

煤矿地下空间定位技术研究进展

王国庆, 赵鑫, 杨春雨[✉], 马磊, 代伟

中国矿业大学信息与控制工程学院, 徐州 221116

[✉]通信作者, E-mail: chunyuyang@cumt.edu.cn

摘要 我国以煤为主的能源结构决定了煤炭资源的高效开采事关国家能源安全, 煤矿智能化是煤炭工业高质量发展的必由之路。地下空间定位技术是实现煤矿智能化的基础, 准确的定位信息可用于保障矿工生命安全, 优化采矿作业, 提高设备利用率, 降低运行成本。矿井中卫星导航信号不可用, 作业空间封闭受限, 电磁环境复杂, 光照条件不良, 这对于定位技术提出了新要求。围绕煤矿井下特殊场景的定位问题, 首先系统介绍了基于距离交会、基于数据库匹配、基于航位推算以及多源信息融合的四类基本定位技术, 随后对于这四类定位技术的具体实施方案进行了详细评述, 分析并归纳了煤矿地下定位系统面临绝对定位方式误差增大、推算式定位校正困难、多源融合式定位方法性能下降、缺乏全面的标准指导等挑战。未来可以考虑采用多系统协同提高定位能力, 引入类脑仿生导航探索新的定位方案, 提升无缝定位、应急定位能力, 加强定位信息的隐私保护。

关键词 煤矿智能化; 煤矿地下定位; 受限空间; 导航定位; 卫星拒止环境

分类号 TD67

Recent advances in research on underground space positioning technology for coal mining

WANG Guoqing, ZHAO Xin, YANG Chunyu[✉], MA Lei, DAI Wei

School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

[✉]Corresponding author, E-mail: chunyuyang@cumt.edu.cn

ABSTRACT Efficient coal mining is essential for ensuring China's energy security, and the advancement toward intelligent coal mining represents a strategic move to foster high-quality development within the coal industry. The cornerstone of realizing intelligent coal mines lies in underground space positioning technology. Accurate positioning is crucial not only for safeguarding miner safety but also for optimizing mining operations, improving equipment utilization and minimizing operational costs. The unique challenges of underground mining, such as the absence of satellite navigation signals, restricted and confined operating environments, and harsh electromagnetic and lighting conditions, place new requirements on positioning techniques. This paper focuses on the localization issues specific to underground coal mines, offering a systematic overview of four fundamental localization techniques: range intersection, database matching, dead reckoning, and multisource information fusion. Range intersection determines location by utilizing distance measurements obtained through various methods. Database matching employs online measurements to match against characteristics stored in a database. Dead reckoning calculates the current location by integrating measurements over time. Lastly, multisource information fusion enhances positioning accuracy by combining data from multiple sources. The paper further reviews detailed implementation schemes of these four positioning technologies in coal mines, highlighting typical sensors or systems and summarizing current research developments. For range intersection methods, methods such as visible light, ultrasonic, wireless local area network,

收稿日期: 2023–12–07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62373362, 62003348, 62203448, 62273350)

bluetooth, ultra-wideband, and infrared positioning are examined. Database matching positioning methods include geomagnetic, gravity, and radio fingerprint positioning systems. Dead reckoning techniques cover inertial navigation, pedestrian navigation, and odometers, while multisource information fusion focuses on integrated navigation and simultaneous localization and mapping. Moreover, the paper identifies key challenges confronting underground positioning systems in coal mines. These challenges encompass the increasing inaccuracies in absolute localization methods, difficulties in correcting dead reckoning localizations, performance declines in multisource fusion localization methods, and the absence of comprehensive standardization. Given the complex environment of coal mines, there is still much room for improving the accuracy and reliability of underground positioning. To address these challenges, this paper proposes several avenues for improvement. Enhancing the performance of the positioning systems might involve fostering collaboration across multiple systems, incorporating brain-inspired navigation to explore new localization solutions, and strengthening seamless and emergency localization capabilities. Furthermore, in today's interconnected intelligent age, the privacy and security aspects of positioning systems warrant careful consideration.

KEY WORDS intelligentization of coal mining; underground coal mining positioning; confined space; navigation and positioning; satellite denied environment

煤炭是我国能源的基石,是支撑我国国民经济发展最重要的基础能源.国际能源署预测 2040 年中国对煤炭的需求将占全球煤炭需求的 50%.当今世界处于百年未有之大变局,国际关系纷繁复杂,各个国家面临着多样化的能源安全挑战.我国“富煤贫油少气”的能源结构决定了煤炭是我国能源安全的“压舱石”^[1],煤炭资源的高效安全开采是国家能源安全的保障.

我国煤炭以井工作业为主,开采条件复杂,工作环境恶劣,且存在瓦斯、煤尘、火灾、水灾、冲击地压等众多危险源.苛刻的井下环境对于开采装备提出了特殊要求,也对井下工作人员的人身安全带来极大的威胁^[2].煤矿智能化是提高开采效率、保障人员安全、保证煤炭工业高质量发展的必由之路^[3].2019 年,中华人民共和国国家煤矿安全监察局发布了《煤矿机器人重点研发目录》^[3],规划了掘进、采煤、运输、安控和救援共 5 类、38 种煤矿机器人的研发计划;2020 年 2 月,中华人民共和国国家发展和改革委员会等八部委联合发布了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》^[4],指导意见指出,到 2021 年,建成多种类型、不同模式的智能化示范煤矿,基本实现掘进工作面减人提效、综采工作面内少人或无人操作、井下和露天煤矿固定岗位的无人值守与远程监控;为了科学规范有序开展煤矿智能化建设,加快建成一批多种类型、不同模式的智能化煤矿,2021 年 6 月,国家能源局、国家矿山安全监察局研究制定了《煤矿智能化建设指南(2021 年版)》^[5].煤矿智能化建设是产业发展和社会发展的必然要求,在国家相关政策引领下,目前我国煤矿智能化建设走在全球前列,然而目前智能化和自主化水平有待进一步提升,存

在若干关键技术亟待突破.其中,定位系统获得的位置、速度、姿态等信息是支撑煤矿掘进、采煤、支护、运输、巡检、运输等装备智能化的关键,同时也是井下人员安全作业和应急救援的重要依据^[6].

卫星导航信号不可用是煤矿井下定位的主要挑战.煤矿运营需要根据具体任务需求,并考虑井下特殊的现场环境,配置相应的传感器并采取合理的定位技术来实现井下设备和人员的定位,在获取可靠的位置等信息基础上实现对于设备的跟踪、规划、控制和调度,实现人员的活动监测和安全管理,并为应急救援等特殊场景提供位置服务.

本文围绕煤矿井下特殊场景的定位问题,首先系统介绍了四类基本的定位技术,包括基于距离交会原理的定位技术、基于数据库匹配原理的定位技术、基于航位推算的定位技术以及多源信息融合的定位技术,随后对于这四类定位技术的具体实施方案进行了详细评述,分析并归纳了煤矿井下定位系统的挑战性问题,最后展望了井下定位系统可能的发展方向.

1 地下定位技术原理

典型地下矿山环境如图 1 所示,由于空间封闭、电磁环境复杂,煤矿装备和人员在卫星拒止环境下实现准确的定位和导航尤为困难,针对此类应用环境具体任务需求选择适用的定位技术至关重要.定位技术有多种分类方法,根据其采用的基本原理,本文将常见的地下定位技术分为基于距离交会原理的定位技术、基于数据库匹配原理的定位技术、基于航位推算的定位技术以及基于多源信息融合的定位技术四大类,如图 2 所示,其中 RSSI, ToF, AoA 和 SLAM 分别表示接收信号强度

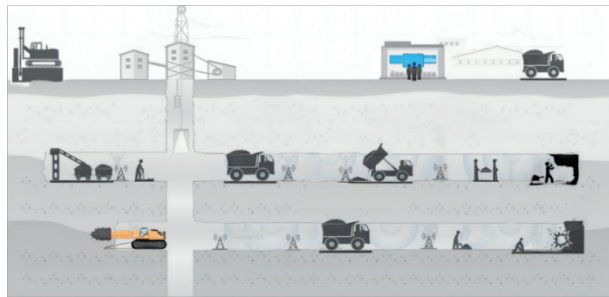


图1 典型地下矿山环境示意图

Fig.1 Schematic diagram of typical underground mine environment

指示、信号飞行时间、信号到达角度和同步定位与建图。

1.1 基于距离交会的定位原理

距离交会定位法是利用待测量目标到*i*(*i*≥3)个以上已知位置参考点的直线距离,利用三角形相似或几何定位方法来获得目标物体位置的技术。其原理如式(1)所示^[6]:

$$\begin{cases} (X_1 - X_a)^2 + (Y_1 - Y_a)^2 + (Z_1 - Z_a)^2 = d_{1a}^2 \\ (X_2 - X_a)^2 + (Y_2 - Y_a)^2 + (Z_2 - Z_a)^2 = d_{2a}^2 \\ \dots \\ (X_i - X_a)^2 + (Y_i - Y_a)^2 + (Z_i - Z_a)^2 = d_{ia}^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, (*X_i*, *Y_i*, *Z_i*)为参考点坐标, *d_{ia}*为待测量目标到第*i*个参考点的距离, (*X_a*, *Y_a*, *Z_a*)为待测量目标的真实位置。通过求解上述方程可以获得待求解的目标位置。根据实现测距方式的不同,距离交会定位方法可以分为RSSI、ToF、AoA等^[6]。

