牙等)辅助集成 GPS 实现无缝切换的可能性,同时为了解决在未知环境检测与利用定位系统的问题,提出创建一个光栅图像的局部区域地图,但并没有在实际应用中得到验证。2010 年,文献 [8] 利用 GPS 在室外具有稳定的定位性能,而超宽带(UWB)在室内信号较差的环境中具备高精度的特性,设计了 GPS 与 UWB 的组合定位系统,在医院环境中实现了患者跟踪的导航服务。随着智能手机与多传感器技术的发展,基于室内定位技术的无缝导航也有了許多新的研究成果,其分别在行人导航、自动驾驶与应急救援等许多新兴领域扮演着越

来越重要的角色<sup>[9,10]</sup>。

本文在多传感器融合室内定位技术的背景下,旨在通过最新文献分析无缝导航的研究进展。第 1 节先介绍了目前主流的室内定位技术,并对比其优势与局限性,然后分析室内融合定位的研究进展;第 2 节介绍了国内外学者研究室内外无缝导航的解决方案;最后探讨了该领域的前景与面临的挑战。这些阐述与总结为后续开展室内外无缝定位研究提供了有效的指导。

## 1 室内定位技术现状分析

### 1.1 主流室内定位技术

根据不同的物理特性或协议,许多专家学者对室内环境的定位技术进行了研究(见表 1<sup>[11-29]</sup>)。表 1 从无线信号到非电信号两个角度分析了不同定位技术的特点。本节还重点研究 6 种主流的室内定位系统,包括 WiFi、蓝牙、射频识别、超宽带、地磁与惯性传感器,并对各自的定位方法总结分析。

#### (1) WiFi

WiFi 定位模型包括几何测距与指纹匹配。前者通过接收信号强度(RSS)随距离衰减的模型来定位用户位置,但真实的室内环境复杂多变,衰减模型难以提供可靠的精度。而指纹匹配将定位分成两个阶段,先在离线阶段划分区域网格,将采集信号与对应位置形成映射关系的指纹库,再将测试实时信号与数据库匹配。目前,不少研究学者也利用信道状态信息(CSI)作为接收模块,获取更丰富的物理层信息,有效解决多径问题,使定位精度进一步提高<sup>[30]</sup>。然而,CSI 进行指纹识别的缺点在于普通的 WiFi 硬件难以直接提取 CSI 特征,数据采集需要支持 MIMO 天线的网络接口卡以及 Ubuntu 系统下的 CSI 工具等。

#### (2) 蓝牙

基于蓝牙的室内定位属于小范围无线通信技术。在传统蓝牙技术的发展基础上,苹果公司在 2013 年提出基于 iBeacon 的蓝牙 4.0 版本,该技术配备蓝牙低功耗

耗 (BLE) 与稳定的数据传输等特性. 蓝牙设备由于成本低廉与便于使用的优势促进了其推广和使用<sup>[31]</sup>, 其工作原理与 WiFi 指纹定位相似, 主要通过布设蓝牙信标节点, 利用唯一标识码与接收装置采集的 RSSI 信息获取其相对位置. 两者定位的区别在于基于智能手机 BLE 定位的电池功耗远低于 WiFi 技术, 而蓝牙定位的覆盖范围相对于 WiFi 小得多. 为了减少硬件安装的成本与工作量, 文献 [32] 中的作者使用蓝牙低功耗指纹进行室内环境的监测与识别, 并在相同环境中比较验证其性能高于 CSI 的 WiFi 定位系统, 提供了 97.97% 的平均准确率.

### (3) 射频识别

射频识别 (RFID) 起初应用于目标自动识别, 由于

其非接触式、低成本、高精度等优点, 该技术也成为获取物体位置的一种解决方案, 尤其是在室内定位领域<sup>[33]</sup>. RFID 信号定位由标签电池与阅读器组成, 根据标签类型, 基于射频的定位方式可分为主动与被动式<sup>[34]</sup>. 主动式有源标签依赖内部供电, 传输距离长, 但它们体积庞大、成本较高. 与主动式相比, 无源标签由阅读器发射电磁波信号自行供电, 虽然体积小、价格低, 但读取范围有限. 由于 RFID 特有的标签可解决激光传感器在对象识别中的奇异性问题, 而激光距离计算的高精度能弥补 RFID 定位结果. 因此, 文献 [35] 将 RFID 与激光测距仪的数据融合, 实现动态多目标识别和定位. 实验表明, 在有障碍物的环境中, 该方法可以达到 90.18% 的匹配率与 0.33 m 的定位精度.

表 1 不同室内定位信号特点

| 信号类型 | 技术名称   | 定位精度 (m)          | 抗干扰性 | 部署相对成本 | 典型系统                       | 应用场景  | 缺陷                            | 参考文献    |
|------|--------|-------------------|------|--------|----------------------------|-------|-------------------------------|---------|
| 无线信号 | WiFi   | $10^0$            | 较弱   | 低      | Radars, Herecast, Placelab | 矿井    | 覆盖区域有限; 多种复合通讯干扰 (阴影效应、多径效应等) | [11,12] |
|      | 蓝牙     | $10^0$            | 弱    | 低      | BIPS                       | 地下停车场 | 需大量部署 Beacon 设备、传输距离短         | [13,14] |
|      | 射频识别   | $10^{-1}-10^0$    | 弱    | 高      | Landmarc, WhereNet         | 智慧景区  | 部署大量标签、覆盖距离短                  | [15,16] |
|      | ZigBee | $10^{-1}-10^0$    | 弱    | 高      | WPAN                       | 机器人   | 易受环境影响、稳定性差                   | [17]    |
|      | UWB    | $10^{-2}-10^{-1}$ | 强    | 高      | Ubisense7000, Zebra        | 物流仓库  | 成本高、难以满足消费级需求                 | [18,19] |
| 非电信号 | 视觉     | $10^{-3}-10^{-1}$ | 弱    | 高      | Easy living                | 路标识别  | 成本高、算法复杂、稳定性差                 | [20,21] |
|      | 地磁     | $10^0$            | 弱    | 低      | IndoorAtlas                | 消费电子  | 采集工作量大、地磁指纹特征差异小              | [22-24] |
|      | 惯性     | $10^{-1}$         | 弱    | 低      | SINS                       | 陆地车载  | 漂移误差不断累计                      | [25]    |
|      | 超声波    | $10^{-2}$         | 强    | 高      | Active Bat, Cricket        | 物品追踪  | 易受环境湿度影响、传输距离短                | [26,27] |
|      | 红外线    | $10^{-2}-10^0$    | 弱    | 高      | Active Badge               | 车辆通信  | 易干扰、传输距离短                     | [28,29] |

