



地下空间无人系统研究综述

王军, 王佳慧, 李玉莲, 陈世海, 吴保磊

引用本文:

王军,王佳慧,李玉莲,陈世海,吴保磊. 地下空间无人系统研究综述[J]. 智能系统学报, 2024, 19(1): 2–21.

WANG Jun, WANG Jiahui, LI Yulian, et al. Review of unmanned systems research in underground space[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2024, 19(1): 2–21.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202304035>

您可能感兴趣的其他文章

双向通信无人机集群领航顶点选取方法

Leaders' selection for UAV swarm with two-way communication

智能系统学报. 2021, 16(3): 484–492 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202006010>

人机智能技术及系统研究进展综述

A survey of recent advances in human-robot intelligent systems

智能系统学报. 2020, 15(2): 386–398 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201912001>

系统可靠-失效模型的哲学意义与智能实现

Philosophical significance and implementation of an intelligent system based on the system reliability-failure model

智能系统学报. 2020, 15(6): 1104–1112 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202003047>

基于改进D*算法的无人机室内路径规划

UAV indoor path planning based on improved D* algorithm

智能系统学报. 2019, 14(4): 662–669 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201803031>

空间故障树与因素空间融合的智能可靠性分析方法

Intelligent reliability analysis method based on space fault tree and factor space

智能系统学报. 2019, 14(5): 853–864 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201807022>

深度学习在无人驾驶汽车领域应用的研究进展

Deep learning in driverless vehicles

智能系统学报. 2018, 13(1): 55–69 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201609029>

DOI: 10.11992/tis.202304035

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1538.TP.20240102.1657.004>

地下空间无人系统研究综述

王军^{1,2,3}, 王佳慧¹, 李玉莲¹, 陈世海¹, 吴保磊³

(1. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 地下空间智能控制教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116; 3. 江苏省地下空间智能感知与无人系统创新平台, 江苏 徐州 221116)

摘要: 地下空间作为人类活动空间不可分割的部分, 是继宇宙空间、海洋资源外可开拓的第三大领域, 也是继陆、海、空、天、电、网之后的第七维战略空间。无人系统通过跨域协同合作可涌现出单个主体难以实现的智能水平, 在地下空间发挥关键作用。本文针对地下空间无人系统相关需求, 围绕地下空间各领域相关研究进展, 梳理其关键技术研究现状及未来发展趋势。介绍了地下矿井无人开采系统、地下轨道交通无人系统、地下管廊综合管理系统、地下空间无人作战系统的国内外研究现状; 对地下空间通信、地下空间态势感知、自主导航定位及集群协同控制关键技术进行概述, 并指出现存的问题; 对地下空间无人系统未来发展趋势进行了展望。

关键词: 地下空间; 无人系统; 跨域协同; 可靠通信; 态势感知; 集群协作; 自主规划; 智能交互

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2024)01-0002-20

中文引用格式: 王军, 王佳慧, 李玉莲, 等. 地下空间无人系统研究综述 [J]. 智能系统学报, 2024, 19(1): 2-21.

英文引用格式: WANG Jun, WANG Jiahui, LI Yulian, et al. Review of unmanned systems research in underground space [J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2024, 19(1): 2-21.

Review of unmanned systems research in underground space

WANG Jun^{1,2,3}, WANG Jiahui¹, LI Yulian¹, CHEN Shihai¹, WU Baolei³

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Engineering Research Center of Intelligent Control for Underground Space, Ministry of Education, Xuzhou 221116, China; 3. Jiangsu Province Platform for Innovative Research of Intelligent Perception and Unmanned System for Underground Space, Xuzhou 221116, China)

Abstract: As an integral part of human activity space, underground space is the third largest area that can be developed after cosmic space and ocean resources, as well as the seventh-dimension strategic space after land, sea, air, space, electricity, and network. Unmanned systems play a key role in the underground space by collaborating across domains, and it can emerge with a level of intelligence that is difficult for a single subject to realize. In response to related requirements of underground space unmanned systems, the current research progress and future development trends of key technologies in various fields of underground space are summarized. First, the research status of domestic and international unmanned mining systems in underground mines, unmanned systems for underground rail transit, comprehensive management systems for underground pipelines, and unmanned combat systems for underground spaces are introduced. Then, an overview of key technologies of underground communication technology, underground situational awareness technology, autonomous navigation and localization, and swarm collaborative control are summarized, and existing problems are pointed out. Finally, the future development trends of underground unmanned systems are discussed.

Keywords: underground space; unmanned systems; cross-domain collaboration; reliable communication; situational awareness; cluster collaboration; autonomous planning; intelligent interaction

收稿日期: 2023-04-17. 网络出版日期: 2024-01-03.

基金项目: 科技部科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目 (2020AAA0107300); 中国高校产学研创新基金项目 (2021ZYA02011).

通信作者: 吴保磊. E-mail: 4092@cumt.edu.cn.