1.1.1 基于RSSI的定位技术

RSSI利用接收器实际接收到信号功率强度RSS的相对度量来估计发射器(Transmitter, Tx)和接收器(Receiver, Rx)设备之间的距离, RSSI值越高, Tx和Rx之间的距离越小^[7]。Rx在*o*处接收到的无线强度RSSI值为^[7]: $RSSI = -10n \lg(o) + A$ 。其

中*n*为传输路径损耗指数,一般取1~5,信号传输距离与此密切相关, *n*值越大,信号衰减越大,传输距离越短。*A*为距离接收器参考距离处的RSSI值。其定位原理如图3所示,图中RN为参考节点。该算法具有成本低、计算简单的优点。但是,在复杂的矿井环境中,巷道狭窄且曲折,粉尘多,固定和移动遮挡多,引起无线信号传输中的异常衰减,体现为RSSI定位精度下降。

1.1.2 基于AOA的定位技术

AoA定位技术包括测距和测向两部分,其关键在于测向。借助天线阵列,通过接收信号的到达时间差估算发射信号的到达角度,从而确定目标位置(图4)。在二维空间, AoA成本低于ToA和TDoA(到达时间差),精度高于RSSI。距离较小时, AoA能提供精确位置估计;距离较大时,误差较大。井下环境中,多径效应可能导致定位精度下降。可通过扩频编码方法提高系统抗干扰能力,减小多径效应对AoA定位精度的影响。引入直接序列扩频^[8]、码分多址^[9]等扩频编码技术,可以提升复杂井下环境中AoA定位的稳定性和准确性。

1.1.3 基于ToF的定位技术

ToF算法通过计算发射机与接收机间的飞行时间或到达时间来确定距离,再利用三边定位原则计算目标位置。其定位原理如图5所示,图中*S*表示距离, *V*表示信号传播速度, *T*表示时间。其优点是基站间耦合低,实施灵活。但是,对于发射机和接收器之间时间同步要求严格,时间同步误差会带来定位误差增加。扩频编码技术可协助解决同步问题,提高系统对误差容忍度。可参考视频中的帧编码和场编码方法,采用精确时间标记,以提升定位精度^[10]。ToF精度受信号带宽和采样率影响,提高带宽和采用超分辨率技术可增强ToF性

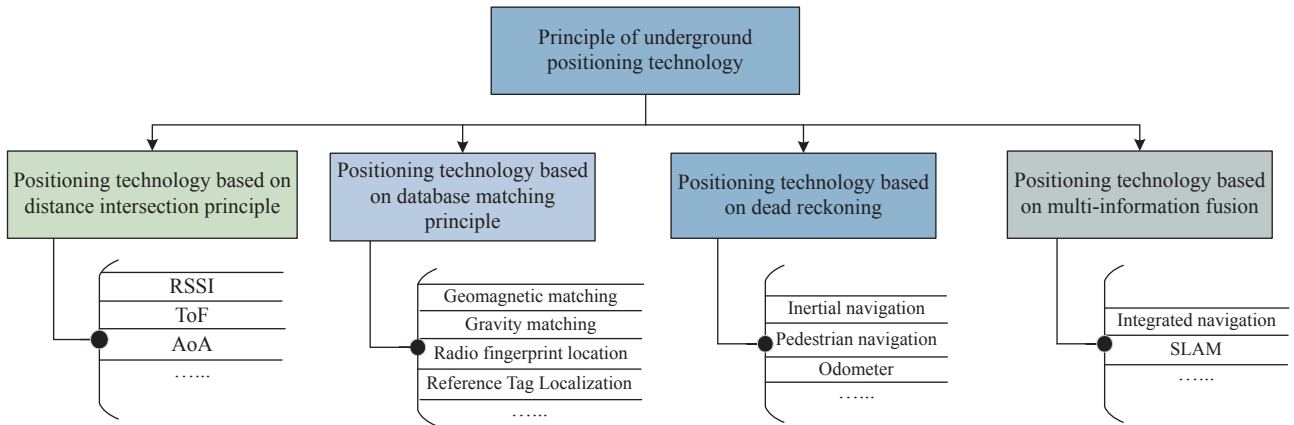


图2 地下定位技术原理分类图

Fig.2 Underground positioning technology: principle classification

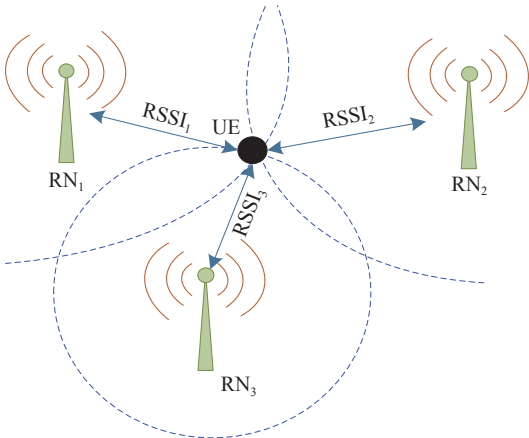


图 3 基于 RSSI 的定位^[7]
Fig.3 RSSI-based localization^[7]

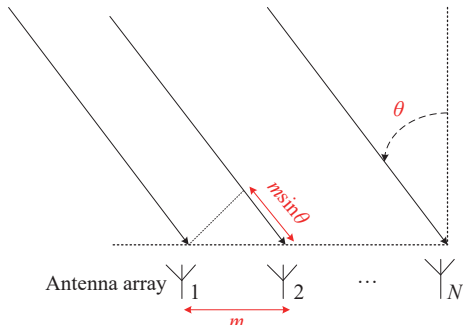


图 4 基于 AOA 的定位^[7]
Fig.4 AoA-based localization^[7]

能^[11]. 多径效应会导致传播路径变长^[12], 增加定位误差.

1.2 基于数据库匹配的定位原理

数据库匹配定位是基于某些天然或者人工物理场分布与位置相关的特性, 构建与位置有关的物理特征数据库, 利用传感器测量到的信号特征

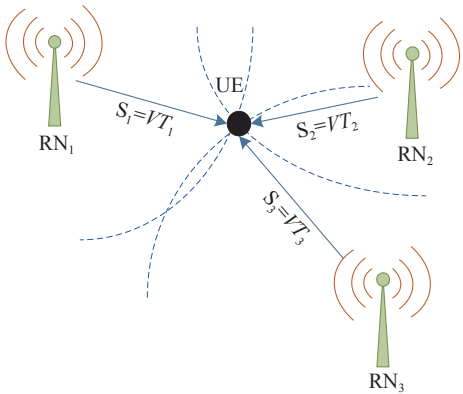


图 5 基于 ToF 的用户设备(UE)定位^[8]
Fig.5 ToF-based user equipment (UE) localization^[8]

与数据库进行匹配, 根据匹配结果获得当前的位置信息. 代表性方案有磁场匹配、重力匹配和无线电指纹匹配. 图 6 以重力匹配为例, 给出了数据库匹配定位的一般框架. 首先, 从原始传感器信号中提取特征向量, 然后, 将多个参考点处的数据特征以及真实位置组合生成数据库. 最后, 将实时测量的特征与数据库中特征进行比较, 根据匹配结果实现定位^[13].

1.2.1 磁场定位

地磁场由地球内部物质运动产生, 其分布与地理位置相关. 地磁匹配通过测量当前位置的地磁场强度和方向, 与预先收集的数据比对匹配. 地球各区域磁场特征不同, 将实测磁场数据与数据库比较, 可确定目标地理位置^[14]. 此外, 人工构建特异性分布的磁场也可实现定位.

磁场定位技术在井下应用需考虑复杂因素, 如地下矿物、金属物体和地质构造等导致的磁场

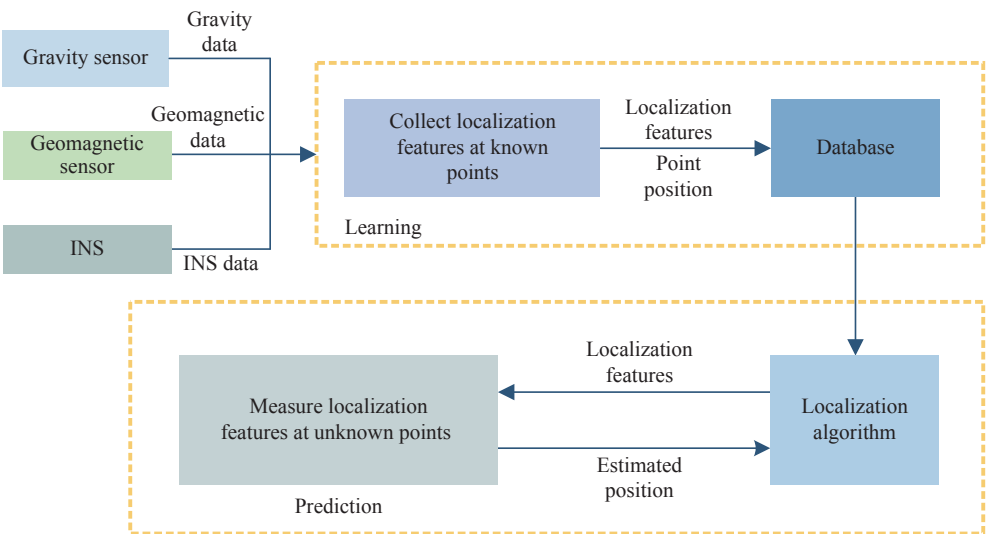


图 6 数据库匹配过程示意图^[13]
Fig.6 Diagram of the database matching process^[13]

干扰. 提高定位精度需研究地质环境影响, 并实施校正补偿. 该技术依赖高灵敏度、高分辨率磁场传感器, 井下环境对传感器性能要求严格. 为确保测量可靠性, 需选用优良传感器. 磁场定位适用于外部干扰较少且电磁特征明显的情况, 同时也可以通过人工磁场的布设来辅助定位^[15].

