

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.01.003

城市建筑室内外无缝应急救援定位技术

李增科^{1,2}, 王潜心^{1,2}, 邵克凡^{1,2}, 刘振彬^{1,2}, 郭强^{1,2}

(1. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116;
2. 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:应急救援定位技术的发展关系到救援人员和受害人员的生命安全。首先,对应急定位与普适定位进行了对比,总结了应急定位的主要特征,阐述了应急定位系统的精度、连续性等技术指标。之后,分析了不同传感器在应急场景下的可用性,对相应传感器在应急定位领域中的融合和应用进行了综述。最后,围绕坐标基准、知识图谱、多源协同、智能控制四项关键技术架构室内外无缝应急救援定位系统,总结了构建流程。其中,坐标基准将室内和室外、相对定位和绝对定位统一,而知识图谱综合权威发布信息和灾害场景信息进行决策,不仅可以辅助多源融合中传感器的选择、传感器无缝切换以及故障传感器隔离,还能协调智能控制中救援设备的调度、救援设备之间和救援设备与人员之间的协同定位。

关键词:应急定位;多源融合;无缝定位;自主定位;无线定位

中图分类号:P227.9;P228.9 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2023)01-0027-13

Urban Building Indoor and Outdoor Seamless Emergency Rescue Positioning Technology

LI Zengke^{1,2}, WANG Qianxin^{1,2}, SHAO Kefan^{1,2}, LIU Zhenbin^{1,2}, GUO Qiang^{1,2}

(1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: The development of emergency rescue positioning technology is essential to ensuring the life safety of rescue workers and victims. Firstly, the emergency positioning and the universal positioning are compared, and the main characteristics of the former are summarized, and the technical indexes such as the accuracy and continuity are expounded. Then, the availability of different sensors in emergency scenarios is analyzed, and the fusion and application of available sensors are summarized. Finally, the construction of indoor and outdoor seamless emergency positioning system is concluded concerning on four key technologies of coordinate reference, knowledge graph, multi-source fusion and intelligent control. Among them, coordinate reference unifies indoor and outdoor, relative and absolute positioning, while knowledge map synthesizes authoritative information and disaster scene information to make decisions. Knowledge graph can not only assist sensor selection, seamless sensor switching and fault sensor isolation in multi-source fusion, but also help the dispatching of rescue equipment, and cooperative localization among many pieces of rescue equipment and between rescue equipment and personnel in intelligent control.

收稿日期:2022-12-03;**修订日期:**2022-12-31

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42274020)

作者简介:李增科(1988-),男,副教授,主要从事多源融合、室内外无缝和应急定位方面的研究。

通信作者:王潜心(1980-),男,教授,主要从事GNSS精密定位方面的研究。

Key words: Emergency positioning; Multi-sensor fusion; Seamless positioning; Autonomous positioning; Wireless positioning

0 引言

应急定位是面对地震、火灾、坍塌等突发事件时实施应急管理与救援的必要环节。突发事件对人民的生命和财产安全造成了极大的威胁,仅2021年全国消防救援队伍共接报火灾74.8万起,死亡1987人,受伤2225人,直接财产损失67.5亿元^[1]。“十四五”规划纲要在“完善国家应急管理体系”中强调提高防灾减灾救灾能力、增强全灾种救援能力。抗灾救灾和应急保障对于精确位置的获取有强烈的需求,应急定位在公共安全管理中具有不可替代的作用。

在城市中,以城市峡谷为代表的室外全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)信号被遮挡,室内不规则结构的分布使得无线定位非视距(Non-Line of Sight, NLOS)现象严重。复杂建筑环境定位面临更严苛的信号接收环境,多径效应、NLOS现象频发,绝对定位如超宽带(Ultra Wide Band, UWB)、蓝牙等需要考虑精度与成本的平衡,自主定位如惯性导航(Inertial Navigation)则面临误差累积且得不到校正的问题。单一定位源难以满足城市复杂建筑环境定位连续性和可靠性的要求,往往需要多源传感器实现融合定位,如何实现广域、低成本、高精度及高可靠的无缝定位也是室内外定位的研究热点之一。

应急事件可能导致提前布设的无线定位基站失效,应急救援定位系统的可用性受到挑战。在应急场景下构建类GNSS性质的定位信息,确保定位结果的连续性和长时间精确性是高可靠应急定位的关键。完整的应急救援定位系统应包含坐标基准、知识图谱、多源融合以及智能控制四项关键技术。坐标基准为应急场景提供统一的时空基准,知识图谱综合环境感知和权威信息辅助多源融合和智能控制,多源融合实现传感器无缝切换和故障隔离,智能控制承担设备与人员调度及其协同定位。

本文从城市复杂建筑环境室内外无缝应急定位的需求以及存在的问题出发,对该领域所涉及的相关技术和方法进行了总结。第1章分析了应急定位的特点,并和普适定位进行了对比;第2章对定位技术进行了综述,围绕GNSS、视觉、激光雷达、无线定位所涉及技术进行了阐述;第3章分析了应急救

援定位系统所涉及的关键技术及发展趋势,并举例了一种应急定位系统的搭建方案;第4章进行了总结。希望通过对最新应急定位技术的阐述,推动灾害场景下应急救援定位技术发展。

1 灾害场景定位需求

应急救援定位系统的部署速度、精度与可靠性直接影响应急人员与受害人员的生命安全,因此,应急定位应具有以下特征:部署速度快、定位精度高、实时处理以及救援区域全覆盖,如图1所示。图2所示为城市建筑物应急定位场景示例,以GNSS信号能否应用于定位可分为遮蔽区域、非遮蔽区域以及过渡区域,常见于体育馆、博物馆等大型建筑,火苗代表应急情况所在位置。应急情况发生时,应急人员需要从室外出发,进入室内进行救援。下文围绕此类应急定位场景进行展开。



图1 应急定位特点

Fig. 1 Emergency positioning features

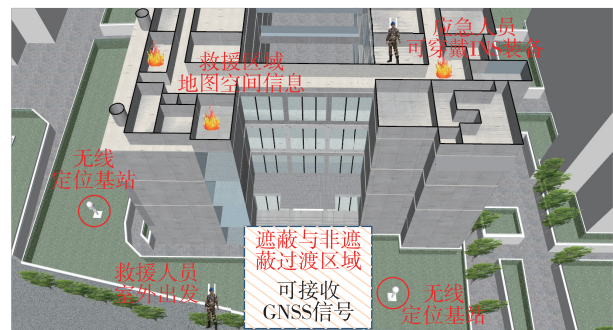


图2 应急定位示意图

Fig. 2 Schematic of emergency positioning

1.1 部署速度快

应急事件发生时,预先安装的定位、通信设备可能发生位移,甚至由于断电、跌落、损毁等原因,需要

重新部署设备服务应急定位,如图 2 中的无线定位基站。应急救援定位系统布设得越快,展开人员搜救越快,也越有利于保护受害人员的安全。一般来说,应急救援定位系统的整体布设时间应优于 30min。