地下空间指在岩层或土层中自主形成或经人工开发形成的空间, 对国家经济发展、城市建设和国防建设具有重要意义。目前我国已成为世界

上地下空间开发规模、数量和难度最大的国家,涉及到交通运输、水利水电、能源开采、国防建设、核工业等多个方面^[1]。地下空间内部较为封闭、结构复杂且纵深空间大,给地下空间的安全开发与建设带来严峻挑战^[2]。

地下空间包括天然洞穴和人工开发空间^[3],其中人工开发地下空间包括商用盈利性质用地、公共服务性质用地、军事城防性质用地、基本生活设施用地、能源开发设施用地等。具有高防护、易封闭、热稳定、内部环境易控、低能耗、可叠加等特性,以其在抗爆、防毒等方面的优越性,能成为城市的防灾空间,是人类活动空间不可分割的一部分^[4]。与此同时,电力中枢、通信枢纽、能源中心、指挥机构等事关国家和军队命脉的重要设施被置于地下,地下空间已成为国家主权的重要组成部分,是继宇宙空间、海洋资源之外的人类可以开拓的第三大领域^[5]。

地下空间作为新型国土资源和重要战略空间,受到各国政府重视。同时,深地空间资源探测和开发利用也成为科技创新和技术应用的前沿阵地^[6]。地下空间作为关系国家安全和民生福祉的重要战略空间、科技创新前沿阵地,要努力抢占地下空间研究领域科技高地,构筑国家先发优势。2021年习近平总书记在中国科学院第二十次院士大会、中国工程院第十五次院士大会和中国科协第十次全国代表大会上强调指出:“要在事关发展全局和国家安全的基础核心领域,瞄准深地深海等前沿领域,前瞻部署一批战略性、储备性技术研发项目,瞄准未来科技和产业发展的制高点”^[7]。

深地既包括地球深部的矿物资源、能源资源的勘探开发,也包括各类型地下空间安全利用、减灾防灾等^[8-11]。深地探测纳入《“十三五”国家科技创新规划》面向2030年重大科技项目,构筑国家先发优势,围绕“深空、深海、深地、深蓝”,发展保障国家安全和战略利益的技术体系^[12]。并制定了以向地球深部进军为统领,全面实施深地探测、深海探测、深空对地观测和土地科技“三深一土”的科技创新战略,确立了“三深”战略领域跻身世界先进行列、土地科技水平显著提升的总体目标^[13]。

在国际上,地下空间无人系统也逐渐受到相关组织和研究人员的高度重视^[14]。“国际智能地下空间大会”已连续举办四届,重点探讨了如何利用智能技术应对地下空间面临的诸多挑战,探讨智慧地下空间在安全性、利用效率、可持续性等

方面的应用。“国际地下空间学术大会”已连续举办六届,逐渐将其主题转移到地下空间的规模化、综合化、深层化、协同化开发利用,其核心手段和目的也是地下空间的智能化利用。

地下空间的合理开发与利用是国家实现可持续发展、低碳发展的有效途径,同时也可保证人防工程、国防设施系统的协调发展。不同类型的地下空间既有独立性,又具有关联性。地下空间类型不一,各类型建筑可根据实际情况相互转换。世界上许多发达城市建设的重要基础设施都具备一定的防护功能。大部分地下建筑是平战两用工程。美国堪萨斯市的数据中心建在地下近70 m处;俄罗斯在城市和工业区构筑的掩蔽部可容纳约2 000多万人,还可抵抗一定程度的冲击波;位于英国伦敦南部的防空洞被改造成世界上首个地下农场。一些国家政府和企业部分的信息化工程设施也建在地下,如重要信息资源库、信息库、计算中心等。

如何保障安全合理有序地开发建设地下空间,实现地下空间经济效益、社会效益和国防战略效益的全面建设和提升,对于国家发展和国防建设具有重要的现实意义。随着经济社会的发展和技术的进步,以智能机器人为代表的无人系统越来越多的被应用到社会生活的方方面面。无人系统集成人工智能、智能机器人、智能计算等科学技术,具备感知、交互、学习能力,可根据现有信息进行推理和决策,完成给定任务^[15]。地下空间无人系统通过自主协同规划、多域协同合作以动态自适应调整,可涌现出单个主体难以实现的智能水平,在地下探索、地下侦察、地下运输、地下作战、矿场勘探、安全监测、防灾减灾等领域发挥关键作用。

本文围绕地下空间无人系统相关研究及其关键技术进行总结。首先,根据无人系统应用背景的不同,从地下矿井无人开采系统、地下轨道交通无人系统、地下管廊综合管理无人系统、地下无人作战系统4个方面介绍了地下空间无人系统的国内外研究现状;然后围绕地下空间通信技术、地下空间态势感知技术、自主导航定位技术、集群协同控制技术4个方面对相关研究进行总结,并指出现存问题;最后,对地下空间无人系统未来发展趋势进行了展望。