1.2.2 重力定位

受到万有引力作用, 地球表面物体受到的地球重力场大小和方向随着地球空间位置不同而变化, 据此可以依据重力相关测量结果实现定位^[16]. 重力定位通过测量和分析地球表面上的重力场数据, 与已知的模型或理论进行对比和匹配, 进而获得相应的地理位置. 重力匹配算法是重力辅助导航系统中的关键技术, 常见的重力匹配方法有 TERCOM(Terrain contour matching)算法、ICCP(Iterative closet contour point)算法以及 SITAN(Sandia inertial terrain aided navigation)算法.

1.2.3 无线电指纹定位

无线电指纹定位是利用无线电信号在不同空间位置上的分布特征, 建立无线电信号与位置之间的关系, 通过获取无线电指纹值与信息库进行匹配确定待测点的位置. 指纹定位通常包括两个阶段: 离线采集建立指纹数据库和在线采集无线电指纹进行数据匹配获得待测点位置的估计值^[17]. 在构建井下无线电指纹信息时, 需要提前确定采样点数量和空间分布, 以满足特定应用的需求, 对采样点采集到的指纹数据进行数据预处理和特征选择, 确定采样点位置与无线电指纹信息的匹配关系, 从而建立指纹匹配数据库^[18]. 准确完善的数据库是保证无线电指纹定位性能的关键因素.

1.3 基于航位推算的定位技术原理

航位推算是一种相对导航技术, 其基本原理

是在已知上一时刻的位置基础上, 利用当前时刻测量速度和方向信息来递推计算测量目标当前的位置^[19]. 航位推算类算法的计算是信息累加的过程, 因此会存在误差累积造成长时间定位精度下降的问题. 具有代表性的航位推算类方法包括惯性导航、行人导航以及各种里程计方法.

1.3.1 惯性导航

惯性导航是航位推算定位的范例, 利用包含三轴加速度计和陀螺仪的惯性测量单元配合惯性导航算法实现不依赖外部信息获得载体高频率的姿态、位置、速度等信息^[20]. 图 7 给出了惯性导航惯性解算的原理图, 图中 IMU 表示惯性测量单元, f^b 和 f^n 分别为在载体坐标系和导航坐标系下的比力; 方向余弦矩阵 C_b^n 表示姿态矩阵, 将矢量坐标从载体坐标系 b 变换到导航坐标系坐标系 n ; ω_{ib}^b 表示载体的角速度, ω_{in}^n 是导航坐标系相对惯性坐标系的角速度, ω_{ie}^n 是地球自转角速度, ω_{en}^n 是导航坐标系相对于地心地固坐标系的角速度, g_p^n 是在导航坐标系表示的重力矢量, v^n 表示物体的速度, r^n 表示物体的位置.

惯性导航系统的主要优势在于不需要外部信息辅助即可以获得高频率的姿态、位置、速度等定位信息, 输出连续的定位结果, 如果器件精度高, 能维持较长时间的高精度绝对定位. 高精度惯性导航系统为采煤机等大型装备提供姿态和位置信息, 确保作业安全. 但惯性导航解算涉及积分过程, 且惯性器件存在随机漂移误差, 导致长期定位误差累积. 因此, 虽然短期精度高, 但长期工作需依赖其他手段校正^[21].

1.3.2 行人导航

行人航位推算(PDR)是基于人类行走的步态特点, 利用低成本惯性测量单元感知行进过程中

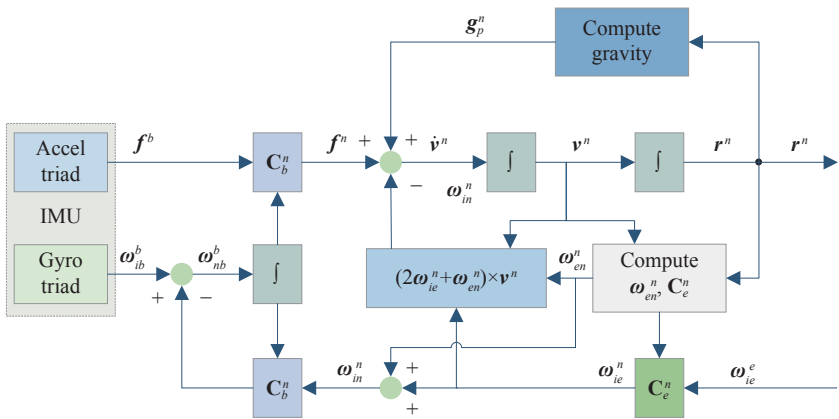


图 7 惯性导航机械编排原理

Fig.7 Principle of inertial navigation mechanical choreography

的加速度、角速度等数据进行步长检测、步长估计以及航向估计, 进而通过递推计算获得当前时刻的位置^[22], 其示意图在图 8 中给出. 如果已知行人的初始位置 $M_0(E_0, H_0)$, 根据解算得到航向角 φ_n 和步长 p_n 信息, 利用式(2)可推算出行人在任意时刻 k 的位置 $M_k(E_k, H_k)$.

$$\begin{cases} E_k = E_0 + \sum_{n=1}^k p_n \sin \varphi_n \\ H_k = H_0 + \sum_{n=1}^k p_n \cos \varphi_n \end{cases} \quad (2)$$

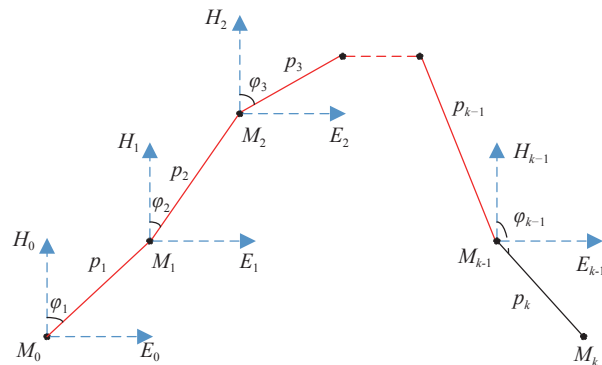


图 8 PDR 原理图^[22]
Fig.8 PDR schematic diagram^[22]

1.3.3 里程计方法

里程计方法是最基础的航位推算方法, 常用来实现二维平面内的推算式定位. 利用传感器来获得运动的距离和方向, 在此基础上进行积分获得当前的位置信息, 包括轮式里程计、视觉里程计和激光里程计几种基本类型. 轮式里程计通常利用机器人每个轮子上的编码器结合轮子之间的结构特征计算速度和航向信息, 是成本低廉但精度较差的定位方式. 为进一步提高定位精度, 可以引入视觉和激光雷达传感器, 通过对于外部环境的感知来反推出自身的位姿变化, 进而实现对自身

位置的推算, 获得更好的定位精度^[23].

1.4 多源信息融合的定位原理

单一类型的定位方式均存在一定的缺陷, 具体而言, 采用基于距离交会的定位方式, 难以获得载体精确的姿态信息, 且在煤矿巷道这类狭窄受限环境下非视距误差(NLOS)问题严重将导致定位精度下降; 采用基于数据库匹配的方式, 不适合采煤工作面这类难以预先建立数据库的场合, 且复杂的电磁环境耦合地面振动, 会导致重力、地磁等定位方式精度下降; 由于地下空间缺乏可靠的 GPS 信号, 难以对航位推算式定位算法进行误差修正. 因此, 采用单一定位手段通常难以满足煤矿智能化需求. 采用合适的手段融合不同类型传感器, 可以实现性能的互补, 常用的多源信息融合定位框架主要有组合导航和 SLAM(Simultaneous localization and mapping)两种.

1.4.1 组合导航

组合导航通常包含至少一种航位推算定位方式, 一般为惯性导航, 在此基础上融合一种或者多种距离交会定位或者数据库定位, 融合算法大都基于卡尔曼滤波框架来进行设计. 根据融合传感器信息的程度不同, 组合导航可以分为松耦合(图 9)和紧耦合方案. 组合导航既能保留航位推算定位的高频率全方面的导航信息输出能力, 又能具有其他定位方式误差有界的特点, 但是缺乏对于环境信息的感知能力^[24].