1.2 定位精度高

相较于普适定位,应急定位更关注三维位置精度,尤其对于高层大型建筑。《住宅设计规范》中明确指出,局部净高不应低于 2.10m^[2]。为了区分室内住宅楼层,垂直定位绝对精度应优于 1m,整体定位绝对精度 3~5m。当大型建筑物层高增加时,垂直定位精度可适当减小,整体定位绝对精度仍应维持在 3~5m。此外,定位系统应提供连续可用的定位结果,可用性要求优于 99.73%。

1.3 实时处理

在应急事件处理过程中,由于通信限制问题,一般不能采用上传服务器等后处理方式进行定位。应急定位对于时间响应要求较高,要求定位系统做到实时或准实时处理。为了更好地保障相关人员的生命安全,应急救援定位系统时间连续性应优于 10ms。

1.4 救援区域全覆盖

在应急事件中,提前布设的室内外统一坐标基准可能遭到破坏,无法满足三维定位绝对精度的要求。在设备部署的同时建构由室外到室内、救援区域全覆盖的统一坐标基准,是实现灾害区域全域绝

对定位和高精度定位的基础。

此外,由于救援人员可能需要进入火灾现场等进行搜救,救援人员所配戴的应急定位装备还应具有防火防爆的能力。考虑到救援人员可能需要长时间工作,应急定位设备连续运行时间应达到 30min 以上,并且携带救援设备的质量和体积也不应影响救援人员的运动能力。

2 应急救援定位技术

目前定位技术众多,包括 GNSS、惯性传感器、无线保真(Wireless Fidelity, WiFi)、蓝牙、超声波、UWB、视觉、激光雷达和人工磁场,表 1 中对上述定位技术的主要特征进行了对比。由于目前尚未统一规范化室内地图的生产,加之地图匹配多作为辅助信息,所以本文并未单独分析地图匹配方法。由于 WiFi、超声波定位容易受到多径效应以及 NLOS 的影响,因此其难以在应急场景下进行连续、可靠定位。本文主要围绕 GNSS、视觉、激光雷达和无线定位展开综述,其中无线定位包含蓝牙、UWB 和人工磁场定位。其中,人工磁场定位精度高且信号具有穿透性,但是其覆盖范围小,仅适合应急定位等特殊应用场景。高精度惯性器件成本高昂,应急救援系统多采用相对低成本的惯性器件,但误差随时间累积。惯性器件在应急场景中多融合使用,且不可或缺,将在以下章节中穿插惯性定位及其融合的综述。

表 1 定位技术特征对比

Tab. 1 Comparison of positioning technology features

定位技术	定位精度	覆盖范围	优点	缺点
GNSS	亚米级	全球	部署速度快,技术成熟,全天候	遮蔽环境定位精度下降
惯性传感器	时间和距离有关	广域	自主定位,不依赖外界信号	需标定,存在误差累积
WiFi	亚米级	50m	易部署,易扩展	定位精度依赖于节点密度
蓝牙	亚米级	30m	成本低,适用范围广	传播距离短,稳定性差
超声波	厘米级	5m	定位精度高,抗干扰能力强	要求通视
UWB	厘米级	100m	抗多径干扰,通信容量大	定位精度依赖于精准的钟同步,NLOS 精度低
视觉	亚米级	广域	自主定位,定位精度高	易受光照条件影响,定位精度受载体移动速度影响
激光雷达	亚米级	广域	自主定位,定位精度高	受雨雾等影响,定位精度依赖于环境特征
人工磁场	厘米级	5m	定位精度高,穿透性强	覆盖范围小

2.1 GNSS

GNSS 服务于室外合作环境,提供高精度、高可靠、全天候的位置服务,并且作为室内室外绝对时空基准统一的主流技术,在应急定位系统中具有不可或缺的作用。合作环境主要指能够连续接收多颗卫星信号,且不存在 NLOS 或较强的多径使得定

位结果偏移的环境。GNSS 包括实时动态(Real-Time Kinematic, RTK)、网络 RTK、精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)以及 PPP-RTK 等多种高精度定位技术。祝会忠等^[3]提出了针对灾害应急环境下的基于智能终端的长距离北斗增强定位方法,集成北斗导航系统与通信网络获取空间位

置,实现高精度以及高实时性定位。

GNSS 在面对建筑物遮挡时,难以独立完成坐标基准构建的任务。Jiang W. 等^[4]提出了 GNSS/UWB 融合定位,增强了观测结构的几何强度,有利于室内外坐标基准的统一。E. Foxlin^[5]利用零速修正算法,将脚底触地时惯导解算的速度作为速度误差,进行状态误差反馈校正,在室内救援中得到应用。Zhu N. 等^[6]利用足绑式惯导和零速修正与 GNSS 进行松组合,构建了不需要额外设备的室内外无缝定位系统,适用于车内、室外以及室内三种场景,对应于救援人员从救援车辆内出发,经过室外到达室内。Wei J. 等^[7]为保证救援车辆在各种场景中的无缝定位,融合 GNSS/INS/里程计/地图匹配,通过里程计融合地图匹配修正 INS 误差,缓解车辆通过峡谷、隧道时卫星信号长时间中断导致定位精度不可靠的问题。图 3 中总结了常见的组合方法,并分析了 GNSS 在应急定位系统中的应用。

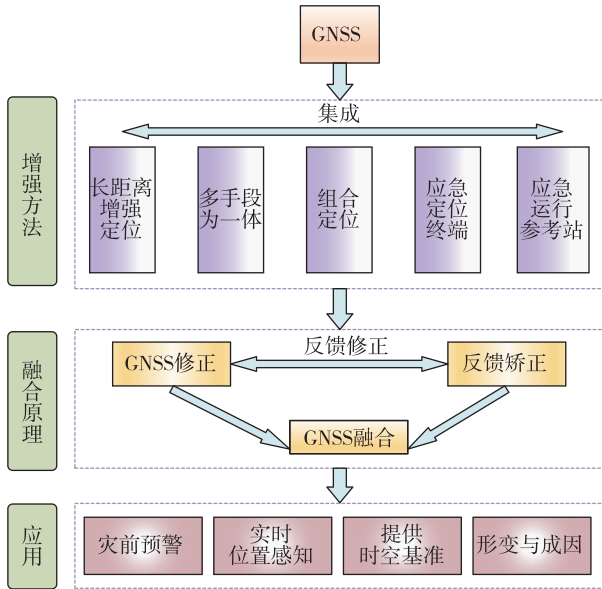


图 3 应急定位 GNSS 精度增强方法及其应用

Fig. 3 GNSS positioning precision enhancement method and its application for emergency positioning