1 地下空间无人系统国内外研究现状

地下空间的开发与建设如图1所示。地下空

间的开发类型多样,其无人系统也不尽相同。根据无人系统的应用背景,将地下空间无人系统分为地下矿井无人开采系统、地下轨道交通无人系

统、地下管廊综合管理无人系统、地下无人作战系统。本节围绕以上 4 个方面介绍地下空间无人系统的国内外研究现状。

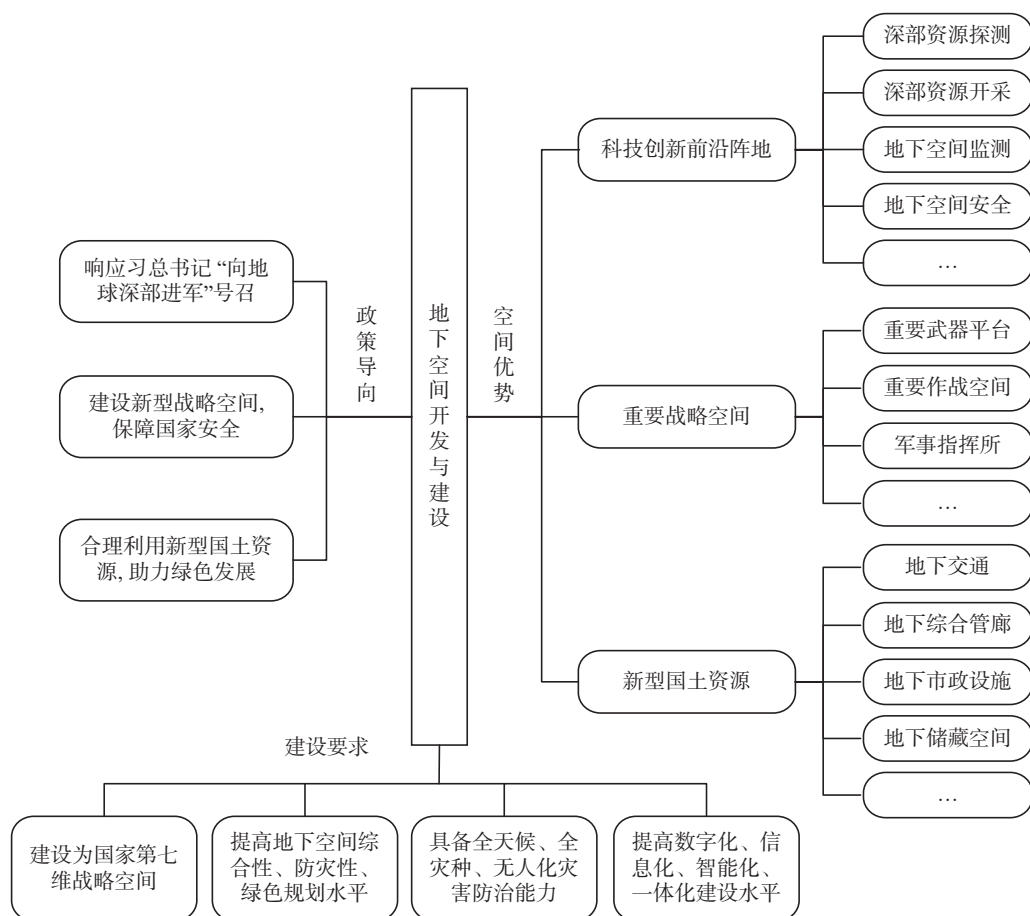


图 1 地下空间开发与建设

Fig. 1 Development and construction of underground space

1.1 地下矿井无人开采系统

人工智能、工业互联网、云平台、大数据、机器人、5G 等先进技术的发展,推动了地下矿产智能无人开采的创新和发展^[16-18]。为贯彻落实国家发展改革委、能源局、应急部、煤炭监管局、工业和信息化部、财政部、科技部、教育部联合发布的《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》^[19],山西省、河南省、山东省、贵州省和云南省就智能化建设提出了具体实施方案或意见。煤矿智能化发展指导意见的颁布和实施将为智能无人采矿的发展提供政策依据^[20-22]。

矿山井下作业环境复杂且灾害风险高,无人系统可辅助工作人员完成矿场勘探、安全监测、无人运输等工作,实现煤矿开采的无人化、自主化、智能化、高效化发展。无人开采是煤矿、金属矿山、非金属矿山和其他采矿行业生产中的一个关键过程,直接影响采矿的整体安全效益^[23-24]。智能无人采矿提高了采矿的自动化程度,但目前

矿产开采智能化建设水平不平衡。自动化技术已应用于世界各地的采矿工程^[25],随着矿产开采的日益复杂,传统的机械化、自动化开采技术已不能满足进一步提高开采效率和安全水平的要求,矿产开采逐渐走向智能化和无人化^[26]。

目前,地下无人采矿技术主要包括螺旋钻无人采矿、刨煤机无人采矿、综合机械化无人采矿、智能化无人综采,关键技术如图 2 所示。螺旋钻钻机的无人采煤通常适用于薄煤层开采,一些煤矿也用于露天开采边煤^[27]。智能无人开采一般用于中厚煤层的开采。通过工作面智能控制系统,利用可视化远程监控,实现工作面采煤、支护和煤炭运输的智能操作。特厚煤层的智能综采放顶煤主要通过使用超大开采高度放顶煤液压支架、智能放顶煤系统、关键技术的智能控制等实现^[28-29]。综合机械化无人采煤可实现控制系统的自动化和整个过程的可视化远程监控,对智能无人采煤的发展具有重要意义。智能无人采矿基础平台、智

能液压支撑系统^[30]、智能采矿模型和地下自动驾驶汽车^[31]等技术,推动了智能无人采矿的发展。基于传统综采技术,使用液压支架、采煤机、刮板输送机和其他具有感知、决策和执行能力的采矿设备,实现“无人跟踪作业、有人安全巡查”的安全高效开采模式^[32]。随着5G智能矿山、煤矿机器人、煤矿智能设备等新技术和设备的应用,我国智能无人采矿领域迎来了新发展。