1.4.2 SLAM

SLAM 算法可以在未知环境中融合视觉、惯性测量单元、激光雷达等多种传感器信息, 增量式地创建地图并基于地图实现对于自身位置和姿态的更新^[25]. SLAM 的数学本质是对运动主体及其环境不确定的估计, 目前有基于滤波和基于图优化两类方法. 基于滤波的方法是在非线性卡尔曼滤

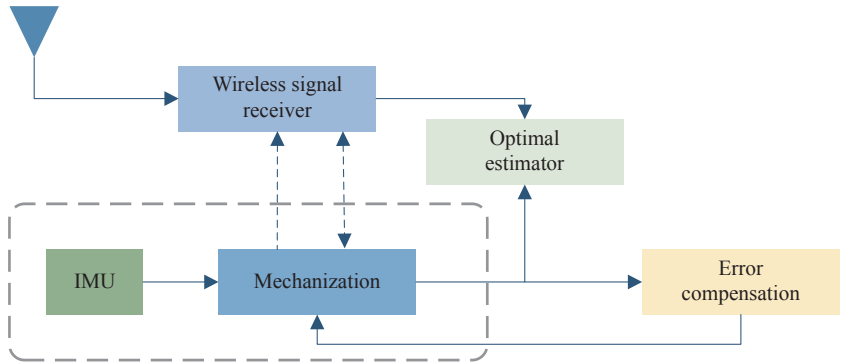


图 9 组合导航中松组合过程示意图^[24]
Fig.9 Schematic of loosely coupled integrated navigation^[24]

波框架下,结合运动学模型,利用含有噪声的传感器数据,从统计学角度降低数据的不确定性。基于图优化的方法,一般包括前端(基于视觉、激光等传感器的里程计)优化、后端优化、地图构建以及回环检测(如果存在重复路径),其中后端优化和

回环检测的主要目的在于抑制噪声,降低定位和建图的漂移。图 10 给出了一般的 SLAM 算法流程图。SLAM 算法可以实现对于运动体自身和周围环境的感知,在未知环境下实现局部的相对定位,在井下环境一般难以获得绝对定位信息。

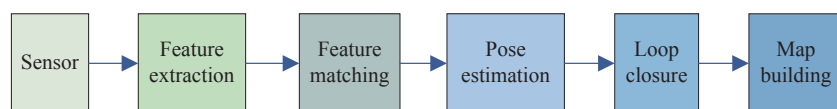


图 10 基础 SLAM 算法流程图

Fig.10 Basic SLAM algorithm flow chart

2 主要技术方案评述

在给出煤矿井下定位的四类技术原理基础上,接下来将对各类定位方案下的代表性传感器方案展开评述。

2.1 基于距离交会原理的定位技术方案

基于距离交会原理的地下空间定位技术方案主要有可见光定位、超声波定位、无线局域网(WLAN)定位、蓝牙定位、超宽带(UWB)定位、红外定位等。

2.1.1 可见光定位

可见光定位通过发光二极管调制发射 400 ~ 800 THz 可见光,结合光学传感器测量位置和方向,实现精准定位。基于 AoA 模式的定位精度最高。此类方案兼具照明和定位功能,成本低、部署便捷,但受限于无法穿透不透明物体,仅能用于视距内定位。可见光定位技术可以通过对现有基于发光二极管的照明设备进行改造,利用智能手机或者专用摄像头来捕获发光二极管灯的信号,从而实现井下人员和重要设备定位,提高安全管理水平。Iturralde 等^[26]提出一种基于三边测量技术的新型可见光定位算法,可实现地下采矿环境中的人员或机器的定位,通过引入参考点来减少位置估计误差。但是,当矿井作业环境中人员数量较多时定位精度较低。Dehghan Firoozabadi 等^[27]提出了一种井下环境多人定位的 3D 三边测量定位方案,采用光学滤波器减少环境光干扰,利用有限脉冲响应滤波器分离光电探测器接收到的叠加信号,可以获得较低的平均定位误差。

2.1.2 超声波定位

超声波定位通常由一对超声波传感器实现,通过测量声波飞行时间来确定距离。优势在于高定位精度、低成本以及一定程度的穿透性。然而,其受温湿度影响较大,可能导致精度下降。超声波

的探测范围通常不超过 5 m。Hammer 等^[28]开发了一种基于 TDoA 的超声定位系统,该系统能够获得矿工的位置、速度和方向信息。在此基础上,Jordaan 等^[29]开发了一种基于 TDoA 的井下超声定位系统,用于 10 m 距离的 2D 定位。为了减小环境噪声带来的定位误差,Pfeil 等^[30]提出了一种在恶劣的地下环境中可以进行精确定位的改进方案。声学定位技术还可用于弥补视觉定位系统的缺点,Xu 等^[31]融合视觉和超声波传感器对地下隧道内的车辆进行定位,提高了定位可靠性与准确性。

2.1.3 WLAN 定位

WLAN 是一种应用广泛的无线通信技术,由于 WLAN 能够同时接收和传输数据,因此可以提供自定位和远程定位,典型定位精度为米级。井下复杂的作业环境引起无线信号衰减严重,进而导致定位精度下降。Yu 等^[32]提出了一种考虑时钟偏差、NLOS 和多径因素的测距补偿模型。Sun 等^[33]和 Cao 等^[34]将测距误差与距离之间的关系作为未知参数采用最小二乘和非线性最小二乘进行拟合补偿。Sun 等^[35]针对井下 WLAN 受到非视距影响严重的问题,构建了半参数测距误差模型,精确建模测距误差分布模型,提高了测距精度。Lin 等^[36]针对井下恶劣环境下由于信号强度剧烈波动导致定位不准确的情况,提出一种将指纹匹配与运动预测相结合的定位算法,提高了算法的精度和稳定性。

2.1.4 蓝牙定位

蓝牙定位与 WLAN 定位基本相似,主要有距离交汇法和指纹匹配法两类。由于蓝牙 4.0 具有低功耗、低成本、易于部署等优势,蓝牙 4.0 成为室内等封闭空间定位研究的热点。Yang 等^[37]在有障碍物的复杂环境下研究了基于聚类阈值的 EWKNN (Enhanced K-weight nearest neighbour) 和基于支持

向量机(SVM)构建分类回归两种算法的定位效果. Wang 等^[38]在 KNN(K-nearest neighbour)算法基础上提出了一种改进的欧氏距离校正算法,并应用于蓝牙定位中,提高了定位结果. 蓝牙 5.1 中引入 AoA 和基于离开角度(AoD)技术后,基于 AoA 手段的蓝牙定位更加普及. 但在矿井下封闭受限且存在大量遮挡的环境下,此技术受限于严重的多径效应,定位误差较大.

2.1.5 UWB 定位

UWB 定位利用短脉冲信号的广泛频谱特性,具有低延迟、强抗多径能力,可实现高精度距离测量和定位. 然而,在受限空间、多路径和遮挡等环境下,UWB 定位精度会明显下降. Kianfar 等^[39]开发了一种 UWB 定位模块用于代替卫星导航信号实现井下定位和避碰. Wang 等^[40]提出了基于遗传算法提高长壁采煤工作面超宽带定位精度的方案. Cao 等^[41]提出了一种时分多址算法来满足煤矿 UWB 定位所需的高测量频率. Fu 等^[42]设计了一种面向 UWB 的基于 Caffery 变换和 Taylor 级数展开的融合定位算法,用于煤矿掘进机的远程姿态检测和自主巡航. 最近, Sa 等^[43]针对矿用单轨吊车定位中的 NLOS 问题,提出了一种基于距离几何约束的 NLOS 修正算法,以提高 UWB 的定位精度. 孟宇等^[44]针对井下环境造成定位不准的问题,对传统三边定位算法进行改进,并提出基站拓扑结构的优化原则,提高了定位精度.

2.2 基于数据库匹配的定位技术方案

2.2.1 磁场匹配技术方案

磁场匹配技术在井下定位应用中的优势在于测量成本较低,能在视觉受限、环境恶劣或长距离需求下提供较为可靠的定位方案. 然而,磁场匹配容易受周围电气设备频繁启停引起的电磁干扰,造成定位不准. 刘公绪和史凌峰^[13]利用地下钢结构引起的地磁异常作为位置参考特征,测绘并建立地下环境磁场特征基准地图,然后通过粒子滤波算法实现对人员位置的估计. 磁场匹配的性能很大程度上与环境磁场分布相关,会出现误匹配现象,在环境磁场特征不明显的区域更是如此. Abrudan 等^[45]提出了一种地下定位系统,利用特殊调制的磁信号在穿越土壤、岩石、混凝土、水等天然材料时无信号衰减,适用于煤矿井下定位. 该系统能估算用户三维位置与方向,与传统基于测距的系统相比,无节点几何形状约束,可实现精确三维定位^[46].

2.2.2 重力匹配技术方案

重力匹配方法需要高精度、高分辨率的重力场测量数据和重力场特征图作为基础,重力特征的丰富与否关系到重力场匹配的定位精度. Wang 等^[47]提出了一种基于粒子滤波器的重力样本向量匹配算法. 针对传统的单点匹配算法的可靠性很容易受到环境干扰的影响导致匹配不准确的问题,在矢量匹配算法中考虑了惯性导航系统相邻采样点之间的相关性,引入了一种基于贝叶斯估计的粒子滤波,克服了传统点匹配算法在某些匹配区域的发散性缺点. 岳灿和官斌^[48]提出了一种基于非线性滤波的重力匹配定位算法,该算法依据重力具备的空间相关性,构造系统状态模型和非线性量测方程,并结合扩展卡尔曼滤波技术和三次曲面拟合技术,利用重力匹配技术来实现系统误差的修正,从而有效重调系统初始位置,能够从根本上解决定位误差长期累积问题,具有良好的研究价值和应用价值.

2.2.3 无线电指纹定位

指纹定位的优势是几乎不需要参考测量点,定位精度相对较高,但缺点是前期离线建立指纹库的工作量巨大,同时很难适应环境变化较大的场景^[49]. Song 和 Qian^[50]提出了基于 VAP(Virtual access Points)方法的地下指纹定位系统,由 AP(Access point)设备、移动设备和定位系统软件组成. 定位系统的核心包括 VAP 生成模块、卡尔曼滤波模块和粒子滤波模块. 在离线阶段,VAP 生成模块从所有 AP 和 T-AP(Target-access point)收集多组 RSS 值,随后计算每个 VAP 的关联系数. 在联机阶段,VAP 根据与其他 AP 的关系生成目标节点的 RSS 值. 接着,这些生成的 RSS 值经过卡尔曼滤波模块和粒子滤波模块的校正,可以有效抑制 RSS 值波动对指纹匹配结果的影响^[51-52]. 图 11 给出了基于 VAP 的定位系统算法流程图.