2.2 视觉

视觉定位通过图像指纹库和视觉里程计(Visual Odometry, VO)进行定位。指纹库方法不存在累积误差,但需要进行大量的建库工作,在灾害环境下较难发挥优势^[8-9]。VO 通过求解相邻帧图像的本质矩阵或基础矩阵估计位姿变换进行相对定位,但存在累积误差。为了抑制累积误差,采用了回环模块,实现同步定位与构图(Simultaneous Localization and Map-

ping, SLAM)。VO 也可以理解为视觉 SLAM(Visual SLAM, VSLAM)的前端模块。VO 与 VSLAM 均可以在室外借助 GNSS 信号将相对定位转换为绝对定位。由于视觉在应急定位时不需要布设额外设备,应用灵活度高,布设速度快,可以实时构建应急场景地图。

但是 VSLAM 对环境纹理等信息依赖性过强,可以利用惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)辅助 VSLAM,根据有无回环检测分为 VISLAM(Visual Inertial SLAM)或者 VIO(Visual Inertial Odometry)。视觉与 IMU 融合方式有滤波与图优化两种,由于 VISLAM 是一个高度非线性的系统,同等算力情况下图优化比滤波能取得更好的精度,因此基于图优化的框架开源了一大批 SLAM 方案,以 OKVIS、VINS-Mono 及 VINS-Fusion 为代表。限于篇幅,表 2 总结了当前具有代表性的一些 VO、VIO 及 VSLAM 方案,并列举了采用的传感器及其特点,图 4 总结了成熟方案 ORB-SLAM2 的流程。

受到应急场景下烟雾、灰尘及光线的影响,极易使视觉定位精度下降,在具有上述特征的应急场景下,不宜利用视觉进行定位。但是,视觉传感器可以进行环境感知和地图构建,如何减小上述不利因素对视觉定位的影响,将是视觉定位广泛应用于应急定位的关键问题。

表 2 VO、VIO、VSLAM 方案代表

Tab. 2 Representatives of VO, VIO and VSLAM

方案	时间	传感器形式	特点
MonoSLAM ^[10]	2007 年	单目	首个实时视觉 SLAM, EKF (Extended Kalman Filter)+稀疏角点
PTAM ^[11]	2007 年	单目	关键帧+优化法,首次以优化为后端
SVO ^[12]	2014 年	单目	稀疏直接法,仅 VO
LSD-SLAM ^[13]	2014 年	单目为主	直接法+半稠密地图
ORB-SLAM2 ^[14]	2015 年	单目为主	ORB 特征点+多线程结构
MSCKF ^[15]	2007 年	视觉+IMU	基于 EKF 的 VIO
OKVIS ^[16]	2015 年	多目+IMU	以优化为主的关键帧 VIO
ROVIO ^[17]	2015 年	单目+IMU	以 EKF 为主的 VIO
VINS-Mono ^[18]	2017 年	单目+IMU	光流法+预积分+优化后端
VINS-Fusion ^[19]	2019 年	视觉+IMU	光流法+预积分+优化后端
ORB-SLAM3 ^[20]	2021 年	单/双目, RGBD, IMU	ORB 特征点、关键帧+优化法

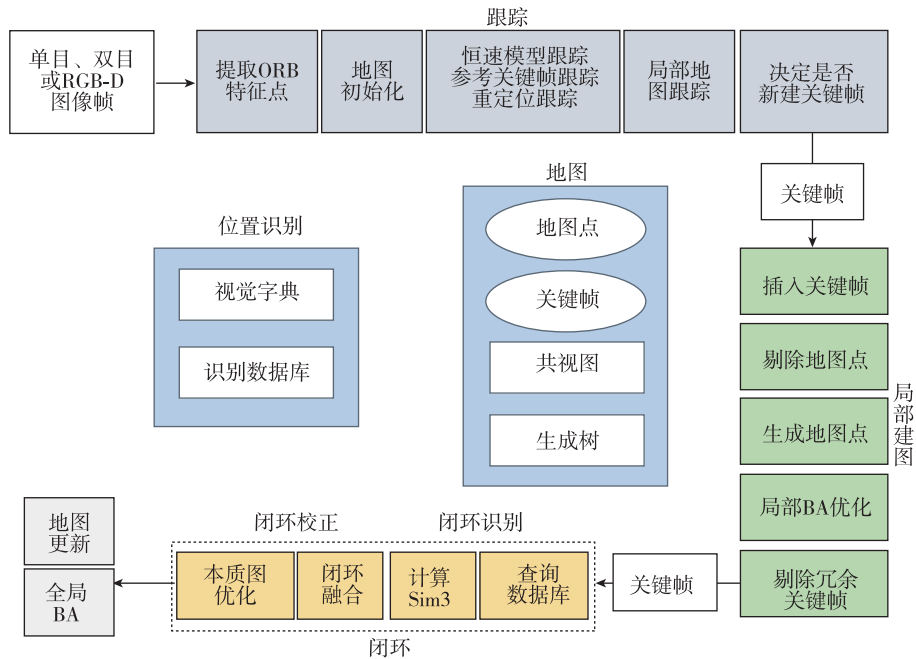


图 4 ORB-SLAM2 流程图

Fig. 4 Flow chart of ORB-SLAM2

2.3 激光雷达

激光雷达在应急定位中的应用与 VSLAM 类似，不同之处在于通过相同点点云匹配的方式获取平移和旋转矩阵构建 SLAM，弥补了视觉定位受光线影响的问题。激光探测与测距 (Light Detection and Ranging, LiDAR) 的 SLAM 方案相较于视觉传感器更为鲁棒。

由于连续地接收距离测量，通过移动激光雷达进行运动估计存在运动退化问题，因此 LiDAR 传感器常与 IMU 或者视觉传感器融合使用。V-LOAM 是视觉与激光融合的代表，该方案采用高频到低频的定位过程，根据视觉匹配得到初始位姿，LiDAR 根据初始位姿进行帧到局部地图的匹配，得到高精度的位姿结果。IMU 传感器不受环境影响，R3LIVE 融合了 IMU、视觉和 LiDAR，实现了鲁棒的状态估计。R3LIVE 包含 2 个子系统，即激光雷达-惯性里程计 (LiDAR Inertial Odometry, LIO) 和 VIO。LIO 利用 LiDAR 和惯性传感器的测量结果构建全局地图的几何结构，并通过最小化点到平面的残差来估计系统的状态。VIO 利用视觉、惯性数据渲染地图纹理，用输入图像渲染每个点的 RGB 颜色，通过最小化帧到帧 PnP 方法重投影误差和帧到地图光度误差来更新系统状态。