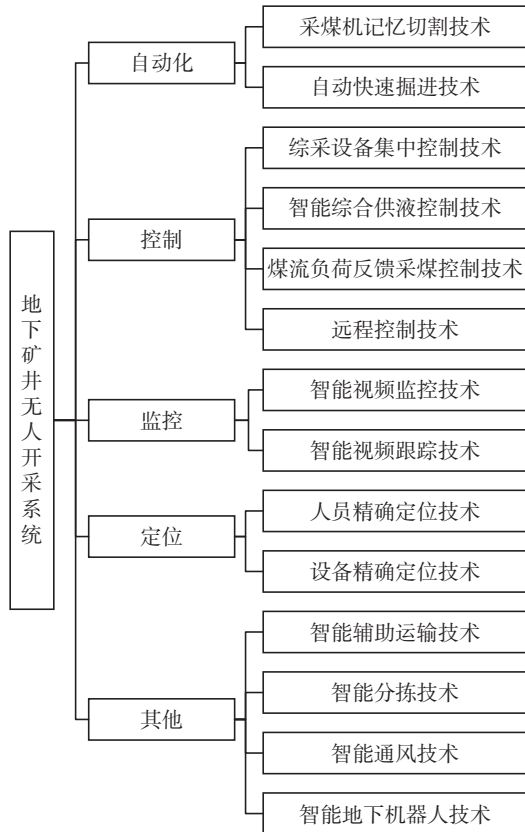


图2 地下矿井无人开采关键技术

Fig. 2 Key technology of unmanned underground mining

文献[33-34]总结了地下矿井无人开采技术的现状和发展趋势,将综采工作面智能无人开采技术分为可视化、远程干预的智能无人开采和自适应智能无人开采,提出了综采工作面的智能无

人开采关键技术和智能化无人工作的适用性评价方法。文献[35]基于视觉远程干预、机器人辅助巡检和惯性导航技术的发展现状,提出了具有“感知、决策、执行、操作和维护”4个维度的智能采煤系统的基本架构,确定了智能采煤关键技术有待突破的技术方向。

1.2 地下轨道交通无人系统

地铁是一种在地下运行的交通工具,相较于地上交通,其在可达性、时效性、安全性等方面都具有一定的优势,可有效缓解现有交通中的拥堵问题^[36]。然而,地铁可能是一种危险的交通工具。地铁通常在封闭空间中运行,这些空间较为狭窄且封闭。由于环境限制难以处理紧急事件,往往会带来无法预测的人员伤亡和财产损失。实现地下轨道交通无人化是城市建设轨道交通领域的一个热门话题。在轻轨列车等交通设施方面,国内外有许多研究,如法国、加拿大、新加坡、中国等轨道交通国家在交通无人驾驶的设计上都采用了先进的技术,已经领先于世界先进水平。

随着5G技术和无线传感器网络等通信技术的快速发展,动车组控制系统将应用于减少地面设备,提高列车运行控制的自主性和智能化。根据系统设备实现的自动化功能,国际标准IEC 62290-12014定义了5个自动化等级(即GoA0~GoA4),以明确列车运行系统的自动化水平^[37]。根据该标准,GoA0和GoA1基本上是非自动化的列车运行水平,需要司机手动操作列车。在GoA2中,加速和制动是自动的,列车速度由车载系统持续监督。此外,司机负责列车的安全离开和车门控制。GoA3是无人驾驶的列车运行,在列车内没有司机,只有一名操作人员负责列车的安全离开。大多数现有的列车自动运行系统一般都能实现GoA2或GoA3。列车运行自动化的最高水平是无人值守的列车运行,即GoA4,其中完全没有司机或操作人员,列车完全自动运行。图3为地下轨道交通自动化等级流程图。

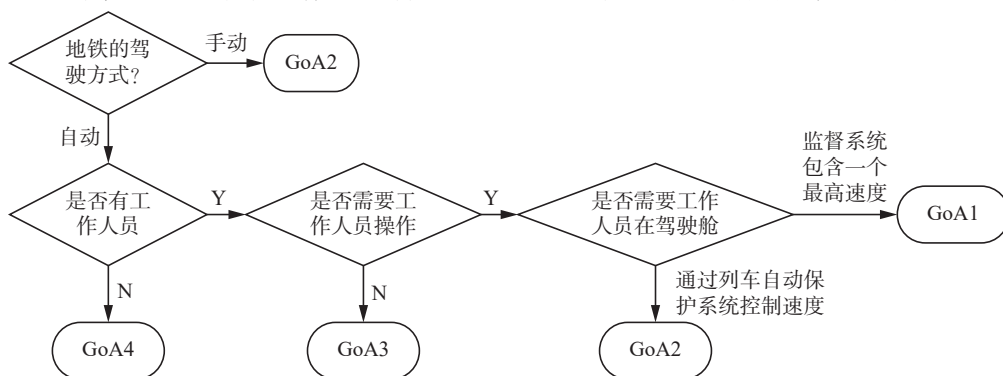


图3 地下轨道交通自动化等级流程

Fig. 3 Flow chart of automation level of underground rail transit

由于无人值守的列车运行线路可以大大降低运营和维护成本,因此,应用全自动(或无人值守)列车运行是未来城市地铁系统发展的一个趋势,根据 IEC-62290 标准实现 GoA4。无人值守的列车运行系统的主要功能包括列车跟踪安全、列车运行任务和智能列车驾驶 3 个层面。目前世界上已有 40 多条地铁线在完全无人值守的模式下运行,而且越来越多的地铁线将被建设或升级为完全无人值守模式^[38]。无人驾驶系统的显著特点是根据信号系统发送的驾驶指令完成的。虽然有人驾驶不需要修改信号系统,但自动驾驶在安全性和可靠性方面更有优势,如在高密度运行的状态下,无人驾驶技术的应用不仅可以减少投资,而且有利于降低轨道交通生命周期的成本^[39]。如图 4 所示,地铁轨道安全是完成地铁运行任务、实现地铁智能驾驶的重要前提,而列车智能驾驶算法必须建立在地铁运行任务的保障基础上。