2.3 基于航位推算的定位技术方案

2.3.1 惯性导航技术

惯性导航的显著优势在于不依赖外部输入、输出信息全面,能够提供高精度的短期导航定位信息^[53]. 能独立工作的惯性导航系统成本较高,主要应用在井下采煤机等大型装备上,提供准确的位姿信息. 主要问题在于,其定位误差随时间发散. 在井下特殊的作业环境下,如何修正惯性导航系统的误差,改善系统的位姿输出精度是当前应用中的主要难点. Fan 等^[54]提出了一种基于无线定位消除捷联惯导系统的累积误差的方案,对采煤机

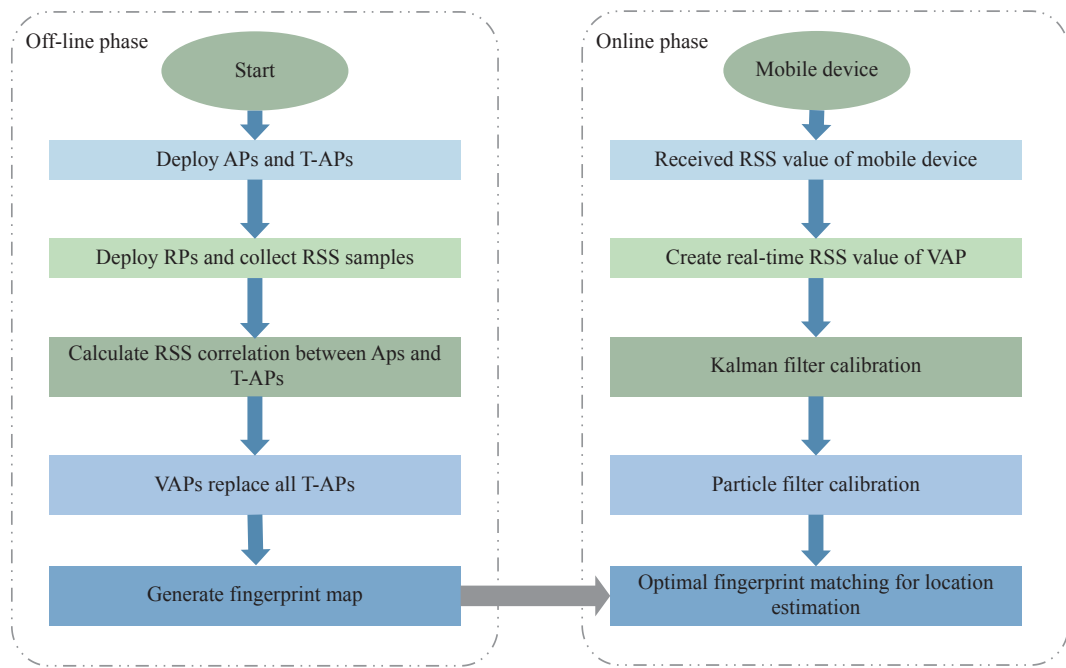


图 11 基于 VAP 的定位系统算法流程

Fig.11 Workflow of the positioning system algorithm based on a virtual access point

姿态和位置的实时跟踪性能进行了仿真和实验验证,定位精度能够达到 0.2 m.

2.3.2 行人导航技术

行人航位推算具有自主性强、硬件依赖度低等特点,可通过穿戴式传感器(如嵌入到矿灯中)或智能手机中的传感器,结合合理的定位算法实现人员定位,这种技术特别适合井下应急救援场景.由于单独使用 PDR 方法在位置估计的精度方面存在一定的劣势,当前研究集中在引入外部信息进行误差修正以及采用更先进的算法提高自身估计精度两方面.沈辉^[55]提出利用 WIFI 定位修正 PDR 定位结果,改善井下定位精度. Feigl 等^[56]使用结合了卷积神经网络、双向循环神经网络和线性卡尔曼滤波器的混合滤波器来改进 PDR 速度估计结果,对运动状态和航向变化具有鲁棒性.

2.3.3 里程计

轮速里程计通过编码器读取车轮旋转信息,测量转速和转角,结合车辆几何参数,实现位移和旋转计算.适用于平滑地面和低速运动.但受轮子打滑、轮胎变形、地面不平等因素影响,累积误差较大,可能导致定位漂移.视觉里程计使用相机或摄像头捕捉环境图像,通过比较相邻帧之间的图像来计算相机的位移和旋转,并利用图像间的特征点来估计相机的运动.视觉里程计通常包括特征提取、特征匹配和运动估计等步骤. Mur-Artal 和 Tardós^[57]提出的基于特征的视觉里程计是一个

典型的算法框架,包括跟踪、建图和回环检测三部分,其中跟踪是指提取新帧图像的特征点并粗略估计相机的姿态;建图是基于束数平差优化局部空间中的特征点和相机位姿,从而获得特征点的空间位置估计值;回环检测基于关键帧进行操作,可以有效消除累积误差.激光里程计采用激光雷达扫描周围环境,利用激光束与周围物体的反射信号测量距离,构建出环境的三维点云地图,通过比较连续帧之间的点云数据计算出载体平台在空间中的位移和旋转.由于激光雷达扫描速度相对较慢,因此通常使用其他传感器,如相机和 IMU 进行速度测量. Yan 等^[58]提出了一种结合视觉与激光雷达的里程计算法,以应对具有挑战性的环境下的定位问题.该方法充分挖掘了相机和激光雷达的各自优势,从而提升了里程计算法的鲁棒性和准确性.

2.4 基于多源信息融合的定位技术方案

以 GPS、北斗为代表的全球导航卫星系统(GNSS)极大便利了日常的定位服务,然而,在煤矿井下环境中,由于导航卫星微弱的电磁信号受到大地遮挡,无法作为导航信号源(图 12).单一的定位技术尚不能同时具备自主安全、输出参数全面且误差不累积的特性,难以全面满足井下各类定位需求.在基于多源信息融合的定位中,基于 IMU 和 UWB 是井下常用的组合导航子系统,基于视觉/激光雷达和 IMU 传感器的 SLAM 方案是井下地图构建和局部定位的主流方案.

2.4.1 UWB/IMU 组合定位技术

UWB/IMU 组合导航利用惯性导航的高精度位姿信息和 UWB 的有界误差定位信号, 实现性能互补^[59]. 在井下环境中, 低成本微机电系统(MEMS)工艺的 IMU 和 UWB 组合适用于成本受限、精度要求不高的场合, 如人员定位; 高精度光纤陀螺 IMU 和 UWB 组合适用于大型装备, 如采煤机、刮板输送机、无人胶轮车等. 在复杂井下环境, 该技术能满足实时性、可靠性和高精度要求的定位场景. 针对 UWB 受非视距影响严重的情况, Tian 等^[60]提出了一种基于粒子滤波算法模型的 UWB/INS (INS 表示惯性导航系统) 融合定位系统, 部署简单且降低了 UWB 的测距误差. 针对惯性传感器误差累积的问题, Benini 等^[61]在基于扩展卡尔曼滤波(EKF)的 UWB/IMU 组合的基础上, 结合视觉传感器对 IMU 的累积误差进行校正. 除此之外, 郁露等^[62]提出了一种基于 UWB 和 IMU 的紧组合定位方法, 引入最小二乘法对 UWB 测距信息进行修正, 将修正后的 UWB 测距信息和惯导信息通过误差状态卡尔曼滤波(ESKF)进行融合, 有效降低了 UWB 的非视距误差, 其原理如图 13 所示.

2.4.2 视觉/激光 SLAM 技术

SLAM 算法通过同时估算自身位置和环境特征点位置实现定位, 利用视觉或激光雷达与 IMU 构建地图. 激光雷达 SLAM 算法将矿井环境数据转为地图, 为路径规划和运动控制提供决策依据. 视觉/激光 SLAM 技术应用于救援机器人和无人驾驶辅助运输车等, 无需先验信息实现精确定位和环境感知. 针对井下巷道结构的特点, Wu 等^[63]提出一种基于点和线特征的二维激光雷达 SLAM 算法, 并基于地下矿卡进行了实验验证. 马宏伟等^[64]提出了一种基于深度相机的 SLAM 算法, 采用红绿蓝-深度相机(RGB-D)采集带有深度的视觉数据实现地图创建与自主定位, 据此实现路径规划. 为了便于对比不同定位技术的优缺点, 表 1 中给出了不同定位技术方案的典型传感器的精度、成本以及主要优缺点, 以期为实际应用中的技术选择提供参考.