### (4) 超宽带

超宽带 (UWB) 定位是一种脉冲无线电技术, 它接收和传输纳秒级及以下的极窄脉冲信号, 具有带宽大、抗干扰能力强等优点, 为室内导航提供了较高精度. UWB 定位常用方法分为到达时间 (TOA)<sup>[36]</sup>、到达时间差 (TDOA)<sup>[37]</sup> 与到达角 (AOA)<sup>[38]</sup>, 并且多种算法融合是该领域研究的热点. 当前, 在复杂的多房间室内环境中以低成本实现精确的 UWB 定位仍是一个挑战. 文献 [39] 针对部分视距覆盖条件下提出了指纹识别辅助的超宽带定位技术的解决方案. 首先通过三边测量

算法来确定目标位置, 而在所需视距测量值数量不足时, 使用指纹定位算法为三边测量提供附加距离. 实验结果表明, 在典型的真实环境下, 该方法可达到亚分米级的定位精度.

### (5) 磁传感器

地磁导航利用地球本身形成的全天候自然磁场. 与 WiFi、蓝牙等信号相比, 地磁测量值具有特征唯一性、时间稳定性、及对移动物体的抗干扰性等优点. 然而, 地磁导航也面临许多挑战, 包括在不同室内环境影响下的可辨别性较低, 同时三轴磁场强度受载体姿

态的变化也会影响其定位性能<sup>[40]</sup>.为了解决误差累积与全局定位的问题,文献[41]提出一种 ILoA 的三维地磁场增强矢量的定位方案.作者通过预设行走路径的起始点与终点,采用步行测量数据构建地磁地图,并分析了方向变化特征对航向估计的影响,实验证明了增强地磁矢量在不同路径场景下的有效性,并在下一步期望结合视觉姿态测量来提高系统的鲁棒性.

#### (6) 惯性传感器

行人航位推算 (PDR) 技术是基于智能手机内置的 MEMS 惯性传感器对行人运动状态的应用.利用

PDR 进行导航的方法框架如图 1 所示. MEMS 系统采集数据的传感器包括陀螺仪、加速度计与磁力计,分别通过步频检测、步长估计与姿态计算 3 个步骤估计用户的步数、步长和航向信息<sup>[42]</sup>.最后,根据采集信息与用户上一时刻位置,估计出用户当前位置.然而,由于惯性传感器内存在漂移误差,难以提供长时间的定位, PDR 常与其他定位方法结合,包括 GNSS<sup>[43]</sup>、WiFi<sup>[44]</sup>、蓝牙<sup>[45]</sup>与 UWB<sup>[46]</sup>等,来限制因时间推移累积的误差.基于 PDR 的传感器融合技术将在第 1.2 节中进行阐述.



图 1 行人航位推算定位方法框架

## 1.2 多源融合室内定位现状

基于不同传感器的室内定位技术各有其优缺点,许多研究学者重点提出了不同融合技术的解决方案,使定位的准确性、复杂性、覆盖率与成本之间达到平衡.常见的融合定位手段分成 3 类,分别是多模式指纹融合、基于几何测距融合与基于 PDR 技术融合<sup>[47]</sup>.

#### (1) 基于多指纹的融合定位

多模式指纹原理与 WiFi 指纹识别相似,但它混合了多个信号源,如蓝牙、地磁、图像等.定位过程具体分为两阶段:在离线阶段,将获取的多源信号特征与室内空间的特定位置建立指纹库;在在线阶段,测试指纹特征利用相邻位置指纹的相似性实现数据库混合指纹的匹配与位置估计. WiFi 指纹定位是目前常用的方法之一,但受多径衰落效应等影响, WiFi 定位效果不稳定.为减小 WiFi 指纹定位受环境波动影响,文献[48]融合 WiFi 信号与场景图像特征匹配以确定用户的位置.在离线阶段,将采集的 RSS 指纹与图像构建指纹数据库,并通过 AlexNet 神经网络模型划分定位区域,最后使用 WiFi 加权融合定位算法实时定位.结果表明,

多模态方法的定位结果具有更好的适应性与定位效果.类似的,文献[49]提出利用融合核主成分分析 (KPCA) 后的 WiFi 指纹与局部二值模式 (LBP) 提取的场景图像特征,建立光梯度提升机 (LightGBM) 回归定位模型.针对减少 WiFi 定位区域的参考点数量,文献[50]提出了基于蜂窝网络与 WiFi 的混合室内定位算法.作者利用蜂窝网络将测试点划分至不同子区域实现预定位,再使用自适应遗传算法优化 BP 神经网络完成最终定位.文献[51]充分利用 WiFi 网络的信号特征,将测量的 RSS 与 CSI 值构成指纹数据集,从数据集中提取四分位、峰度、偏度、熵等 9 种不同的统计指标,并利用 AdaBoost 算法将多个极限学习机弱分类器反复训练,最终获得强分类器,实验结果有效减少了数据的存储空间与计算复杂性.此外,融合地磁或蓝牙指纹也是一种流行的方式.磁场技术可获得较高的准确度,但它常需要 WiFi 定位弥补地磁初始位置误差.文献[52]进行了 WiFi 与地磁信号的融合定位,降低了 WiFi 失配率,优化了传统单一的 WiFi 与地磁定位精度.除上述组合外, WiFi 还可与其他机会信号(如射频或声音

特征等)视为指纹数据进行集成.多模式指纹定位的优点在于它比单一的传感器定位精度更高,且无需额外的硬件部署.然而,其缺点在于指纹的采集耗时且工作量大.未来基于深度学习算法处理多维指纹特征的融合定位技术是发展趋势之一.