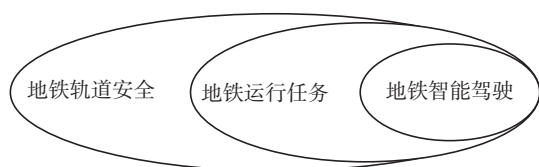


图 4 无人值守的列车运行系统的功能

Fig. 4 Function of the unattended train operation system

无人驾驶控制系统具有提高系统容错率的特殊能力。列车控制系统采用多种技术,为列车提供保护设施,具有极大的安全性,可以提高系统的可用性,实现主动系统和备用系统的无缝切换。全自动大容量无人驾驶车辆配置的可靠性在技术领域得到了认可。为了实现控制中心的运行,无论是传输功能还是通信系统,特殊功能包括列车的双向图像数据和文字数据的信息传输^[40]。

列车的控制系统采用信号系统的控制方法。它需要使用制动控制精度的误差。误差约为 $\pm 25\text{ cm}$, 最小间隔缩短到 90 s ^[41]。列车控制可以实现对运行中的列车进行完整的安全监控和故障诊断,从而保证准确性和快速性。当检测到列车的运行状态时,实施故障远程处理,采用分析判断的方法,按常规系统实施应急自动处理的安全措施^[42]。

1.3 地下管廊综合管理无人系统

地下综合管廊整合了电力、通信、燃气、供热、给排水等多种工程管线。它具有检修、吊装、监控等设施,实行地下隧道空间的统一规划、统一设计、统一施工、统一管理,其运营管理对“城

市生命线”的安全运行至关重要^[43]。作为“城市生命线”,综合管廊的安全运行在军民融合建设中起着至关重要的作用。然而,随着综合管廊建设规模的扩大,管廊内的管线主管数量也随之增加。管廊中的管线主管数量增加,其安全综合监管面临的问题也随之而来。

地下综合管廊较为复杂,各地区地质差别大,其安全状况直接影响人们的生活质量。然而,传统监测方法无法精准高效地监测地下管廊的危险。常用监控方式包括固定式监控设备和人工巡检结合。然而固定式监控设备易受环境影响,人工巡检方式较为危险,无法达到智慧城市中地下综合管廊的实际运维要求。无人化智能化系统可对整个综合管廊智能化控制,也可对整体流程实时监控^[44]。

地下综合管廊也可能出现一些严重问题,如管道破裂和腐蚀,从而造成地下污染和地面沉降^[45]。地下水开采、邻近地区管廊的施工及地下管道的泄漏是城市地区人为沉降坑形成的主要原因^[46]。其中,下水道、排水管、运输管道中存在泄漏、爆裂或堵塞较为常见。因此,为保证地下管廊综合管理安全、效率和监控系统的发展,地下管廊需要精准的实时监测^[47]。

地下管廊的破坏会导致城市地区地下空洞和天坑,地下超过 25 年的管线经常会出现存在裂缝、缺陷、管线腐蚀等问题。为解决此问题,计算机视觉和图像处理方法也被应用于地下管道监测^[48]。基于人工智能方法可用于监测地表和地下管线的缺陷。基于无线传感器网络可确定地下管线的土壤环境,如水分、密度、孔隙度、PH 值、温度和承载力,以充分了解地下综合管廊的状态。人工智能方法与无线传感器网络相结合可更全面地监测地下管廊,以经济安全的方式完成运输、电力、排水、燃气等生活保障任务。

1.4 地下空间无人作战系统

地下工程在古代军事中常被作为防御作战手段,其与战争渊源甚深。城市地下设施建设日趋坚固多样,平时方便民众使用,战时则可转变成“地下作战堡垒”,成为继陆、海、空、天、电、网之后的第七维战略空间。美军在 2017 年初起草关于陆军 2020—2040 年在大城市作战的白皮书,提出“地下机动需求”问题,足见美军对未来地下空间作战的重视^[49]。20 世纪 50 年代抗美援朝战争^[50]、20 世纪 90 年代初波黑战争、2001 年阿富汗战争^[51]、2003 年伊拉克战争、2011 年叙利亚战争、2016 年摩苏尔战役、2022 年俄乌冲突等诸多战例均表

明, 地下空间在国防建设中发挥着至关重要的作用^[52]。

随着各国政府对地下空间开发利用的重视和科学技术的发展, 地下空间的规模逐渐扩大, 结构日益复杂, 加速了地下空间无人系统的研究。美国海军陆战队发布《21 世纪远征部队如何进行作战》, 针对 2025 年以后的战争, 要求提高海军陆战队在城市街区、下水道和隧道等城市地形条件下的作战能力^[49]。美国国防高级研究计划局 (defense advanced research projects agency, DARPA) 提出的快速轻量自主项目 (fast lightweight autonomy, FLA)^[53-55]、机械天线计划 (a mechanically based antenna, AMEBA)^[56]、地下挑战赛 (subterranean challenge, SubT)^[57], 旨在突破地下环境群体智能控制、高精度导航与建图、可靠通信等, 使无人系统在执行地下军事行动时获得态势感知能力, 在复杂的地下环境中高效完成快速侦察、实时建图、环境感知、自主导航等任务。