本文在表 3 中总结了当前与 LiDAR 有关的 SLAM 代表性方案，图 5 描述了基础方法 LOAM

表 3 激光 SLAM 方案代表

Tab. 3 Representatives of LiDAR SLAM

方案	时间	传感器形式	特点
LOAM ^[21]	2014 年	3D Lidar	里程碑式，基于特征匹配
LIOM ^[22]	2020 年	3D Lidar + IMU	CNN 动态目标剔除; ESKF (Error State Kalman Filter)
LIO-SAM ^[23]	2020 年	3D Lidar + IMU + GPS	因子图优化法
LINS ^[24]	2020 年	3D Lidar + IMU	IESKF (Iteration ESKF)
FAST-LIO2 ^[25]	2021 年	3D Lidar + IMU	增量 KD (KD-Tree) 数据结构 (效率高)
FASTER-LIO ^[26]	2022 年	3D Lidar + IMU	相比 Fast-LIO2 效率进一步提升
V-LOAM ^[27]	2018 年	Mono + 3D Lidar	由高频到低频匹配
VIL-SLAM ^[28]	2019 年	3D Lidar + 视觉 + IMU	VIO 辅助 Lidar 定位
LIC-Fusion ^[29]	2019 年	3D Lidar + 视觉 + IMU	MCKF (Multi-State Co-nstraint Kalman Filter) + 传感器在线标定
R2LIVE ^[30]	2021 年	3D Lidar + 视觉 + IMU	ESKF
LVI-SAM ^[31]	2021 年	3D Lidar + 视觉 + IMU	因子图优化

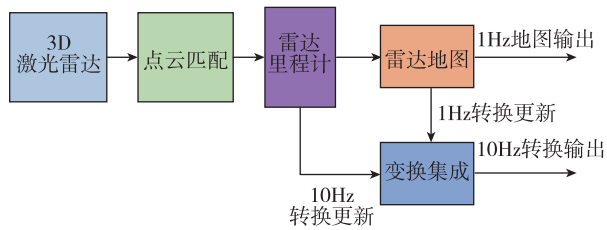


图5 LOAM算法框架

Fig. 5 Algorithm framework of LOAM

的算法框架。激光SLAM的出现在一定程度上缓解了对于无线定位设备的依赖,同时也促进了无人救援设备和特种救援设备的开发与应用。

2.4 无线定位

无线定位技术众多,蓝牙以其低成本、易搭建的特点,适用于快速响应的无线应急定位。刘奔等^[32]预先拟合距离与蓝牙信号强度的回归模型,由实时信号强度反演距离,以贝叶斯概率求取位置,平均定位误差达1.04m。刘盼^[33]提出了梯度下降的相位差优化法提高天线测角精度,运用扩展卡尔曼滤波降噪,仿真实验精度0.26m。上述方法均为几何定位,定位精度依赖于信号质量,指纹库定位对信号质量要求较低,定位精度5~10m。当指纹库维度较高时,遍历指纹库较难实现实时定位。徐超蓝等^[34]根据蓝牙信号强度与距离模型提出了改进K-means算法聚类指纹库,有效提高了定位效率。此外,毕京学等^[35]考虑指纹点空间分布,分析所选指纹点共线、构成钝角等几何关系,有效解决了特殊几何关系对常规定位方法的影响。指纹库定位方法受限于指纹库构建的时间和人力消耗,应急场景下能否快速构建信号指纹库对该方法的应用至关重要。

自1989年美国国防部提出UWB的概念后,UWB以其厘米级的定位精度^[36]被大量应用于室内定位中^[37]。B. Alavi等^[38]对典型多路径情景下的信号进行分析,并优化了距离测量模型。在室内复杂多变环境下,UWB信号容易受到NLOS的影响,在应急定位环境中,NLOS现象会更加显著。Cui Z.等^[39]提出了基于Morlet波变换与卷积神经网络的视距(Line of Sight, LOS)/NLOS识别方法,在频域内识别两种信号,仿真结果表明准确程度达到95%以上。王川阳等^[40]与杨煜等^[41]从UWB基站布设的角度对定位精度进行了分析与研究,通过合理布设UWB定位基站,优化定位布网的几何构型,在提高定位精度的同时为应急环境UWB基站的部署提供了指导。

室内应急场景定位面临强遮蔽和多径影响,利用蓝牙、UWB等射频信号进行定位时,NLOS现象时有发生,严重时甚至无法定位。人工磁场遵循法拉第电磁感应定律,利用电生磁的现象发射磁信号。受益于低频磁场长波特性,低频磁场可以在短距离NLOS情况下实现定位,并且低频磁信号对人体没有伤害,已经应用于医学介入式诊疗装置研究^[42]。因此,人工磁场特别适用于多径效应和遮蔽现象严重的应急定位等特殊领域,但是受限于其成本和覆盖范围,人工磁场不适合普适性定位。E. Prigge等^[43]率先研究了低频人工磁场,并指出其良好穿透障碍物的特性,采用码分多址的方法在4m²的环境中取得了厘米级的定位精度。J. Blankenbach等^[44]分析了人工磁场的信号、测距以及信噪比,直径50cm的单个线圈可覆盖18m的范围,即使在困难环境下定位精度仍优于1m。同时,低频磁场具有低功耗的特性^[45]。齐小康设计并通过实验验证了低频交流磁场的室内定位系统,在数瓦特的功耗下实现了小范围内的精确定位^[46]。R. Kusche等^[47]利用两节电池为直流电机供电,借助亚克力转盘和钕磁铁构建了交流磁场锚节点,同时测量磁场信号的幅度和相位,确定目标用户在人工磁场中所处的方向和位置。

综上所述,图6总结了无线定位技术的优点、面临的问题以及在应急定位中的应用。蓝牙、UWB及人工磁场在应急场景下的定位各有优缺点,根据应急定位系统搭建时间增加的顺序,本文按照如下顺序推荐使用:蓝牙、UWB以及人工磁场。人工磁场由于需要在灾害场景实地估计模型参数,布设速度最慢。在灾害场景定位过程中,还可以根据成本、精度、穿透性等要求选用传感器。

3 应急定位系统

第2章详细分析了不同传感器的优缺点,有助于应急救援定位系统的传感器选择。应急定位系统也需要综合考虑救援人员与无人设备,例如在极度危险的灾害情况下,可以利用无人设备进行辅助救援。随着智能化程度显著提升,无人设备可以进入应急场所收集环境信息,上传至服务器端辅助决策,也可以实现协同定位等功能。完整的应急定位系统主要包含:坐标基准、知识图谱、多源融合和智能控制四大关键技术,如图7所示。下文将具体描述关键技术的作用、相关研究与发展趋势,并在3.5节总结应急定位系统的布设流程。