## (2) 基于几何测距的融合定位

几何测距的融合通过集成不同类型的测量方法(如RSSI、TOA、TDOA与AOA)来提高定位精度.基于RSS测距成本较低,但精度也相对较低.AOA定位结果相比RSS更加准确,但所需设备的定位方法成本较高.TOA与TDOA对时间误差的敏感性更高,需要达到更精确的时间同步.总的来说,基于测距定位的主要挑战在于混合多种类型的硬件时如何降低部署和维护成本.目前文献常用的一些混合源定位技术包括TDOA-AOA<sup>[53,54]</sup>、TOA-TDOA<sup>[55]</sup>、RSS-AOA<sup>[56-59]</sup>与RSS-TOA<sup>[60,61]</sup>.结合AOA与TDOA的定位方法降低了接收设备的成本,同时保证一定的定位精度.文献[53]在混合TDOA/AOA定位优势基础上,提出扩展卡尔曼滤波器消除非视距误差,解决了室内环境下超宽带系统的定位问题.文献[54]研究将TDOA与AOA算法相结合,利用声源最优频率下的真实声信号改善TDOA计算结果.该方法监测出的声源位置误差约为2cm,角度误差约为0.74°.然而该研究只关注了单个声源,未来研究还应考虑运动声源产生的多普勒效应的影响.文献[55]对超宽带收发器以TOA与TDOA方法进行融合研究,结果显示两者融合能有效补偿信号功率、时钟漂移和硬件延迟的不确定性影响.文献[56]整合了RSSI与AOA,提出将两个测量值进行非平衡集成的方法(称为1AOA/nRSSI),使用最小二乘法与子空间法解决了一个AOA与 $N$ 个RSSI测量值的集成问题,相比于传统的无线传感器网络,简化其复杂性.文献[57]在度量RSSI与AOA的基础上,提出了基于单个锚节点和三角区域分割的算法,提高了目标节点的准确性.基于测距的典型算法有最小二乘<sup>[62]</sup>、最大似然估计<sup>[63]</sup>、泰勒级数<sup>[64]</sup>.文献[59]提出了一种基于可见光定位的LED接收信号强度与AOA混合的算法,通过加权最小二乘法定位远程发光二极管接收机的位置,仿真结果得出了0.5cm的平均定位误差.文献[60]提出了一种利用RSS-TOA混合测量方法,以解决非视距环境下目标节点的定位问题,并通过仿真实验在恶劣环境下验证了方法的鲁棒性与准确性.针对目前的研究趋向

两者定位方法的组合,文献[61]新提出尝试将4种测量方法混合分析来实现高精度定位,通过对TOA-TDOA-RSS-AOA混合模型的数值模拟,发现了两种以上的测量值融合结果可提供较好的估计精度,并对存在非视距误差条件下同样适用.

## (3) 基于PDR技术的融合定位

结合PDR与多种传感器定位的方法在文献中也得到广泛的应用.由于受惯导漂移和偏差的影响,融合不同技术可弥补PDR在连续长时间定位造成的累积误差,最终提高精度.融合PDR数据的算法主要包括卡尔曼滤波(KF)、扩展卡尔曼滤波(EKF)、粒子滤波(PF)、以及图优化等.在文献[46]中,作者提出一种改进的PDR/UWB系统,首先在PDR模块中使用双频Butterworth滤波器进行步态监测,结合步长和航向信息计算目标位置,并通过UWB系统周期性地校准航向角.最后,通过非视距评估函数动态调整噪声分布,利用方差卡尔曼滤波器在信息融合上提高定位精度.实验数据分别在视距与非视距环境下得出结果,表明该集成系统可显著提高定位的准确性.文献[65]中,作者先通过改进加权质心算法分别实现WiFi与蓝牙定位,再通过平均加权融合两者定位结果,最后使用无迹卡尔曼滤波(UKF)将融合结果与PDR进行多源集成,较好地提高了算法的稳定性.为了提高单点指纹的特异性与地磁定位精度,文献[66]提出结合PDR与地磁指纹的遗传粒子滤波(GPF)算法.实验结果表明,该方法的平均定位误差为1.72m,均方根误差为1.89m,相比传统粒子滤波与单一的PDR定位方法,定位精度与稳定性都得到有效提高.文献[67]提出一种误差椭圆约束下的磁匹配与PDR组合的定位方法.先利用PDR估计的位置将磁指纹数据库约束在圆形区域内,减少了磁场指纹库的维数,再使用加权 $K$ 近邻对磁匹配进行最终位置估计.文献[68]提出了基于BLE和PDR的紧耦合集成室内导航方法,作者以无线信号、行为地标和建筑结构等信息作为优化系统的约束条件,并使用一个房间和走廊场景对所提出的系统进行测试.通过将其性能与标准粒子滤波方法结果相比,表明了该算法平均定位精度和鲁棒性均有显著提高.文献[69]提出将PDR和室内环境的环境光结合起来进行室内定位的方法,利用环境光源作为绝对位置信标周期性地校正PDR的位置,避免PDR定位误差的累积.在多层室内定位方案中,基于PDR融合技术也在楼层定位

中发挥关键作用. 文献 [70] 将嵌入智能手机 PDR 与 FM 调频信号进行多特征楼层定位. 通过随机森林分类器对平面行走、上下楼 3 种状态进行特征分类, 通过检测行人运动状态变化来准确定位楼层. 该方法的地板定位精度达到 96.9%, 比仅使用单一加速度特征的方法提高了 38.4%.

## 2 室内外无缝导航技术进展

### 2.1 室内外环境检测机制

根据行人导航的空间分类, 可简单划分为室内或室外空间. 然而, 关于室内外过渡区域的路径范围, 当前文献中并没有严格标准的定义<sup>[71]</sup>. 在文献 [72] 中, 作者提出了一个空间定义框架, 将整个建筑环境分为室内、室外、半室内与半室外空间, 半室内与半室外空间的概念为进一步根据环境因素定制导航路径考虑了新的选择. 同时, 室内外切换判别准则的研究也为过渡空间的概念分析提供了依据. 例如, 室外自然光源与室内人造光源具有显著性质的差异; 手机从发射塔接收

到的信号强度由于受不同的视距路径影响而不同; 建筑物内部的磁场强度相比于室外环境的波动较大. 文献 [73] 提出了一种室内外检测器 (IODetector), 主要通过组合光传感器、蜂窝网基站信号与磁场强度在室内外环境中的变化, 来进行不同模式下环境的分类, 实现了在不同时间与环境下快速、准确的检测结果. 文献 [74] 设计了一种仅使用 WiFi 指纹聚类的室内外连续检测方法, 在 12 名实验人员的评估下获得 93% 的准确度, 其未来改进之处在于完善地下停车场等无线接入点未覆盖的区域以及减少设备的功耗. 文献 [75] 提出了一种利用 GPS 信号结合机器学习分类技术来识别室内/室外环境的方案. 作者首先假设没有遮挡障碍物时, GPS 信号以理想的信号强度接收. 当出现高楼等削弱甚至阻挡 GPS 信号情况时, GPS 信号发生变化, 再利用 SVM、KNN 等分类器对室内外两者特性进行识别. 该方法具有鲁棒性好、精度高、在室内外环境中移动平稳、易于实施等优点. 无缝导航实现框架如图 2 所示.