中国陆军装备部举办的“跨越险阻”陆上无人系统挑战赛-地下无人系统侦察搜索比赛^[58], 旨在推进地下无人系统技术与装备创新发展, 使无人系统具备在地下楼道、坑道、管网区域的机动、通信、测绘、侦察等功能。“地下探测-2020”城市地下空间内物体探测系统挑战赛是一项具备国防

特色的国家级赛事, 致力突破地下空间远程快速建图、精确导航、精准搜索等技术, 变革指挥人员和作战人员在人造隧道系统、城市地下环境和自然洞穴网络中的作战方式^[59]。

2 地下空间无人系统关键技术

随着机械、电子、控制、人工智能等多学科的融合发展, 无人系统在限制未知环境中的自主行动能力得到了较大提升^[60], 并逐渐向自主化、协同化方向发展。无人系统自主性的提升降低了无人系统协同的复杂度与操作人员的负担, 因此受到广泛关注。地下空间无人系统是指各单体之间相互配合通过信息共享以全面掌握环境状况, 代替人类在地下空间中执行侦察、救援、监测等任务^[61], 如无人化地铁、无人化地下指挥中心、地下自主监测系统等。其优势主要体现在环境适应能力强、风险小、代价低、非接触、无人伤亡、长续航、多功能等方面。与其他无人系统不同, 地下空间无人系统需具备在封闭环境中信息交互、特殊地形中协作、实时可靠通信、无卫星定位的自主导航等能力。本节围绕地下空间通信、地下空间态势感知、自主导航定位、集群协同控制技术 4 个方面对相关研究进行总结, 地下空间无人系统关键技术关系如图 5 所示。

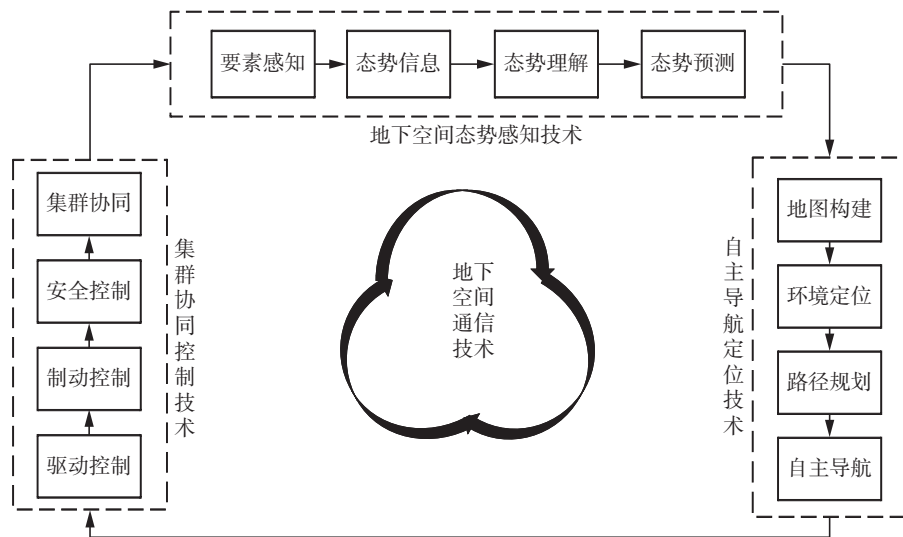


图 5 地下空间无人系统关键技术关系

Fig. 5 Key technology relationship diagram of unmanned system in underground space

2.1 地下空间通信技术

地下作业任务和地下应急救援任务需要稳健高效的通信设施, 通信是确保地下工作环境安全的关键因素。地下隧道、地铁、地下矿井通常相对湿度较高。腐蚀性水、灰尘、爆炸性气体和有毒气体, 如二氧化碳和甲烷, 会影响人

员和设备 (包括通信设备) 的性能。地下环境中, 通信系统包括有线系统 (through the wire, TTW)、无线系统 (through the air, TTA)、透地系统 (through the earth, TTE)、混合系统 (mixed medium type, MMT)^[62-64], 如图 6 所示。TTW 可采用光缆、同轴电缆、双绞线等线缆, 但其都具有

一定的使用环境; TTA 技术中工作频段的差别将导致其吞吐量和传输时延具有一定的差异;