3 主要挑战

近年来随着导航定位技术的发展, 有力支撑

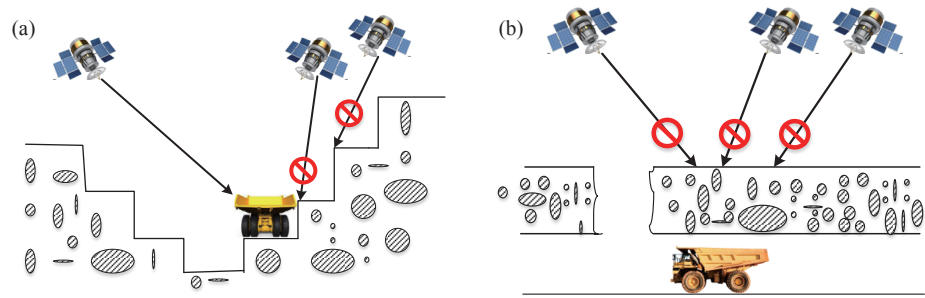


图 12 全球导航卫星系统信号在不同环境下的信号衰减情况. (a)深露天矿中; (b)地下矿山中

Fig.12 Attenuation of GNSS signals under different environment: (a) deep open cast mine; (b) underground mine

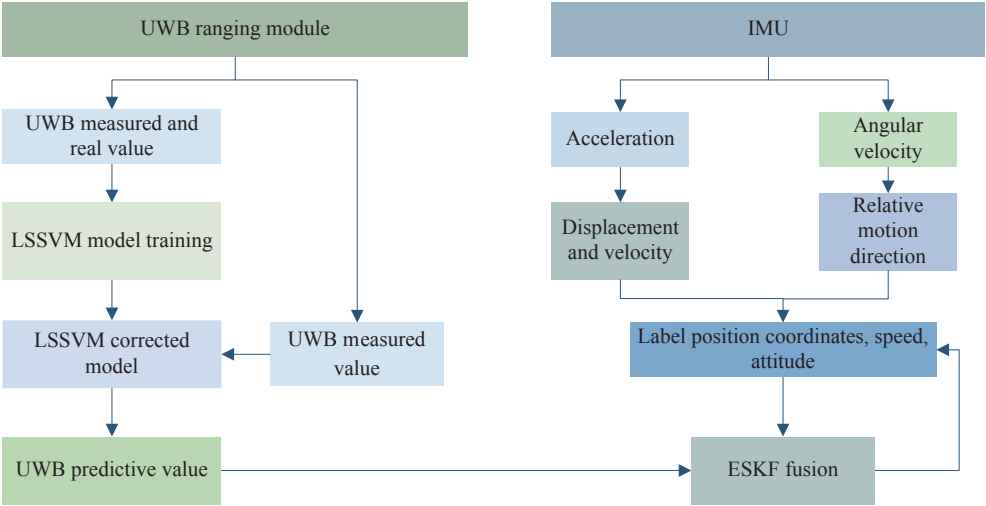


图 13 基于 UWB 和 IMU 的煤矿机器人紧组合定位方法原理^[62]

Fig.13 Principle of the tightly coupled positioning method for coal mine robots based on UWB and IMU^[62]

表 1 不同定位技术方案的总结

Table 1 Summary of different positioning technology solutions

Technology	Positioning accuracy	Relative cost	Advantages	Shortcomings
Visible light	1–2 m	Low	It can rely on the LED lights already deployed in the room and is not affected by radio wave interference.	Accuracy suffering from non-line-of-sight problems
Ultrasonic wave	1–10 cm	High	High positioning accuracy	Affected by ambient temperature and humidity, short transmission distance
WLAN	2–50 m	Low	The cost is low, and it has a strong communication capability.	Susceptible to environmental disturbances
Bluetooth	2–10 m	Low	The equipment is small in size, easy to integrate and easy to popularize.	Short propagation distance and poor stability
UWB	10–30 cm	High	High accuracy, strong anti-interference capability, and low power consumption	High cost and low coverage
Terrestrial magnetism	1–5 m	Low	High reliability without interference	Difficult to build the geomagnetic map in advance
Inertial navigation	Cumulative error	Expensive	Independent of external circumstances, have comprehensive output with high frequency	With cumulative errors, not suitable for long-term use
UWB/IMU	10–30 cm	Expensive	Information is comprehensive and not divergent, less affected by interference.	High cost and lack of environmental awareness ability
SLAM	Cumulative error	High	Real-time positioning and map building without prior information	High terminal and base station costs, greatly affected by dust and light

了无人驾驶、露天开采、仓库管理等特定场景的定位需求. 由于煤矿井下环境的复杂性和作业的特殊性, 实现准确可靠的定位还存在诸多挑战:

(1) 复杂作业空间与恶劣电磁环境导致传统定位方法误差增大. 煤矿井下电磁信号经历极端损耗、非视距传播、多径衰落、环境噪声及波导效应, 对地下空间定位带来挑战. 巷道狭窄多转折, 存在众多管道、电线、设备及人员, 工作面粉尘震动导致无线信号反射、折射和衍射, 影响定位精度. RSSI、TDoA、AoA 等方法依赖参考节点信号获取位置估计, 在多径效应下, 接收机难以获取真实距离等信息^[65]. 因此, 亟需针对井下复杂环境设计完善射频、天线等硬件及信道检测、信道估计、位置估计等算法.

(2) 缺乏可靠绝对定位信号导致推算式定位方法校正困难. 由于煤矿地下结构的复杂性以及电磁信号传输的局限性, 导致井下推算式定位无法直接使用 GNSS 或者类似技术进行校正^[66]. 工作面设备工作在震动频繁的物理环境中, 会进一步加剧系统定位误差^[66]. 可以考虑结合采煤过程的运动特性、工人动作的特性、运输设备的轨道约束等作为辅助信息, 在不引入其他信号源基础上改善推算式定位方法的性能.

(3) 井下特殊的作业环境导致多源信息融合算法性能下降. 巷道内部缺乏显著的特征点, 工作面粉尘多、照明不良, 会导致以 SLAM 框架为主的融合定位中激光雷达和视觉传感器感知能力下降, 引起定位漂移加速. 井下复杂受限空间导致基于

距离交汇类定位方式误差增大, 且噪声特性偏离高斯分布, 引起组合导航类融合定位效果下降. 亟需针对井下作业环境探索新的融合定位框架, 针对性地改进融合算法^[67–69].

(4) 井下定位系统缺乏标准性指导意见, 导致各类传感器指标参数规则不一, 为后续的融合和使用带来困难^[70]. 关于一般井下设备的定位系统还缺乏相关标准, 煤矿井下对于防爆的特殊要求导致各类常规传感器需要针对性的安全设计^[71]. 亟需出台全面的指导性和强制性标准来提高井下定位传感器兼容性, 便利设备的智能化和无人化改造.

(5) 高精度定位设备的复杂性与运维人员技能之间的矛盾. 以采煤机使用的高精度惯性导航为例, 该系统需定期校正, 无论是采用全站仪还是布设新无线传感器节点都具有较高的专业性和技术门槛, 对一般作业人员具有挑战性^[72]. 亟需在保证定位精度的同时, 降低操作难度和维护成本.

4 发展趋势

随着相关技术的不断更新以及社会和企业自身发展对于煤矿智能化的需求, 大量井下定位系统已经投入到实际生产中. 由于煤矿井下环境的复杂性, 井下定位在精度和可靠性等指标上仍有很大提升空间. 针对其面临的诸多挑战, 本文认为可以从以下几个方面来进一步提升定位系统的性能.

(1) 借助多系统之间协同提升整体定位效果. 由于井下环境实现高精度实时定位所需要的设备

昂贵, 采用多台装备(设备)之间的协同, 利用携带高精度定位系统的装备通过信息交互和相对信息测量, 来进一步修正其他低精度导航装备的定位信息, 可以以较低的成本提升定位性能。

(2) 探索基于类脑仿生传感器实现导航定位。对于复杂多变的煤矿井下环境, 可以借鉴动物在未知环境中智能高效的自主定位能力^[73], 分析动物大脑中与空间认知机制相关的结构, 在行为和机理上采用结构仿脑、机制类脑的方法, 得到类脑定位算法, 结合仿生传感器融合, 模拟动物感知系统, 根据视觉、地磁、声波、气味等数据信息提供自身周围环境信息^[74]。利用神经形态芯片平台对得到的环境信息根据类脑定位算法进行计算, 从软件和硬件两个方面模拟动物自主定位能力, 实现煤矿井下设备精确定位。

(3) 保证井上井下无缝定位能力。通过多源无缝定位系统可以得到井上井下连续精确的设备位置信息, 结合不同定位方式, 根据所处场景不同利用信息融合算法切换合适的定位方式, 可实现井上井下不间断定位。在煤矿生产中, 整合井上井下设备位置信息有利于加强安全管理及提高生产效率。

(4) 保障灾害场景设备断电断网后定位能力。现有井下定位技术如 UWB、射频识别(RFID)、WLAN、惯性导航系统等大多依赖外部供电, 事故情况下很难保障受灾区域供电。应急救援场景下, 被困人员和救援人员可靠位置信息是影响救援决策和救援实施的关键依据。部分学者开展对井下地磁定位的研究^[75], 地磁定位具有自主、无源的特点, 可以实现断电断网情况下的设备定位, 摆脱煤矿井下定位系统对电源和网络的依赖, 提高系统在突发状况下的工作能力。但是地磁定位易受周围电气设备干扰, 且需要地磁分布的先验信息, 探索更一般的应急救援场景下的定位保障系统有重要意义。

(5) 加强设备位置信息隐私保护。在煤矿井下调度以及管理系统中, 服务器根据传送的设备位置信息进行计算, 以此提供基于位置的服务^[76]。在缺失隐私安全保护机制的情况下, 攻击者可能会从设备端、数据传输过程、服务器三个部分窃取相关位置隐私, 造成煤矿井下设备位置信息泄露, 除可能造成生产和运行信息泄露外, 严重时会导致安全事故。在煤矿井下定位系统建设中考考虑位隐私保护机制, 加强数据安全性, 也是一项重要工作^[77]。