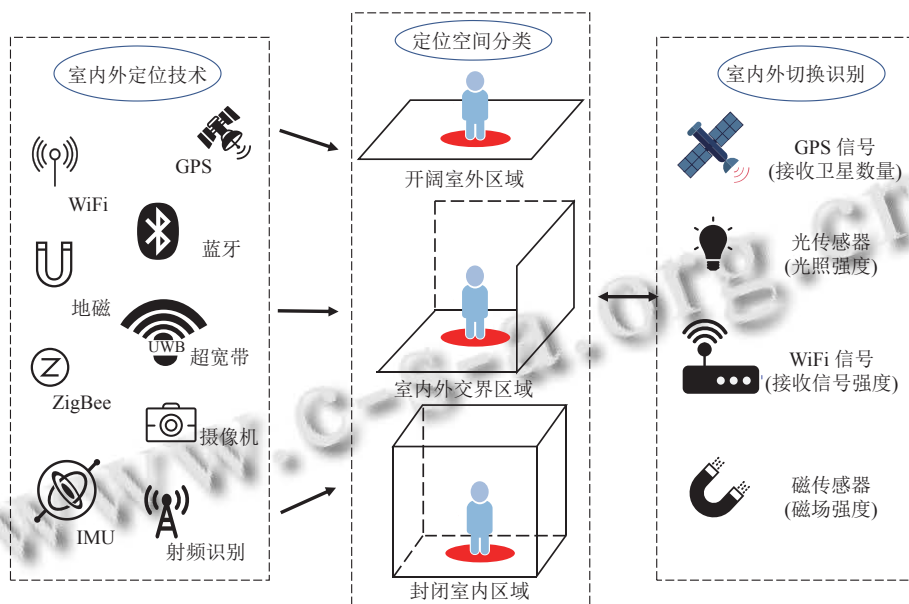


图 2 无缝导航实现框架

### 2.2 无缝导航技术研究进展

在无缝导航的技术融合层面, 国内外学者近几年进行了最新的相关实验与模拟.

第 1 类以 GNSS 与 WiFi 等指纹信号结合为主. 通过 WiFi 作为辅助技术, 引入其他高精度技术进而提高定位性能. 文献 [76] 利用增强粒子滤波器融合 GPS 与

WiFi 指纹, 提出了室内外群体感应定位系统 (SoiCP). 在观测模型中, 利用室外 GPS 定位更新粒子关联权重, 而基于 WiFi 指纹的位置估计被作为室内测量来更新相关权重. 同时作者在室内外切换检测机制方面, 除了光强度参数外, 分别设计了结合信噪比 (SNR)、空中探测卫星分布个数 (OSR) 与磁场 (MAG) 3 种探测器,

达到无缝连接效果。该系统在两个大型商场实验的平均准确率分别达到 2.8 m 与 2.6 m, 其性能优于 WiFi 指纹识别和 PDR-GPS 融合算法。为解决室内外无缝定位时过渡区精度低、坐标难以统一转换的问题, 文献 [77] 中结合 GPS、WiFi 信号与地磁指纹节点, 开发了室内外无缝定位导航系统。作者在户外开放区域使用百度地图软件, 用户只需将携带定位软件的智能手机置于所选定位区域, 打开定位软件即可获得当前位置信息, 解决了无缝定位系统面临的经纬度坐标转换问题。为了提供鲁棒的无缝定位性能, 文献 [78] 通过自适应多模型扩展卡尔曼滤波器 (AMEKF) 将 GNSS、WiFi 精细时间测量 (FTM) 与内置传感器 (SL-GWBS) 相组合, 并采用信号质量评估 (QE) 算法实时调整相应的融合权值。实验结果表明所提出 SL-GWBS 算法具有米级的精度。

第 2 类以基于 GNSS 结合 UWB 技术为主的解决方案。文献 [79] 分析了在信号接收困难的城市条件下联合处理 GNSS 与 UWB 信号参数测量的可能性, 并通过实验得出结论, 在确定相对坐标且均方根误差不超过 1 m 的城市地区, UWB 与 GNSS 信号可进行联合处理实现无缝导航。文献 [80] 构建了一种低成本多传感器平台, 将 UWB 集成到 GNSS-INS 系统, 以松耦合的体系结构及地理围栏触发器来执行室内外切换的状态估计, 并使用扩展卡尔曼滤波器 (EKF) 进行数据融合, 使定位解决方案持续提供。在考虑 5 种不同测量运动的情况下, 所提出的数据融合算法的总体水平精度与三维精度分别为 35 cm 与 45 cm。文献 [81] 提出基于紧耦合的 GNSS/UWB/INS/Map 集成方案的无缝导航系统, 并通过 UWB 技术有效解决室外环境卫星数量有限的问题, 提高了模糊度固定率, 具有相对较好的稳定性与精度。同时提出了一种改进的 AREKF 算法, 可以有效抵抗 GNSS 与 UWB 观测中的异常值与异常滤波状态的影响, 使滤波系统具有鲁棒性。尽管所提方案在自动驾驶无缝定位取得一些进展, 但最大误差仍接近 1 m。未来将考虑其他辅助传感器, 如激光雷达和摄像头, 以进一步增强定位稳定性。类似的, 文献 [82] 中, 作者在室内环境采用 UWB/INS 紧耦合一体化定位方式, 通过 UWB 发射单元获取的距离测量值, 定期修正 INS 误差, 达到厘米级精度。在室内外过渡区域, 提出了 GNSS/INS/UWB 紧耦合一体化定位系统, 保证定位精度连续性, 进一步提高系统可靠性。通过在高层建

筑中进行实验评估定位性能, 结果表明所提的集成定位系统可在室内与室外-室内过渡区域均提供无缝和准确的定位结果, 二维定位距离均方根 (DRMS) 值为 5.25 cm, 三维球面平均径向球面误差 (MRSE) 值为 10.18 cm。