TTE 中超低频或甚低频的电磁波具有一定的穿透能力。

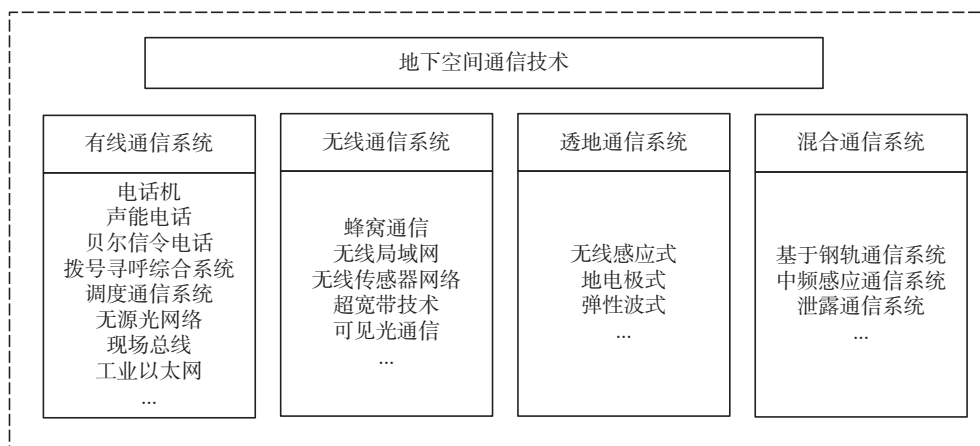


图 6 地下空间通信技术

Fig. 6 Underground space communication technology

TTW 通信系统使用电缆/线进行地下内部通信和地下到地面通信^[65]。TTW 通信包括电话机、声能电话、拨号寻呼混合系统等,但现场总线和工业以太网较为常用。现场总线通常用作骨干网络的分支,骨干网络采用工业以太网。现场总线是一种分层通信网络,连接现场传感器、控制器、执行器等设备。实现控制中心与作业现场之间的数据传输与控制。与传统的线缆连接相比,具备安装方便、传输质量高、修整方便等优点^[66-67]。以太网网络的数据传输存在非实时性,很难应用于地下通信。针对这一问题,诸多学者从抑制冲突或降低冲突概率方面解决。工业以太网在地下空间作业环境应用较为广泛,如矿井提升、通风、排水、安全监控系统等,实现地下作业任务的管控一体化^[68-69]。

TTA 通信系统易于在地下环境部署,但其覆盖范围的扩展也需要增加基础电信设施。地下环境与典型的无线地面系统中的环境有很大不同。因此,在规划 TTA 系统时,必须考虑一些对系统性能有很大影响的特定属性。许多 TTA 系统建立在标准无线通信系统之上,特别是无线局域网,该系统指定了较低层协议,如 IEEE 802.15.4 或 IEEE 802.11 的一些修改^[70]。目前,常用的 TTA 通信技术包括蜂窝通信、无线局域网、无线传感器网络、可见光通信、超宽带无线通信技术等^[71-73]。

TTE 通信系统可以使无线信号通过地面覆盖层到达地下环境,包括磁感应、地电极、弹性波传输。弹性波和地电极传输方式在低频段依赖地层传播。磁感应方式通过天线辐射进行传输,受大地介质和地层结构的影响较小^[74-76]。在具体实现 TTE 通信时,需在地面和地下部署闭合线圈天线

作为发射和接收装置。

但 TTW、TTA、TTE、MMT 通信系统不适用于地下作战动态环境。DARPA 机械天线计划在寻求一种小型、轻质、便携的高性能新型甚低频 (very low frequency, VLF) 和特低频 (ultra low frequency, ULF) 发射器,实现水下、地下和建筑物内等“无线通信盲区”的可靠通信^[77]。传统的天线设计方法 (如单极、双极、环形天线) 难以解决这些技术问题^[78],文献 [79-80] 比较了传统天线与机械天线的性能,发现旋转驻极体或永磁机械天线的性能远优于传统天线 (偶极子天线、电流环天线),并且机械天线可以突破传统小型天线的尺寸限制,基于这一优势许多学者对此展开研究^[81-84]。

此外,水、非磁性金属、人体组织、岩石等材料对低频磁波的反射和吸收远低于高频电磁波^[85]。因此,磁物理层链路在人体区域网络、无线地下通信网络和水下无线通信网络中得到了应用^[86-91]。文献 [92] 提出一种旋转偶极子式机械天线结构和通信模型,设计一种小型化和低功耗的超低频机械天线。文献 [93] 介绍了一种基于机械旋转驻极体的 ULF/VLF 发射器,并通过理论分析和有限元模拟进行了验证,为高效且小型化的机械驱动天线的研究提供了基础。文献 [94] 研究了天线结构与电磁波频率关系,在保持电机转速不变的情况下,改变机械天线的电荷分布方式,提高了发射信号的频率。文献 [95] 设计了一种在恶劣的电磁环境中工作的紧凑型机电调制旋转永磁天线,这种磁铁天线可以在有严重阻碍电磁波传播的障碍物环境中可靠地传输二进制数据。密歇根大学研究了机械天线辐射功率与旋转频率、偶极矩、所需机械力和旋转半径之间的关系,并分

析了磁介质共振对机械天线磁场性能的提升^[96]。文献[97]利用棒状铌酸锂晶体的逆压电效应实现了 VLF 机械天线设计。文献[98]介绍了一种基于声驱动磁电天线的便携式 VLF 通信系统。文献[99]利用微机电系统技术,设计了一种具有薄膜体声谐振器结构的实用集成机械天线。文献[100]提出一种基于旋转永磁体的 ULF 磁场发生器,并证明其场强和功率均优于传统线圈源(相同体积下),这在低尺寸、低重量和功率应用方面具有较大突破。文献[101]研究了永磁体旋转的电磁辐射机理,并对其机械能与磁能之间的约束关系进行分析,提出基于旋转永磁体阵列的机械天线技术方案。文献[102]对比了不同机械天线的性能特点及应用优势,并研制了基于钕铁硼永磁体和高速永磁伺服电机的旋转永磁式机械天线原理样机,分析了旋转永磁式机械天线的时变磁场分布特性。

2.2 地下空间态势感知技术

态势感知(situation awareness, SA)源于美国军用航空领域,其帮助飞行员了解当前飞行状态,以便快速做出准确的决策。目前,SA在战场指挥^[103-105]、空中作业^[106-108]、自动驾驶^[109]、网络安全^[110-112]、人机交互系统^[113]、空间态势感知^[114-117]等领域均有所应用。SA是对一定时间和空间内的态势要素进行感知,并对这些要素的含义进行理解,最终预测这些态势要素在未来的状态^[118]。根据定义可知,SA是通过过去的态势要素理解当前的态势并对未来的状态进行预测,是一种详细语义提取的过程^[119]。同时,SA也是一个动态变化的过程,不同时间、不同空间、不同感知主体、不同任务和不同目标都对态势要素有一定程度的影响。