5 总结

在复杂多变的国际局势下, 能源的自主可控事关经济发展命脉安全。我国以煤为主的能源结构决定了煤炭行业智能化建设是稳定能源供给的关键, 地下空间定位技术是煤矿智能化至关重要的一环。本文总结了煤矿地下空间四类主要定位技术方案, 包括以 AoA、RSSI、ToA、ToF 为代表的基于距离交会原理的定位技术, 以地磁匹配、重力匹配以及无线电指纹定位为代表的基于数据库匹配原理的定位技术, 以惯性导航、行人导航、里程计方法为代表的基于推算的定位技术, 以及以组合导航和 SLAM 为代表的基于多源信息融合的定位技术, 并针对不同的定位技术原理给出了代表性的技术方案。指出煤矿井下复杂特殊的作业环境下面临绝对定位方式误差增大、推算式定位校正困难、多源融合式定位方法性能下降以及全面的标准指导匮乏等挑战, 未来可以考虑采用多系统协同提高定位能力, 引入类脑仿生导航探索新的定位方案, 提升无缝定位、应急定位能力, 此外还应考虑定位系统的隐私保护问题, 提升系统安全性。

参 考 文 献

- [1] Wang G F, Liu H, Wang D D, et al. High-quality energy development and energy security under the new situation for China. *Bull Chin Acad Sci*, 2023, 38(1): 23
(王国法, 刘合, 王丹丹, 等. 新形势下我国能源高质量发展与能源安全. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 23)
- [2] Ge S R, Hu E Y, Li Y W. New progress and direction of robot technology in coal mine. *J China Coal Soc*, 2023, 48(1): 54
(葛世荣, 胡而已, 李允旺. 煤矿机器人技术新进展及新方向. 煤炭学报, 2023, 48(1): 54)
- [3] National Mine Safety Administration. Catalogue of key research and development of coal mine robots [J/OL]. *National Mine Safety Administration* (2019-01-02) [2023-12-07]. https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxgk/fdzdgknr/tzgg/201901/t20190109_349156.shtml
(国家煤矿安全监察局. 煤矿机器人重点研发目录. [J/OL]. 国家矿山安全监察局 (2019-01-09) [2023-12-07]. https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxgk/fdzdgknr/tzgg/201901/t20190109_349156.shtml)
- [4] National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, et al. Notice on issuing the "Guiding Opinions on Accelerating the Intelligent Development of Coal Mines" [J/OL]. *www.gov.cn* (2020-02-25) [2023-12-07]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/05/content_5487081.

- htm
(国家发展和改革委员会, 国家能源局, 应急部, 等. 关于印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》的通知[J/OL]. 中华人民共和国中央人民政府网 (2020-02-25) [2023-12-07]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/05/content_5487081.htm)
- [5] National Energy Administration, National Mine Safety Administration. Notice on issuing “ the Guide for Intelligent Construction of Coal Mines (2021 Edition)” [J/OL]. www.gov.cn/2021-06/05/ [2023-12-07]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-06/19/content_5619502.htm
(国家能源局, 国家矿山安全监察局. 关于印发《煤矿智能化建设指南(2021年版)》的通知[J/OL]. 中华人民共和国中央人民政府网 (2021-06-05) [2023-12-07]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-06/19/content_5619502.htm)
- [6] Hu Q S, Meng C L, Li S Y, et al. Research status and prospects of perception technology for unmanned mining vehicle driving environment. *J Mine Autom*, 2023, 49(6): 128
(胡青松, 孟春蕾, 李世银, 等. 矿井无人驾驶环境感知技术研究现状及展望. 工矿自动化, 2023, 49(6): 128)
- [7] Zafari F, Gkelias A, Leung K K. A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2019, 21(3): 2568
- [8] Zhao Y F, Yin S J, Tao W, et al. Gesture recognition system resilient to interdevice interference based on direct sequence spread spectrum. *IEEE Sens Lett*, 2023, 7(5): 1
- [9] Sarin A, Avestruz A T. A framework for code division multiple access wireless power transfer. *IEEE Access*, 2021, 9: 135079
- [10] Huang Y, Xu J, Zhu C, et al. Precise encoding complexity control for versatile video coding. *IEEE Trans Broadcast*, 2022, 69(1): 33
- [11] Dargie W, Poellabauer C. *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*. New York: John Wiley & Sons, 2011
- [12] Seguel F, Palacios-Játiva P, Azurdia-Meza C A, et al. Underground mine positioning: A Review. *IEEE Sens J*, 2022, 22(6): 4755
- [13] Liu G X, Shi L F. Review on the development of indoor navigation and positioning technology. *J Navig Position*, 2018, 6(2): 7
(刘公绪, 史凌峰. 室内导航与定位技术发展综述. 导航定位学报, 2018, 6(2): 7)
- [14] Liu J W, Wang G, Li L, et al. A magnetic beacon navigation and positioning technology not relying on GPS // *Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*. Harbin, 2018: 861
- [15] Ortner M, Ribeiro M, Spitzer D. Absolute long-range linear position system with a single 3-D magnetic field sensor. *IEEE Trans Magn*, 2018, 55(1): 1
- [16] Wang A M, Li S S, Fan D, et al. Research on real-time acquisition and simulation technology of underwater dynamic gravity data. *Hydrogr Surv Charting*, 2022, 42(1): 18
(王微明, 李姗姗, 范雕, 等. 水下动态重力数据实时采集仿真技术研究. 海洋测绘, 2022, 42(1): 18)
- [17] Li L, Ding E J, Hao L N, et al. An improved fingerprint location fingerprint localization matching algorithm in coal mine. *Chin J Sens Actuat*, 2014, 27(3): 388
(李论, 丁恩杰, 郝丽娜, 等. 一种改进的煤矿井下指纹定位匹配算法. 传感技术学报, 2014, 27(3): 388)
- [18] Liang T H. *Research on Fingerprint Location Method in Coal Mine Underground* [Dissertation]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022
(梁天河. 煤矿井下指纹定位方法研究[学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2022)
- [19] Mohamed S A S, Haghbayan M, Westerlund T, et al. A survey on odometry for autonomous navigation systems. *IEEE Access*, 2019, 7: 97466
- [20] El-Sheimy N, Youssef A. Inertial sensors technologies for navigation applications: State of the art and future trends. *Satell Navig*, 2020, 1(1): 2
- [21] Shen K, Zuo J, Li Y, et al. Observability analysis and optimization of cooperative navigation system with a low-cost inertial sensor array. *IEEE Internet Things J*, 2023, 10(11): 9863
- [22] Yan W, Niu X J, Kuang J. An indoor positioning method of coded light+PDR combination for smartphones. *Bull Surv Mapp*, 2019(5): 7
(闫伟, 牛小骥, 旷俭. 光源编码+PDR 组合的室内行人定位方法. 测绘通报, 2019(5): 7)
- [23] Wu Y X, Zhang A J, Yang M. Pedestrian heading angle estimation based on improved Kalman filter. *Nav Position Timing*, 2023, 10(2): 100
(吴艺旋, 张爱军, 杨萌. 基于改进卡尔曼滤波算法的行人航向角估计. 导航定位与授时, 2023, 10(2): 100)
- [24] Wang S Y, Tu R, Li B F, et al. Tight integration kinematic PPP-AR using GPS/Galileo/QZSS overlapping frequency signals and its performance in high-shade environments. *Remote Sens*, 2023, 15(2): 485
- [25] Leonard J J, Durrant-Whyte H F. Mobile robot localization by tracking geometric beacons. *IEEE Trans Robot Automat*, 1991, 7(3): 376
- [26] Iturralde D, Azurdia-Meza C, Krommenacker N, et al. A new location system for an underground mining environment using visible light communications // *2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign (CSNDSP)*. Manchester, 2014: 1165
- [27] Dehghan Firoozabadi A, Azurdia-Meza C, Soto I, et al. A novel frequency domain visible light communication (VLC) three-dimensional trilateration system for localization in underground mining. *Appl Sci*, 2019, 9(7): 1488
- [28] Hammer F, Pichler M, Fenzl H, et al. An acoustic position estimation prototype system for underground mining safety. *Appl Acoust*, 2015, 92: 61
- [29] Jordaan J P, Kruger C P, Silva B J, et al. An ultrasonic-based localization system for underground mines // *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*.