第 3 类实现无缝定位服务的方式是基于惯性传感器的 PDR 技术组合 GNSS 技术。文献 [83] 提出了一种结合扩展卡尔曼滤波融合 GNSS 与 PDR 数据的解决方案, 同时为了更好地描述这两种不同特性的误差, 定义了平均累积航向误差 (MCHE) 指标来度量两种系统的航向误差, 实验结果在信号较弱或多路径环境下, 定位误差达到 0.59 m。为了提高 PDR 在真实性人条件下的可用性与稳定性, 文献 [84] 将脚踏式 PDR 与智能手机 GNSS 定位相结合, 提出一种自适应零速度检测方法检测步态, 并应用启发式漂移抑制 (HDR) 模型约束累积的航向误差与基于气压计的高度累积误差。测试结果表明, 该自适应检测器在不同行走速度和爬楼梯条件下性能良好, 增强 PDR 的累计距离误差仅为 0.23%。融合智能手机 GNSS 位置后, PDR 水平位置误差均方根值约为 1.34 m, 具有连续无缝的行人导航能力。文献 [85] 提出了一种基于载波相位差的局部搜索方法, 并借助 IMU-PDR 实现了更高的定位精度。此外, 作者引入了人工路标辅助的启发式漂移消除算法 (LAHDE), 在室外、室内走廊、室内房间等多场景下进行实验, 该算法都有效消除由 IMU-PDR 导出的漂移误差。文献 [86] 通过卡尔曼滤波与因子图优化 (FGO) 实现了一种智能手机 PDR/GNSS 融合定位。首先对 PDR 因子建模, 并用航迹推算算法对状态进行关联。再将 GNSS 位置建模约束每步状态, 将状态估计转换为一个非线性最小二乘问题, 利用 Georgia Tech 平滑与映射图优化库来实现优化。通过操场现场测试后结果表明, 与 GNSS 相比, FGO-PDR/GNSS 的水平位置误差均值降低了 40.8%, 有效地提高了智能手机的定位精度。

### 2.3 研究挑战与机遇

随着大量研究分别集中于对室内融合定位与室外卫星系统的改进, 无缝定位技术还不够成熟, 将 GNSS 系统融合室内不同定位技术、实现任何环境之间无缝导航的准确性与连续性依然面临许多问题。该领域在未来的工作中需要考虑以下几个方面。

(1) 多传感器组合定位是未来室内外精确定位发

展的重要方向之一,但在进行系统构建提高整体性能的同时,考虑如何降低设备成本,统一不同定位技术的坐标系统,解决不同硬件设备的异构性,从而能更好地投入于广泛的普适环境应用是主要的挑战。

(2) 当前无缝导航定位技术大多以融合 GPS 为热点,而随着我国自主研制的北斗卫星系统的不断成熟发展,联合 GPS/BDS 与室内高精度定位融合导航将发挥更大价值。尤其随着 5G 标准化的出现,北斗与 5G 综合定位能更好服务于无缝导航应用,并最终实现天地一体化高精度定位系统<sup>[87]</sup>。

(3) 基于指纹识别系统的无缝导航尽管已经相对成熟,但通常忽视了隐私与安全问题。已有文献虽然尝试解决用户位置信息与数据库之间的隐私问题,然而随着互联网安全威胁的不断增加,隐私保障依然成为研究学者应投入关注并应对的重大挑战<sup>[88]</sup>。

(4) 目前的无缝研究主要集中在卫星导航与室内传感器的集成,对多源弹性融合导航定位的研究相对较少。文献 [89] 提出了一种基于粒子滤波器的室内外多源弹性融合定位算法。该算法根据前一时刻的定位结果与载体运动状态剔除异常定位结果,并计算剩余多源传感器定位结果的质心,实现了多传感器同声传译的灵活融合定位。弹性 PNT 服务将解决多个传感器动态地跟踪,同时根据环境变化动态调整不同传感器测量结果权重,使融合导航效果更加稳定。

### 3 结语

综上所述,本文首先简要总结了不同的室内定位技术工作机制,并在此基础上阐述了室内多传感器融合的研究进展;接着对室内外组合无缝定位的现状进行分析,最后对无缝导航技术存在的挑战与机遇进行了展望。

#### 参考文献

- 1 Huang HS, Yao XA, Krisp JM, *et al.* Analytics of location-based big data for smart cities: Opportunities, challenges, and future directions. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 90: 101712. [doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2021.101712]
- 2 Schmidtke HR. Location-aware systems or location-based services: A survey with applications to COVID-19 contact tracking. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 2020, 6(4): 191–214. [doi: 10.1007/s40860-020-00111-4]
- 3 Egea-Roca D, Arizabaleta-Diez M, Pany T, *et al.* GNSs user technology: State-of-the-art and future trends. *IEEE Access*, 2022, 10: 39939–39968. [doi: 10.1109/ACCESS.2022.3165594]
- 4 Simões WCSS, Machado GS, Sales AMA, *et al.* A review of technologies and techniques for indoor navigation systems for the visually impaired. *Sensors*, 2020, 20(14): 3935. [doi: 10.3390/s20143935]
- 5 El-Sheimy N, Li Y. Indoor navigation: State of the art and future trends. *Satellite Navigation*, 2021, 2(1): 7. [doi: 10.1186/s43020-021-00041-3]
- 6 庄春华, 赵治华, 张益青, 等. 卫星导航定位技术综述. *导航定位学报*, 2014, 2(1): 34–40. [doi: 10.16547/j.cnki.10-1096.2014.01.010]
- 7 Virtanen A, Koskinen S. Towards seamless navigation. *Proceedings of Mobile Venue 2004*. Athens, 2004. 1–5.
- 8 Jiang LJ, Hoe LN, Loon LL. Integrated UWB and GPS location sensing system in hospital environment. *Proceedings of the 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Taichung: IEEE, 2010. 286–289.
- 9 Ostuni A. Seamless indoor-outdoor autonomous navigation for unmanned ground vehicles [Master's thesis]. Torino: Politecnico di Torino, 2022.
- 10 王坚, 刘纪平, 韩厚增, 等. 应急救援无缝定位关键技术研究. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(8): 1126–1136. [doi: 10.13203/j.whugis20200066]
- 11 Peng XS, Chen RZ, Yu KG, *et al.* A new WiFi dynamic selection of nearest neighbor localization algorithm based on RSS characteristic value extraction by hybrid filtering. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(3): 034003. [doi: 10.1088/1361-6501/abc510]
- 12 Zhang X, Sun W, Zheng J, *et al.* Towards floor identification and pinpointing position: A multistory localization model with WiFi fingerprint. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2022, 20(5): 1484–1499. [doi: 10.1007/s12555-020-0978-4]
- 13 Aranda FJ, Parralejo F, Álvarez FJ, *et al.* Performance analysis of fingerprinting indoor positioning methods with BLE. *Expert Systems with Applications*, 2022, 202: 117095. [doi: 10.1016/j.eswa.2022.117095]
- 14 Pattnaik SK, Samal SR, Bandopadhaya S, *et al.* Future wireless communication technology towards 6G IoT: An application-based analysis of IoT in real-time location monitoring of employees inside underground mines by using BLE. *Sensors*, 2022, 22(9): 3438. [doi: 10.3390/s22093438]
- 15 刘乃睿. 基于 RFID 移动定位的智慧景区中路径规划研究