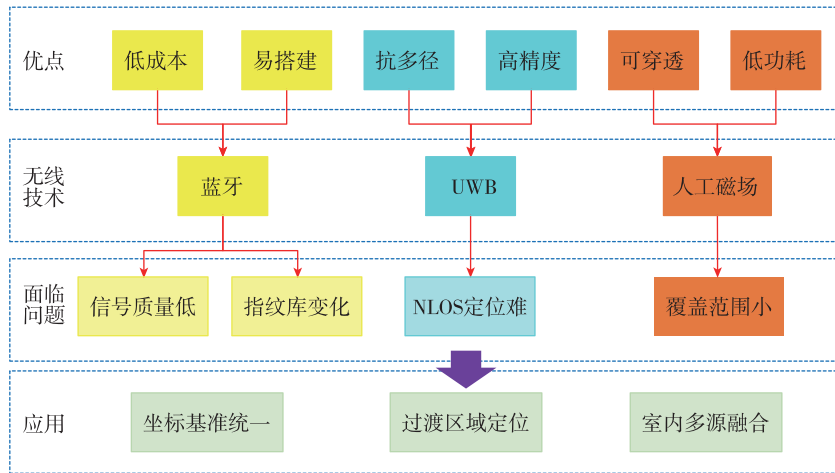


图 6 无线定位技术总结

Fig. 6 Summary of wireless positioning technology

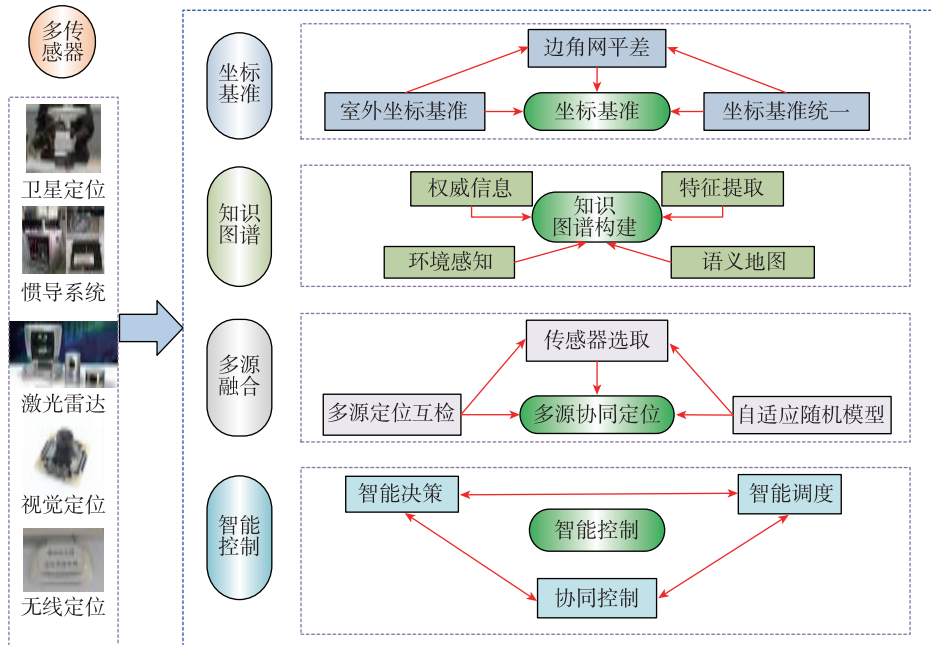


图 7 应急定位关键技术

Fig. 7 Key technologies for emergency positioning

3.1 坐标基准

应急事件发生后,室内布设传感器可能被损毁而无法使用,室内外统一坐标基准随之破坏。坐标基准的构建,是为抢险救灾和灾后重建提供及时、可靠的绝对位置的基础。应急坐标基准包括室外坐标基准和室内坐标基准,室外开阔环境常采用 PPP 或连续运行参考站系统确定坐标基准^[48],其中前者定位精度较高,后者定位速度较快,可灵活选用。

构建 GNSS 信号过渡区域以及室内外统一的坐标

基准,可以使用蓝牙、超宽带和人工磁场等技术。Liu Q. 等^[49]融合了 GNSS、惯性器件和低功耗蓝牙,基于智能手机观测值进行环境感知,在实现室内外无缝定位的同时统一了室内外坐标基准。E.Mendelson^[50]通过在紧急情况下使用智能手机的无线协议作为信标,构建室内定位基准,协助救援人员快速定位。杨煜等^[51]提出了一种基于多维定标定位算法的集中式动态组网坐标基准构建技术,具备“一次组网,统一解算,完成构建”的特点,其实验结果表明该方法定位误差小于 0.1m,可以满足应急定位的需要。

在应急定位过程中,坐标基准往往由室外引入到室内,或由合作环境引入到非合作环境,需要与系统布设同时完成,定位精度至少应达到分米级^[52]。目前,合作环境可以采用GNSS统一基准,技术已经成熟。由合作环境向非合作环境过渡时,大多采用距离或角度前方交会的方法,使用平差方法准确估计基站位置。因此,坐标基准统一转化为精确测距或精确测角问题。此外,SLAM方法还可以获取无线传感器位置,增加了边角网平差中的约束条件。

3.2 知识图谱

知识图谱于2012年5月17日由Google提出^[53],本质上是一个描述实体、事件及其之间关系的知识库。应急定位过程中需要对应急管理方案、多源传感器融合、设备和人员调度等复杂问题进行处理,知识图谱综合处理海量的多源异构数据^[54],构建动态的应急疏散和救援方案,例如路径规划、危险区域标记和传感器选择等。

知识图谱构建过程中,知识建模为最重要的阶段,包括信息抽取、知识融合等阶段^[55]。信息抽取从异构数据中自动化抽取包括实体、关系和属性等结构信息^[56]。杜志强等^[57]提出了“自顶向下构建模式层,自底向上构建数据层”,兼顾结构化数据和海量复杂数据,提高了信息提取能力。应急定位领域抽取信息时,应当以权威信息为主,辅以其他信息。闫家伟等^[58]指出,针对社区火灾防控能力不足的现象,将消防规范、技术标准及火灾案例转化为知识图谱,用于查阅案例和构建风险防控方案。知识融合过程中,收集的相关信息伴随着冗余和错误信息。李泽荃等^[59]对于抽取的实体、属性和关系,与已构建的知识图谱进行比对,确定最优的概念匹配和关系匹配以实现信息融合。

由于应急定位领域对于可靠性有非常高的要求,需要大量专业人士或专业知识参与建模,尚未实现高度的自动化抽取。随着互联网的发展,海量的多源异构信息不仅对数据库的存储和读写提出了更高的要求,也为数据融合分析带来了更高的分辨和选择要求。应急定位中,各种突发情况颇多,常常具有不同的时空布局,如何根据不同的场景扩展已有知识图谱的普适性能力,有待进一步研究。