- Emden, 2017: 141
- [30] Pfeil R, Pichler M, Schuster S, et al. Robust acoustic positioning for safety applications in underground mining. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2015, 64(11): 2876
- [31] Xu Z R, Yang W, You K, et al. Vehicle autonomous localization in local area of coal mine tunnel based on vision sensors and ultrasonic sensors. *PLoS One*, 2017, 12(1): e171012
- [32] Yu Y, Chen R, Chen L, et al. A robust dead reckoning algorithm based on Wi-Fi FTM and multiple sensors. *Remote Sen*, 2019, 11(5): 504
- [33] Sun M, Wang Y J, Xu S L, et al. Indoor positioning tightly coupled Wi-Fi FTM ranging and PDR based on the extended Kalman filter for smartphones. *IEEE Access*, 2020, 8: 49671
- [34] Cao H, Wang Y, Bi J, et al. Indoor positioning method using WiFi RTT based on LOS identification and range calibration. *ISPRS Int J Geo Inf*, 2020, 9(11): 627
- [35] Sun M, Wang Y J, Huang L, et al. Simultaneous WiFi ranging compensation and localization for indoor NLoS environments. *IEEE Commun Lett*, 2022, 26(9): 2052
- [36] Lin C H, Chen L H, Wu H K, et al. An indoor positioning algorithm based on fingerprint and mobility prediction in RSS fluctuation-prone WLANs. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2021, 51(5): 2926
- [37] Yang B, Dai C H, Ye H Y, et al. Research on high precision indoor positioning method based on low power bluetooth technology // 2020 6th International Conference on Big Data and Information Analytics. Shenzhen, 2020: 133
- [38] Wang Y K, Yang Q Y, Zhang G R, et al. Indoor positioning system using Euclidean distance correction algorithm with bluetooth low energy beacon // 2016 International Conference on Internet of Things and Applications. Pune, 2016: 243
- [39] Kianfar A E, Uth F, Baltes R, et al. Development of a robust ultra-wideband module for underground positioning and collision avoidance. *Min Metall Explor*, 2020, 37(6): 1821
- [40] Wang S J, Wang S B, Liu W L, et al. A study on the optimization nodes arrangement in UWB localization. *Measurement*, 2020, 163: 108056
- [41] Cao Y J, Chen C, St-Onge D, et al. Distributed TDMA for mobile UWB network localization. *IEEE Internet Things J*, 2021, 8(17): 13449
- [42] Fu S, Li Y, Zhang M, et al. Ultra-wideband pose detection system for boom-type roadheader based on Caffery transform and Taylor series expansion. *Meas Sci Technol*, 2018, 29(1): 15101
- [43] Sa Y J, Zhu Z C, Shen G, et al. NLOS mitigation algorithm by distance geometric constrain for mine-used underground monorail crane localization. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2023, 72: 1
- [44] Meng Y, Xiao X F, Zhao K. An underground localization algorithm and topology optimization based on ultra-wideband. *Chin J Eng*, 2018, 40(6): 743
(孟宇, 肖小凤, 赵坤. 基于 UWB 的地下定位算法和拓扑优化. 工程科学学报, 2018, 40(6): 743)
- [45] Abrudan T E, Xiao Z, Markham A, et al. Underground incrementally feployed magneto-inductive 3-D positioning network. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2016, 54(8): 4376
- [46] Wang H H, Hao M, Zhuang W Q. Application of GNSS real-time satellites clock offset estimation in seismic monitoring. *Nav Position Timing*, 2023, 10(3): 108
(王浩浩, 郝明, 庄文泉. GNSS 实时卫星钟差估计在地震监测中的应用. 导航定位与授时, 2023, 10(3): 108)
- [47] Wang B, Zhu J W, Deng Z H, et al. A characteristic parameter matching algorithm for gravity-aided navigation of underwater vehicles. *IEEE Trans Ind Electrons*, 2019, 66(2): 1203
- [48] Yue C, Guan B. A gravity matching positing algorithm based on nonlinear filter. *Ship Electron Eng*, 2021, 41(3): 55
(岳灿, 官斌. 一种基于非线性滤波的重力匹配定位算法. 舰船电子工程, 2021, 41(3): 55)
- [49] Luo H, Feng T Z, Yu J K, et al. Crowdsensing location method of mining-induced seismicity based on the phone mobile sensor network. *Chin J Eng*, 2022, 44(12): 2017
(罗浩, 冯天真, 于靖康, 等. 基于手机移动传感网络的矿震群智定位方法. 工程科学学报, 2022, 44(12): 2017)
- [50] Song M Z, Qian J S. Underground coal mine fingerprint positioning based on the MA-VAP method. *Sensors*, 2020, 20(18): 5401
- [51] Labinghisa B, Park G S, Lee D M. Performance analysis of localization algorithm using virtual access points and Kalman filter in indoor Wi-Fi environment. *Korean Inst Commun Info Sci*, 2017, 42: 1463
- [52] Lee D M, Labinghisa B. Indoor localization system based on virtual access points with filtering schemes. *Int J Distrib Sens Netw*, 2019, 15(7): 812339381
- [53] Wang W. Status and development trend of inertial technology. *Acta Autom Sin*, 2013, 39(6): 723
(王巍. 惯性技术研究现状及发展趋势. 自动化学报, 2013, 39(6): 723)
- [54] Fan Q G, Li W, Hui J, et al. Integrated positioning for coal mining machinery in enclosed underground mine based on SINS/WSN. *Sci World J*, 2014, 2014: 1
- [55] Shen H. *Research on Downhole Positioning Technology Based on UWB/PDR* [Dissertation]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021
(沈辉. 基于 UWB/PDR 的井下定位技术研究[学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2021)
- [56] Feigl T, Kram S, Woller P, et al. RNN-aided human velocity estimation from a single IMU. *Sensors*, 2020, 20(13): 3656
- [57] Mur-Artal R, Tardós J D. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras. *IEEE Trans Robot*, 2017, 33(5): 1255
- [58] Yan M, Wang J Z, Li J, et al. Loose coupling visual-lidar odometry by combining VISO₂ and LOAM // 2017 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian, 2017: 6841
- [59] Gao Z Z, Li Y, Chen L. An ultra-wideband based credible indoor

- positioning method by considering geometry-distribution and NLOS signal. *Navig Position Timing*, 2023, 10(2): 16
(高周正, 李岩, 陈琳. 顾及空间分布和 NLOS 的 UWB 室内可信定位方法. 导航定位与授时, 2023, 10(2): 16)
- [60] Tian Q L, Wang K I K, Salcic Z. An INS and UWB fusion approach with adaptive ranging error mitigation for pedestrian tracking. *IEEE Sens J*, 2020, 20(8): 4372
- [61] Benini A, Mancini A, Longhi S. An IMU/UWB/Vision-based Extended Kalman Filter for Mini-UAV Localization in Indoor Environment using 802.15.4a Wireless Sensor Network. *J Intell Rob Syst*, 2013, 70(1): 461
- [62] Yu L, Tang C L, Huang Y R, et al. Research on tightly combined positioning method of coal mine robot based on UWB and IMU. *Ind Mine Autom*, 2022, 48(12): 79
(郁露, 唐超礼, 黄友锐, 等. 基于 UWB 和 IMU 的煤矿机器人紧组合定位方法研究. 工矿自动化, 2022, 48(12): 79)
- [63] Wu D, Meng Y, Zhan K, et al. A LIDAR SLAM based on point-line features for underground mining vehicle // 2018 *Chinese Automation Congress*. Xian, 2018: 2879
- [64] Ma H W, Wang Y, Yang L. Research on depth vision based mobile robot autonomous navigation in underground coal mine. *J China Coal Soc*, 2020, 45(6): 2193
(马宏伟, 王岩, 杨林. 煤矿井下移动机器人深度视觉自主导航研究. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2193)
- [65] Thrybom L, Neander J, Hansen E, et al. Future challenges of positioning in underground mines. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, 48(10): 222
- [66] Cui Y, Liu S, Liu Q. Navigation and positioning technology in underground coal mines and tunnels: A review. *J S Afr Inst Min Metall*, 2021, 121: 295
- [67] Wang G Q, Yang C Y, Ma L et al. Nonlinear Kalman filter based on gaussian-generalized-hyperbolic mixing distribution. *Acta Autom Sin*, 2023, 49(2): 448
(王国庆, 杨春雨, 马磊, 等. 基于高斯-广义双曲混合分布的非线性卡尔曼滤波. 自动化学报, 2023, 49(2): 448)
- [68] Wang G, Yang C Y, Ma L. Distributed robust state estimation for nonlinear systems based on multivariate Laplace distribution. *Acta Electron Sin*, 2020, 50(11): 2610
(王国庆, 杨春雨, 马磊. 基于多变量 Laplace 分布的非线性系统分布式鲁棒状态估计. 电子学报, 2022, 50(11): 2610)
- [69] Wang G Q, Yang C Y, Ma X P. A novel robust nonlinear Kalman filter based on multivariate Laplace distribution. *IEEE Trans Circuits Syst II Express Briefs*, 2021, 68(7): 2705
- [70] Candell R, Kashef M, Liu Y, et al. Industrial wireless systems guidelines: Practical considerations and deployment life cycle. *IEEE Ind Electron Mag*, 2018, 12(4): 6
- [71] Zhu D X, Yi K C. EKF localization based on TDOA/RSS in underground mines using UWB ranging // 2011 *IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing*. Xi'an, 2011: 1
- [72] Kanellakis C, Mansouri S S, Georgoulas G, et al. Towards autonomous surveying of underground mine using MAVs // *Proceedings of the 28th International Conference on Robotics. AlpeAdria*, 2018: 173
- [73] Wang S L, Almansa C M, Queralta J P, et al. UWB-based localization for multi-UAV systems and collaborative heterogeneous multi-robot systems. *Procedia Comput Sci*, 2020, 175: 357
- [74] Liu X, Guo X, Zhao D, et al. INS/vision integrated navigation system based on a navigation cell model of the hippocampus. *Appl Sci*, 2019, 9(2): 234
- [75] Wang J H, Guo Y F, Guo L W, et al. Performance test of MPMD matching algorithm for geomagnetic and RFID combined underground positioning. *IEEE Access*, 2019, 7: 129789
- [76] Asuquo P, Cruickshank H, Morley J, et al. Security and privacy in location-based services for vehicular and mobile communications: An overview, challenges, and countermeasures. *IEEE Internet Things J*, 2018, 5(6): 4778
- [77] Wang S, Jin L Z, Ou S N, et al. Prediction model of human comfort index in underground emergency refuge facilities. *Chin J Eng*, 2015, 22(5): 551
(汪澍, 金龙哲, 欧盛南, 等. 井下紧急避险设施内人体舒适度预测模型. 工程科学学报, 2015, 22(5): 551)