- [硕士学位论文]. 大连: 辽宁师范大学, 2021.
- 16 Li Y, Wu HL, Sun YC. Improved adaptive genetic algorithm based RFID positioning. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2022, 33(2): 305–311. [doi: [10.23919/JSEE.2022.000031](https://doi.org/10.23919/JSEE.2022.000031)]
- 17 Latina MAE, Reyes A, Rollon EM. Optimization of RSSI-based ZigBee indoor localization system for determining distances between unknown nodes. *Proceedings of the 2022 1st International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies*. Trichy: IEEE, 2022. 1–6.
- 18 张伟. 基于 UWB 的定位方法的研究及在物流仓库中的应用 [硕士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2020.
- 19 Nosrati L, Fazel MS, Ghavami M. Improving indoor localization using mobile UWB sensor and deep neural networks. *IEEE Access*, 2022, 10: 20420–20431. [doi: [10.1109/ACCESS.2022.3151436](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3151436)]
- 20 Khan D, Cheng ZL, Uchiyama H, *et al.* Recent advances in vision-based indoor navigation: A systematic literature review. *Computers & Graphics*, 2022, 104: 24–45.
- 21 Deng Y, Tang S, Wang W, *et al.* A high precision visual localization method optimized by multi-features. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, XLVI-3/W1-2022: 37–43. [doi: [10.5194/isprs-archives-XLVI-3-W1-2022-37-2022](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-3-W1-2022-37-2022)]
- 22 Xu NH, Wang LH, Wu T, *et al.* An innovative PSO-ICCP matching algorithm for geomagnetic navigation. *Measurement*, 2022, 193: 110958. [doi: [10.1016/j.measurement.2022.110958](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110958)]
- 23 Shi LF, He R, Feng BL. Indoor localization scheme using magnetic map for smartphones. *Wireless Personal Communications*, 2022, 122(2): 1329–1347. [doi: [10.1007/s11277-021-08951-w](https://doi.org/10.1007/s11277-021-08951-w)]
- 24 Ouyang GL, Abed-Meraim K. Analysis of magnetic field measurements for indoor positioning. *Sensors*, 2022, 22(11): 4014. [doi: [10.3390/s22114014](https://doi.org/10.3390/s22114014)]
- 25 Yamagishi S, Jing L. Pedestrian dead reckoning with low-cost foot-mounted IMU sensor. *Micromachines*, 2022, 13(4): 610. [doi: [10.3390/mi13040610](https://doi.org/10.3390/mi13040610)]
- 26 张志忠. 基于超声波网络的室内定位系统研究 [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2021.
- 27 Kim K, Kim S, Choi A. Ultrasonic sound guide system with eyeglass device for the visually impaired. *Sensors*, 2022, 22(8): 3077. [doi: [10.3390/s22083077](https://doi.org/10.3390/s22083077)]
- 28 Zhang MQ, Wang XL, Dai TL, *et al.* Analysis and prediction of the influence of moving object trajectory in indoor environment based on infrared camera tracking. *Proceedings of the 2022 4th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology*. Tirunelveli: IEEE, 2022. 1447–1450.
- 29 Ngamakeur K, Yongchareon S, Yu J, *et al.* Deep CNN-LSTM network for indoor location estimation using analog signals of passive infrared sensors. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022. [doi: [10.1109/JIOT.2022.3183148](https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3183148)]
- 30 陈锐志, 叶锋. 基于 WiFi 信道状态信息的室内定位技术现状综述. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(12): 2064–2070. [doi: [10.13203/j.whugis20180176](https://doi.org/10.13203/j.whugis20180176)]
- 31 Lovón-Melgarejo J, Castillo-Cara M, Huarcaya-Canal O, *et al.* Comparative study of supervised learning and metaheuristic algorithms for the development of bluetooth-based indoor localization mechanisms. *IEEE Access*, 2019, 7: 26123–26135. [doi: [10.1109/ACCESS.2019.2899736](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2899736)]
- 32 Demrozi F, Turetta C, Chiarani F, *et al.* Estimating indoor occupancy through low-cost BLE devices. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(15): 17053–17063. [doi: [10.1109/JSEN.2021.3080632](https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3080632)]
- 33 Hatem E, Abou-Chakra S, Colin E, *et al.* Performance, accuracy and generalization capability of RFID tags' constellation for indoor localization. *Sensors*, 2020, 20(15): 4100. [doi: [10.3390/s20154100](https://doi.org/10.3390/s20154100)]
- 34 Li CL, Tanghe E, Plets D, *et al.* Phase-based variant maximum likelihood positioning for passive UHF-RFID tags. *Proceedings of the 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation*. Copenhagen: IEEE, 2020. 1–5.
- 35 Fu WP, Liu R, Wang H, *et al.* A method of multiple dynamic objects identification and localization based on laser and RFID. *Sensors*, 2020, 20(14): 3948. [doi: [10.3390/s20143948](https://doi.org/10.3390/s20143948)]
- 36 Plakhtii V, Dumin O, Pryshchenko O, *et al.* Time of arrival independent positioning system based on UWB technologies. *Proceedings of the 2022 16th IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. Lviv-Slavske: IEEE, 2022. 301–305.
- 37 Pan DW, Yu YH. Indoor position system based on improved TDOA algorithm. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 585: 012075. [doi: [10.1088/1757-899X/585/1/012075](https://doi.org/10.1088/1757-899X/585/1/012075)]
- 38 Monfared S, Copa EIP, de Doncker P, *et al.* AoA-based iterative positioning of IoT sensors with anchor selection in NLOS environments. *IEEE Transactions on Vehicular*