3.3 多源协同

单一定位源难以满足高精度、高可靠的定位需求,多源协同是应急定位的必然选择。在时间响应紧急的场景中,自主定位的重要性大大提升,但往往面

临误差累积的问题,需要充分融合自主定位设备。Sun M.等^[60]提出了一种遗传算法优化的粒子滤波方法,实现了非合作区域下的地磁/行人航位推算的自主定位。赵雨楠等^[61]利用图优化的方法,融合了INS、运动约束、地磁匹配以及激光点云匹配,实现自主定位。自主定位多为相对定位,可以借助GNSS定位结果将相对位置转换为绝对位置信息。A. Abosekeen等^[62]提出了一种磁力计/INS/GNSS组合导航系统,该系统利用三轴磁力计为方位角提供测量值。

在可布设无线定位设备的场景中,应充分考虑不同传感器的优点和环境信息,完善传感器选用、多传感器无缝切换、自适应随机模型构建和多源传感器的故障隔离等技术。针对室内应急定位中的节点部署与容错定位问题,M. Jadliwala等^[63]提出了一种新颖而简单的定位系统ASFALT,并探究了传感器部分破坏时的定位性能。Li N.等^[64]开发了一种基于射频频的室内定位框架,具有较强的稳健性,在传感器遭到破坏时仍能保持70%的精度需求。P. Zabalegui等^[65]基于残差构建了全局检验指标和局部检验指标,探测UWB锚节点的故障情况并及时隔离故障锚节点,在室内和火车站等复杂环境下验证了故障检测和排除算法。

目前,非合作环境下的应急定位对于惯性导航系统有很强的依赖性,合作环境下的应急定位则依赖于GNSS,随着非合作区域的定位环境复杂性和定位条件恶劣性的加剧,如何提高多源协同增强能力同时完成数据轻量化的工作,以满足应急定位的快速需求是面临的一大难题。

3.4 智能控制

面对城市建筑物应急场景的复杂系统,难以建立有效的数学模型或应用常规的控制理论去定量计算与分析。因此,将智能控制理论应用到应急定位中是十分必要的,其中智能决策、智能调度及智能协同会大大提高救援成功率。

应急定位时,绝大多数面对的场景都是陌生场景,先验信息缺失,要求导航与定位系统提供边探索、边记忆的特性^[66-67],将深度学习应用于多源数据的语义提取,使救援人员具备与环境边交互、边学习的更优解导航能力。柳景斌等^[68]提出了从运动场景及行为识别、数据增强和误差估计建模等三方面与深度学习相结合,提供未来室内高精度智能定位技术。朱庆等^[69]优化应急测绘无人机资源调度,提出了以蚁群算法为核心,以任务需求、优先

级、地理环境与测绘资源能力等为约束,以高完成率和风险最小化为目标的智能应急资源调度模型。Lin N. 等^[70]利用无人机提供救灾区域地面节点的紧急覆盖,考虑最优覆盖范围和通信功率,采用视距通信概率和构建虚拟障碍物方法,迭代实现无人机的最优分布。为了实现应急环境下的智能控制,还需将分析预测、信息获取、应急定位和保障能力进行协调统一,构建应急智能定位服务系统。

一套完整的智能控制应急定位系统需要将专家知识、场景信息与设备算法相结合,以达到面对复杂救援情况实现最优解的能力。决策端包含绝大部分智能控制理论,但是需要专家知识或先验信息进行引导,如何将环境感知、自主决策以及知识自学习融合,是未来智能控制的研究重点之一。

3.5 应急定位系统布设流程

在城市建筑内发生紧急情况时,应急人员和应急设备需要从室外进入室内,定位过程中需要建立统一的室内外坐标基准。在室外,首先利用 GNSS 获取无线基站位置,利用室外基站对室内基站采用距离或角度的前方交会,并利用惯性传感器、SLAM 等自主定位技术增加角度与距离约束,采用边角网平差方法获取室内基站位置,即构建了室内外统一的坐标基准。在室内,由于无线定位传感器有效距离的限制,传感器需要边行走、边布设,室内坐标基准传递与室外基准向室内传递过程一致。

进入到室内后,利用视觉、LiDAR 等技术进行环境感知和受灾情况特征提取,融合公开的灾害数据等权威信息和救援人员等一手信息,构建或更新知识图谱。知识图谱可辅助传感器选用、传感器无缝切换,对室内重点搜索区域和危险区域进行标记,规划疏散路线和救援路线,实现救援人员和救援设备之间的智能调度。在获取受灾环境信息后,采用惯导、LiDAR 融合定位方式跟踪救援人员和救援设备,实时判断是否增加视觉定位或无线定位方式以提高鲁棒性。在遮蔽严重的场景,救援人员可布设人工磁场等无线基站辅助定位,也可以与无人设备集成的基站实现救援人员和救援设备之间的协同定位。

4 结论

通过第 1 章的对比,现有的普适定位系统难以满足突发事件下的定位需求,而应急定位系统很好地弥补了这一空白。面对灾害等复杂场景时,为了

使应急定位系统充分保障救援人员的生命安全,要求其具备部署速度快、定位精度高、实时处理及救援区域全覆盖的特点。应急定位系统的构建主要包括坐标基准、知识图谱、多源协同及智能控制四大关键技术。但是目前传感器选取、随机模型构建以及决策阶段主要依赖专家知识,难以做到环境数据自分析和智决策,如何做到无人干预或轻量人为干预的“环境-人-机”系统布设将是应急定位系统的未来发展趋势。

参考文献

- [1] 中国消防. 2021 年消防接处警创新高,扑救火灾 74.5 万起[Z]. 2022.
China Fire Protection. In 2021, fire protection and response reached a new high of 745000 fires[Z]. 2022 (in Chinese).
- [2] 中华人民共和国国家标准. GB 50096-2011 住宅设计规范[S]. 2011.
The State Standard of the People's Republic of China. GB 50096-2011 residential design code[S]. 2011 (in Chinese).
- [3] 祝会忠, 李军, 徐爱功, 等. 灾害应急环境下智能终端高精度北斗增强定位方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(8): 1155-1167.
Zhu Huizhong, Li Jun, Xu Aigong, et al. High-precision BDS augmented positioning method for intelligent disaster emergency environment on smart device [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(8): 1155-1167 (in Chinese).
- [4] Jiang W, Cao Z, Cai B, et al. Indoor and outdoor seamless positioning method using UWB enhanced multi-sensor tightly-coupled integration[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(10): 10633-10645.
- [5] Foxlin E. Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2005, 25(6): 38-46.
- [6] Zhu N, Ortiz M, Renaudin V, et al. Seamless indoor-outdoor infrastructure-free navigation for pedestrians and vehicles with GNSS-aided foot-mounted IMU[C]// Proceedings of 10th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Pisa, Italy, 2019.
- [7] Wei J, Chen S, Cai B, et al. A multi-sensor positioning method-based train localization system for low density line[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 10425-10437.