- Technology, 2021, 70(6): 6211–6216. [doi: [10.1109/TVT.2021.3077462](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3077462)]
- 39 Djosic S, Stojanovic I, Jovanovic M, *et al.* Fingerprinting-assisted UWB-based localization technique for complex indoor environments. *Expert Systems with Applications*, 2021, 167: 114188. [doi: [10.1016/j.eswa.2020.114188](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114188)]
- 40 Ouyang GL, Abed-Meraim K. A survey of magnetic-field-based indoor localization. *Electronics*, 2022, 11(6): 864. [doi: [10.3390/electronics11060864](https://doi.org/10.3390/electronics11060864)]
- 41 Lee S, Chae S, Han D. ILoA: Indoor localization using augmented vector of geomagnetic field. *IEEE Access*, 2020, 8: 184242–184255. [doi: [10.1109/ACCESS.2020.3029281](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029281)]
- 42 Hou XY, Bergmann J. Pedestrian dead reckoning with wearable sensors: A systematic review. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(1): 143–152. [doi: [10.1109/JSEN.2020.3014955](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3014955)]
- 43 Basso M, Martinelli A, Morosi S, *et al.* A real-time GNSS/PDR navigation system for mobile devices. *Remote Sensing*, 2021, 13(8): 1567. [doi: [10.3390/rs13081567](https://doi.org/10.3390/rs13081567)]
- 44 Zhang MY, Jia J, Chen J, *et al.* Indoor localization fusing WiFi with smartphone inertial sensors using LSTM networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(17): 13608–13623. [doi: [10.1109/JIOT.2021.3067515](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3067515)]
- 45 Dinh TMT, Duong NS, Nguyen QT. Developing a novel real-time indoor positioning system based on BLE beacons and smartphone sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(20): 23055–23068. [doi: [10.1109/JSEN.2021.3106019](https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3106019)]
- 46 Guo SL, Zhang YT, Gui XZ, *et al.* An improved PDR/UWB integrated system for indoor navigation applications. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(14): 8046–8061. [doi: [10.1109/JSEN.2020.2981635](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2981635)]
- 47 Gu FQ, Hu XK, Ramezani M, *et al.* Indoor localization improved by spatial context—A survey. *ACM Computing Surveys*, 2020, 52(3): 64.
- 48 Wang ZS, Sokliep P, Xu CP, *et al.* Indoor position algorithm based on the fusion of WiFi and image. *Proceedings of the 2019 11th International Conference on Advanced Computational Intelligence*. Guilin: IEEE, 2019. 212–216.
- 49 Zhang HQ, Li YQ. LightGBM indoor positioning method based on merged WiFi and image fingerprints. *Sensors*, 2021, 21(11): 3662. [doi: [10.3390/s21113662](https://doi.org/10.3390/s21113662)]
- 50 Guo T, Chai ML, Xiao JX, *et al.* A hybrid indoor positioning algorithm for cellular and WiFi networks. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022, 47(3): 2909–2923. [doi: [10.1007/s13369-021-05925-9](https://doi.org/10.1007/s13369-021-05925-9)]
- 51 Yan J, Ma CH, Kang B, *et al.* Extreme learning machine and AdaBoost-based localization using CSI and RSSI. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(6): 1906–1910. [doi: [10.1109/LCOMM.2021.3058420](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3058420)]
- 52 Pan HB, Xiang Y, Xiong J, *et al.* Application of a WiFi/Geomagnetic combined positioning method in a single access point environment. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 2021: 9717629.
- 53 Jiang HY, Zhang K, Shen C, *et al.* Hybrid location algorithm of TDOA/AOA based on extended Kalman filter. *Proceedings of the 2021 21st IEEE International Conference on Communication Technology*. Tianjin: IEEE, 2021. 413–417.
- 54 Chung MA, Chou HC, Lin CW. Sound localization based on acoustic source using multiple microphone array in an indoor environment. *Electronics*, 2022, 11(6): 890. [doi: [10.3390/electronics11060890](https://doi.org/10.3390/electronics11060890)]
- 55 Sidorenko J, Schatz V, Scherer-Negenborn N, *et al.* Fusion of time of arrival and time difference of arrival for ultra-wideband indoor localization. *arXiv:1903.00901*, 2019.
- 56 Le AT, Tran LC, Huang XJ, *et al.* Unbalanced hybrid AOA/RSSI localization for simplified wireless sensor networks. *Sensors*, 2020, 20(14): 3838. [doi: [10.3390/s20143838](https://doi.org/10.3390/s20143838)]
- 57 Kumar MK, Prasad VK. TASLT: Triangular area segmentation based localization technique for wireless sensor networks using AoA and RSSI measures—A new approach. *Proceedings of the 2021 18th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Smart Systems*. Denver: IEEE, 2021. 585–590.
- 58 Mosleh MF, Zaal RM, Abbas EI. Hybrid localization algorithm based on received signal strength and angle-of-arrival for indoor location estimation. *TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control*, 2021, 19(2): 454–462. [doi: [10.12928/telkomnika.v19i2.18324](https://doi.org/10.12928/telkomnika.v19i2.18324)]
- 59 Othman R, Gaafar A, Muaaz L, *et al.* A hybrid RSS+AOA indoor positioning algorithm based on visible light communication. *Proceedings of 2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering*. Khartoum: IEEE, 2021. 1–5.
- 60 Panwar K, Katwe M, Babu P, *et al.* A majorization-minimization algorithm for hybrid TOA-RSS based localization in NLOS environment. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(5): 1017–1021. [doi: [10.1109/LCOMM.2022.3155685](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3155685)]
- 61 Panwar K, Babu P. Majorization-minimization based hybrid

- localization method for high precision localization in wireless sensor networks. arXiv:2205.03881, 2022.
- 62 Kang SY, Kim TH, Chung WZ. Hybrid RSS/AOA localization using approximated weighted least square in wireless sensor networks. *Sensors*, 2020, 20(4): 1159. [doi: [10.3390/s20041159](https://doi.org/10.3390/s20041159)]
- 63 Liu YY, Lian BW, Tang CK, *et al.* Maximum likelihood principle based adaptive extended Kalman filter for tightly coupled INS/UWB localization system. *Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing*. Xi'an: IEEE, 2021. 1–6.
- 64 Wang X, Huang ZH, Zheng FQ, *et al.* The research of indoor three-dimensional positioning algorithm based on ultra-wideband technology. *Proceedings of the 2020 39th Chinese Control Conference*. Shenyang: IEEE, 2020. 5144–5149.
- 65 Zhu YJ, Luo XN, Guan SW, *et al.* Indoor positioning method based on WiFi/bluetooth and PDR fusion positioning. *Proceedings of the 2021 13th International Conference on Advanced Computational Intelligence*. Wanzhou: IEEE, 2021. 233–238.
- 66 Sun M, Wang YJ, Xu SL, *et al.* Indoor positioning integrating PDR/geomagnetic positioning based on the genetic-particle filter. *Applied Sciences*, 2020, 10(2): 668. [doi: [10.3390/app10020668](https://doi.org/10.3390/app10020668)]
- 67 Shao KF, Li ZK, Wang ZY, *et al.* Magnetic matching/PDR Combined positioning method under the constraint of error ellipse. In: Yang CF, Xie J, eds. *Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC 2022)*. Singapore: Springer, 2022. 352–362.
- 68 Wang X, Zhuang Y, Zhang Z, *et al.* Tightly-coupled integration of BLE and PDR using graph optimization for indoor pedestrian navigation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, XLVI-3/W1-2022: 191–196. [doi: [10.5194/isprs-archives-XLVI-3-W1-2022-191-2022](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-3-W1-2022-191-2022)]
- 69 Tao XX, Shi TQ, Ma X, *et al.* An improved indoor pedestrian dead reckoning algorithm using ambient light and sensors. *Multimedia Tools and Applications*, 2022. [doi: [10.1007/s11042-022-13072-y](https://doi.org/10.1007/s11042-022-13072-y)]
- 70 Cong L, Tian JN, Qin HL. A practical floor localization algorithm based on multifeature motion mode recognition utilizing FM radio signals and inertial sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(15): 8806–8819. [doi: [10.1109/JSEN.2020.2985934](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2985934)]
- 71 Zlatanova S, Yan JJ, Wang YJ, *et al.* Spaces in spatial science and urban applications—State of the art review. *IS-PRS International Journal of Geo-information*, 2020, 9(1): 58. [doi: [10.3390/ijgi9010058](https://doi.org/10.3390/ijgi9010058)]
- 72 Yan JJ, Diakit  AA, Zlatanova S. A generic space definition framework to support seamless indoor/outdoor navigation systems. *Transactions in GIS*, 2019, 23(6): 1273–1295. [doi: [10.1111/tgis.12574](https://doi.org/10.1111/tgis.12574)]
- 73 Li M, Zhou PF, Zheng YQ, *et al.* IODetector: A generic service for indoor/outdoor detection. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2015, 11(2): 28.
- 74 Shtar G, Shapira B, Rokach L. Clustering WiFi fingerprints for indoor-outdoor detection. *Wireless Networks*, 2019, 25(3): 1341–1359. [doi: [10.1007/s11276-018-1753-9](https://doi.org/10.1007/s11276-018-1753-9)]
- 75 Bui V, Le NT, Vu TL, *et al.* GPS-based indoor/outdoor detection scheme using machine learning techniques. *Applied Sciences*, 2020, 10(2): 500. [doi: [10.3390/app10020500](https://doi.org/10.3390/app10020500)]
- 76 Li Z, Zhao XH, Hu FY, *et al.* SoICP: A seamless outdoor-indoor crowdsensing positioning system. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(5): 8626–8644. [doi: [10.1109/JIOT.2019.2921561](https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2921561)]
- 77 Qiu KY, Chen RZ, Huang H. A practical indoor and outdoor seamless navigation system based on electronic map and geomagnetism. *Proceedings of the 2021 13th International Conference on Machine Learning and Computing*. Shenzhen: ACM, 2021. 588–594.
- 78 Yu Y, Chen RZ, Chen L, *et al.* A robust seamless localization framework based on WiFi FTM/GNSS and built-in sensors. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(7): 2226–2230. [doi: [10.1109/LCOMM.2021.3071412](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3071412)]
- 79 Pudlovskiy V, Petukhov N, Chugunov A, *et al.* Joint processing of GNSS and UWB signals for seamless navigation in urban environments. *Proceedings of the 2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. Saint Petersburg: IEEE, 2022. 1–4. [doi: [10.23919/ICINS51784.2022.9815417](https://doi.org/10.23919/ICINS51784.2022.9815417)]
- 80 Di Pietra V, Dabove P, Piras M. Loosely coupled GNSS and UWB with INS integration for indoor/outdoor pedestrian navigation. *Sensors*, 2020, 20(21): 6292. [doi: [10.3390/s20216292](https://doi.org/10.3390/s20216292)]
- 81 Wang CQ, Xu AG, Sui X, *et al.* A seamless navigation system and applications for autonomous vehicles using a tightly coupled GNSS/UWB/INS/Map integration scheme. *Remote Sensing*, 2022, 14(1): 27.
- 82 Jiang W, Cao ZJ, Cai BG, *et al.* Indoor and outdoor seamless positioning method using UWB enhanced multi-sensor tightly-coupled integration. *IEEE Transactions on Vehicular*

- Technology, 2021, 70(10): 10633–10645. [doi: [10.1109/TVT.2021.3110325](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3110325)]
- 83 Rehman A, Shahid H, Afzal MA, *et al.* Accurate and direct GNSS/PDR integration using extended Kalman filter for pedestrian smartphone navigation. *Gyroscopy and Navigation*, 2020, 11(2): 124–137. [doi: [10.1134/S2075108720020054](https://doi.org/10.1134/S2075108720020054)]
- 84 Tao XL, Zhu F, Hu X, *et al.* An enhanced foot-mounted PDR method with adaptive ZUPT and multi-sensors fusion for seamless pedestrian navigation. *GPS Solutions*, 2022, 26(1): 13. [doi: [10.1007/s10291-021-01196-x](https://doi.org/10.1007/s10291-021-01196-x)]
- 85 Zhu RH, Wang YJ, Cao HJ, *et al.* RTK/Pseudolite/LAHDE/IMU-PDR integrated pedestrian navigation system for urban and indoor environments. *Sensors*, 2020, 20(6): 1791. [doi: [10.3390/s20061791](https://doi.org/10.3390/s20061791)]
- 86 Jiang CH, Chen YW, Chen C, *et al.* Implementation and performance analysis of the PDR/GNSS integration on a smartphone. *GPS Solutions*, 2022, 26(3): 81. [doi: [10.1007/s10291-022-01260-0](https://doi.org/10.1007/s10291-022-01260-0)]
- 87 Li G, Yu X, Lu WB. Space-earth integrated high-precision positioning system based on 5G and Beidou navigation satellite system. *Proceedings of the 2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering*. Hangzhou: IEEE, 2022. 649–653.
- 88 van der Beets C, Nieminen R, Schneider T. FAPRIL: Towards faster privacy-preserving fingerprint-based localization. <https://eprint.iacr.org/2022/564>. [2022-05-10].
- 89 Fan GW, Sheng CZ, Yu BG, *et al.* An indoor and outdoor multi-source elastic fusion navigation and positioning algorithm based on particle filters. *Future Internet*, 2022, 14(6): 169. [doi: [10.3390/fi14060169](https://doi.org/10.3390/fi14060169)]

(校对责编: 孙君艳)