- [8] Vedadi F, Valae S. Automatic visual fingerprinting for indoor image-based localization applications[J]. *IEEE Transactions on Systems Man Cybernetics-Systems*, 2020, 50(1): 305-317.
- [9] Liang J, Corso N, Turner E, et al. Image based localization in indoor environments[C]// *Proceedings of 4th International Conference on Computing for Geospatial Research and Application (COMGeo)*. San Jose, CA, 2013: 70-75.
- [10] Davison A, Reid I, Molton N, et al. MonoSLAM: real-time single camera SLAM[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(6): 1052-1067.
- [11] Klein G, Murray D. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces[C]// *Proceedings of 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Nara, Japan, 2007: 225-234.
- [12] Forster C, Pizzoli M, Scaramuzza D, et al. SVO: fast semi-direct monocular visual odometry[C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Hong Kong, China, 2014: 15-22.
- [13] Engel J, Schops T, Cremers D. LSD-SLAM: large-scale direct monocular SLAM[C]// *Proceedings of 13th European Conference on Computer Vision (ECCV)*. Zurich, Switzerland, 2014: 834-849.
- [14] Mur-Artal R, Tardos J. ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(5): 1255-1262.
- [15] Mourikis A, Roumeliotis S. A multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation[C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Rome, Italy, 2007: 3565.
- [16] Leutenegger S, Lynen S, Bosse M, et al. Keyframe-based visual-inertial odometry using nonlinear optimization[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2015, 34(3): 314-334.
- [17] Bloesch M, Omani S, Hutter M, et al. Robust visual inertial odometry using a direct EKF-based approach[C]// *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Hamburg, Germany, 2015: 298-304.
- [18] Qin T, Li P, Shen S. VINS-Mono: a robust and versatile monocular visual-inertial state estimator[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(4): 1004-1020.
- [19] Qin T, Pan J, Cao S, et al. A general optimization-based framework for local odometry estimation with multiple sensors[J]. *arXiv preprint arXiv.1901.03638*, 2019.
- [20] Campos C, Elvira R, Rodríguez J, et al. ORB-SLAM3: an accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multimap SLAM [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(6): 1874-1890.
- [21] Zhang J, Singh S. LOAM: lidar odometry and mapping in real-time[C]// *Proceedings of Robotics: Science and Systems*. Robotics: Science and Systems Foundation, 2014.
- [22] Zhao S, Fang Z, Li H, et al. A robust laser-inertial odometry and mapping method for large-scale highway environments[C]// *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Macau, China, 2019: 1285-1292.
- [23] Shan T, Englot B, Meyers D, et al. LIO-SAM: tightly-coupled lidar inertial odometry via smoothing and mapping[C]// *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Electr Network, 2020: 5135-5142.
- [24] Qin C, Ye H, Pranata C, et al. LINS: a lidar-inertial state estimator for robust and efficient navigation[C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Electr Network, 2020: 8899-8905.
- [25] Xu W, Cai Y, He D, et al. FAST-LIO2: fast direct LiDAR-inertial odometry[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, 38(4): 2053-2073.
- [26] Bai C G, Xiao T, Chen Y J, et al. Faster-LIO: light-weight tightly coupled lidar-inertial odometry using parallel sparse incremental voxels[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 4861-4868.
- [27] Zhang J, Singh S. Visual-lidar odometry and mapping: low-drift, robust, and fast[C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Seattle, WA, 2015: 2174-2181.
- [28] Shao W, Vijayarangan S, Li C, et al. Stereo visual inertial LiDAR simultaneous localization and mapping [C]// *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Macau, China, 2019: 370-377.
- [29] Zuo X, Geneva P, Lee W, et al. LIC-Fusion: LiDAR-inertial-camera odometry[C]// *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Macau, China, 2019: 5848-5854.
- [30] Lin J, Zheng C, Xu W, et al. R2LIVE: a robust, real-time, LiDAR-inertial-visual tightly-coupled state estimator and mapping[J]. *IEEE Robotics and Auto-*

- mation Letters, 2021, 6(4): 7469-7476.
- [31] Shan T, Englot B, Ratti C, et al. LVI-SAM: tightly-coupled lidar-visual-inertial odometry via smoothing and mapping[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Xi'an, China, 2021; 5692-5698.
- [32] 刘奔, 马昌忠, 金俊超, 等. 基于 RSSI 测距的贝叶斯概率定位算法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(10): 1413-1419.
Liu Ben, Ma Changzhong, Jin Junchao, et al. Bayesian probabilistic localization algorithm based on RSSI measurement[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2021, 44(10): 1413-1419(in Chinese).
- [33] 刘盼. 基于蓝牙 5.1 的室内定位系统的研究与实现[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
Liu Pan. Research and implementation of indoor positioning system based on Bluetooth 5.1[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021(in Chinese).
- [34] 徐超蓝, 高军礼, 张小花, 等. 基于 K-means 和 SVM 的蓝牙室内定位算法[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(2): 133-135+139.
Xu Chaolan, Gao Junli, Zhang Xiaohua, et al. Algorithm of bluetooth indoor location based on K-means and SVM[J]. Sensors and Microsystems, 2019, 38(2): 133-135+139(in Chinese).
- [35] 毕京学, 汪云甲, 宁一鹏, 等. 顾及 BLE 信标几何优化的室内测距定位方法[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 411-416.
Bi Jingxue, Wang Yunjia, Ning Yipeng, et al. Indoor range-based positioning method considering geometry optimization of BLE beacons[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2021, 50(2): 411-416(in Chinese).
- [36] Fowler C, Entzminger J, Corum J. Assessment of Ultra-Wideband (UWB) technology[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1990, 5(11): 45-49.
- [37] Elsanhoury M, Makela P, Koljonen J, et al. Precision positioning for smart logistics using ultra-wideband technology-based indoor navigation; a review[J]. IEEE Access, 2022, 10: 44413-44445.
- [38] Alavi B, Pahlavan K. Bandwidth effect on distance error modeling for indoor geolocation[C]// Proceedings of 14th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Beijing, China, 2003; 2198-2202.
- [39] Cui Z, Gao Y, Hu J, et al. LOS/NLOS identification for indoor UWB positioning based on morlet wavelet transform and convolutional neural networks[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(3): 879-882.
- [40] 王川阳, 王坚. 超宽带应急定位基站布设研究[J]. 测绘科学, 2019, 44(8): 174-181.
Wang Chuanyang, Wang Jian. Study of base station layout of ultra wideband emergency positioning[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(8): 174-181(in Chinese).
- [41] 杨煜, 王坚, 王敏敏, 等. 应急环境基站布设对定位精度的影响分析[J]. 测绘通报, 2020(5): 90-94.
Yang Deng, Wang Jian, Wang Minmin, et al. Analysis of influence of emergency environment anchor deployment on positioning accuracy[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(5): 90-94(in Chinese).
- [42] 张培来. 介入式诊疗装置的三维定位方法及系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
Zhang Peilai. Research on localization techniques of interventional telemetric system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009(in Chinese).
- [43] Prigge E, How J. Signal architecture for a distributed magnetic local positioning system[J]. IEEE Sensors Journal, 2004, 4(6): 864-873.
- [44] Blankenbach J, Norrdine A, Hellmers H. A robust and precise 3D indoor positioning system for harsh environments[C]// Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). The University of New South Wales, Sydney, Australia, 2012.
- [45] Pasku V, De Angelis A, De Angelis G, et al. Magnetic field-based positioning systems[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19(3): 2003-2017.
- [46] 齐小康. 基于地球和人工磁场空间信息的新概念导航和定位[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Qi Xiaokang. New-concept navigation and localization based on the spatial information of geomagnetic and artificial magnetic fields[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018(in Chinese).
- [47] Kusche R, Schmidt S, Hellbruck H. Indoor positioning via artificial magnetic fields[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 8502509.
- [48] 王坚, 刘纪平, 韩厚增, 等. 应急救援无缝定位关键技术研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(8): 1126-1136.
Wang Jian, Liu Jiping, Han Houzeng, et al. Key technologies of seamless location in emergency rescue[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(8): 1126-1136(in Chinese).

- [49] Liu Q, Gao, C, Shang R, et al. Environment perception based seamless indoor and outdoor positioning system of smartphone[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(17): 17205-17215.
- [50] Mendelson E. System and method utilizing integral wireless protocols of a mobile phone as an emergency beacon to aid first responders in locating people: US9374673B2[P]. 2016-06-21.
- [51] 杨煜, 王敏敏, 王坚, 等. 超宽带应急定位坐标基准动态构建技术研究[J]. 测绘科学, 2022, 47(6): 44-50.
Yang Deng, Wang Minmin, Wang Jian, et al. Research on dynamic construction technology of UWB emergency positioning coordinate datum[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(6): 44-50(in Chinese).
- [52] Han H, Wang J, Liu F, et al. An emergency seamless positioning technique based on ad hoc UWB networking using robust EKF[J]. Sensors, 2019, 19(14): 3135.
- [53] 刘峤, 李杨, 段宏, 等. 知识图谱构建技术综述[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(3): 582-600.
Liu Qiao, Li Yang, Duan Hong, et al. Knowledge graph construction techniques[J]. Research and Development of Computers, 2016, 53(3): 582-600(in Chinese).
- [54] 陶坤旺, 赵阳阳, 朱鹏, 等. 面向一体化综合减灾的知识图谱构建方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(8): 1296-1302.
Tao Kunwang, Zhao Yangyang, Zhu Peng, et al. Knowledge graph construction for integrated disaster reduction[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(8): 1296-1302(in Chinese).
- [55] Dong X L, Gabrilovich E, Heitz G, et al. Knowledge vault: a web-scale approach to probabilistic knowledge fusion[C]// Proceedings of 20th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD). New York, NY, 2014: 601-610.
- [56] 徐绪堪, 房道伟, 蒋勋, 等. 知识组织中知识粒度化表示和规范化研究[J]. 图书情报知识, 2014(6): 101-106.
Xu Xukan, Fang Daowei, Jiang Xun, et al. Research on knowledge granularity representation and standardization during knowledge organization[J]. Library and Information Science, 2014(6): 101-106(in Chinese).
- [57] 杜志强, 李钰, 张叶廷, 等. 自然灾害应急知识图谱构建方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1344-1355.
Du Zhiqiang, Li Yu, Zhang Yeting, et al. Knowledge graph construction method on natural disaster emergency[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(9): 1344-1355(in Chinese).
- [58] 闫家伟, 张苗. 大数据驱动的小区火灾风险智能感知预警研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(12): 1731-1734.
Yan Jiawei, Zhang Miao. Research on community fire risk intelligent perception and early warning system driven by big data[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(12): 1731-1734(in Chinese).
- [59] 李泽荃, 徐淑华, 李碧霄, 等. 基于知识图谱的灾害场景信息融合技术[J]. 华北科技学院学报, 2019, 16(2): 1-5.
Li Zequan, Xu Shuhua, Li Bixiao, et al. Information fusion technology of disaster scenario based on knowledge graph[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2019, 16(2): 1-5(in Chinese).
- [60] Sun M, Wang, Y, Xu S, et al. Indoor geomagnetic positioning using the enhanced genetic algorithm-based extreme learning machine[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 2508611.
- [61] 赵雨楠, 季阳, 郭元江, 等. 基于图优化的惯性/地磁/激光雷达复合定位技术研究[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(3): 64-69.
Zhao Yunan, Ji Yang, Guo Yuanjiang, et al. Research on inertial/geomagnetic/LiDAR integrated positioning technology based on graph optimization[J]. Navigation, Positioning and Timing, 2022, 9(3): 64-69(in Chinese).
- [62] Abosekeen A, Noureldin A, Karamat T, et al. Comparative analysis of magnetic-based RISS using different MEMS-based sensors[C]// Proceedings of 30th International Technical Meeting of the Satellite-Division-of-the-Institute-of-Navigation (ION GNSS+). Portland, OR, 2017: 2944-2959.
- [63] Jadhwal M, Upadhyaya S, Taneja M. ASFALT: a simple fault-tolerant signature-based localization technique for emergency sensor networks[C]// Proceedings of 26th IEEE International Symposium on Reliable Distributed Systems. Beijing, China, 2007: 3.
- [64] Li N, Becerik-Gerber B, Soibelman L, et al. Comparative assessment of an indoor localization framework for building emergency response[J]. Automation in Construction, 2015, 57: 42-54.
- [65] Zabalegui P, De Miguel G, Goya J, et al. Residual

- based fault detection and exclusion methods applied to ultra-wideband navigation[J]. *Measurement*, 2021, 179: 109350.
- [66] 刘经南, 罗亚荣, 郭迟, 等. PNT 智能与智能 PNT [J]. *测绘学报*, 2022, 51(6): 811-828.
Liu Jingnan, Luo Yarong, Guo Chi, et al. PNT intelligence and intelligent PNT[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 811-828(in Chinese).
- [67] Moller R, Furnari A, Battiato S, et al. A survey on human-aware robot navigation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2021, 145(4): 103837.
- [68] 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.
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(in Chinese).
- [69] 朱庆, 韩会鹏, 于杰, 等. 应急测绘无人机资源多目标优化调度方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(11): 1608-1615.
Zhu Qing, Han Huipeng, Yu Jie, et al. Multi-objective optimization scheduling method for UAV resources in emergency surveying and mapping[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1608-1615(in Chinese).
- [70] Lin N, Liu Y, Zhao L, et al. An adaptive UAV deployment scheme for emergency networking[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(4): 2383-2398.

(编辑:孟彬)