理论模型是研究态势感知的基础,典型SA模型包括 Endsley 模型^[118]、Situating 态势感知模型^[120]、分布式态势感知模型^[121-123]、团体态势感知模型^[124-127]、人机共享态势感知模型^[128]等。Endsley 将态势感知概括为要素感知、态势理解及状态预测 3 个层面,如图 7 所示。

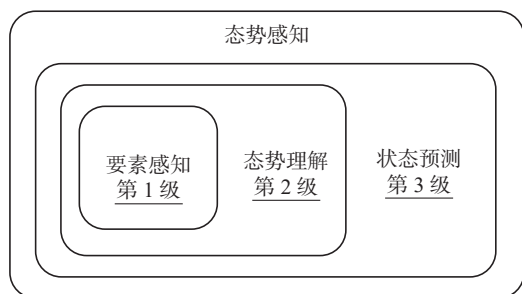


图 7 态势感知模型

Fig. 7 Model of situational awareness

地下空间态势感知的目的是将态势感知的理论和方法应用到地下空间领域中,管理人员通过信息系统对原始环境数据处理,根据多角度、多层次地下空间态势信息,全面掌握地下环境状况,为地下空间探索开发和安全管理提供技术支撑。态势感知是提取特定空间详细语义的过程,且地下空间态势感知是态势感知方法在地下空间的应用。

地下空间态势感知是对地下空间环境的认知过程,通过对多维度感知主体测量到的原始数据逐步处理,实现地下空间多尺度状态语义提取,从而获得据此表征的地下空间态势。地下空间态势感知的任务包括地下空间要素感知、地下空间态势理解及地下空间状态预测 3 个层面。其中,态势要素感知层面包括多源要素信息的获取和融合,态势理解层面是根据获取的多源态势信息理解地下空间整体态势,状态预测层面是根据上一阶段获得的态势信息预测其在未来一段时间内的变化趋势,每个层面之间存在依赖关系。如果地下空间态势要素感知和地下空间态势理解没有正确的结果,会影响地下空间状态预测的结果,但每个层面的结果可独立呈现并使用以满足不同的任务需求,具有实际意义。地下空间态势感知模型如图 8 所示,包括地下空间态势要素感知、地下空间态势信息理解、地下空间状态预测。

地下空间态势感知模型各模块功能如下:

1) 地下空间要素感知: 地下空间要素感知的主要任务是在一定时间内获取空间中有效的要素信息。从空域、天域、地域、地下域获取的态势信息与传统数据结合,为地下空间态势的全面认知提供一定的基础。通过对多源态势信息处理得到有效信息,将其转化为图像、音频、视频、图表和地图信息,并建立相对应的内容理解模式,避免信息来源和类型差异导致整体失效。

2) 地下空间态势理解: 地下空间态势理解的主要任务是在要素感知的基础上完成地下空间环境识别、目标识别、意图理解等工作,以从环境特征信息中理解地下空间的整体态势。通过构建信息分类体系描述 5 种不同信息表征上的差异,其内容可按照时间、地点、人物、事物、事件、现象、场景^[129]等方面进行总结,实现对态势信息的精准理解。

3) 地下空间状态预测: 地下空间态势预测的主要任务是根据上一模块获得的态势理解结果完成环境评估、威胁预测、损失评估、位置预测等工作,对地下空间中当前态势信息在未来一段时间内的变化趋势进行估计。

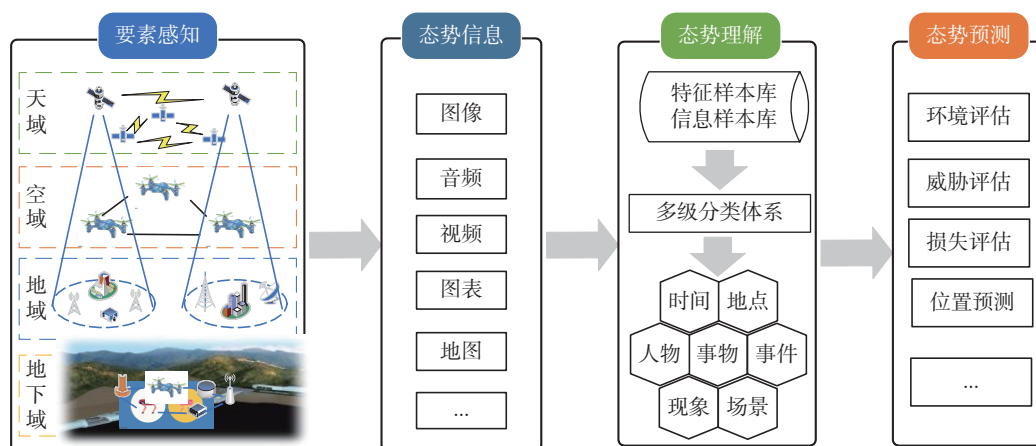


图 8 地下空间态势感知模型

Fig. 8 Model of underground space situational awareness

4) 态势信息可视化: 地下空间态势信息可视化模块可以呈现当前时间内感知主体所处的地下空间状况, 以多视图、多角度、多尺度的方式与用户进行交互, 判断当前态势对当前任务有何影响, 将每个模块的结果独立呈现并使用以满足不同的任务需求。

地下空间态势信息来源不同、类型不同、维度不同, 且具有碎片化、片面化和不确定性等特点。因此, 如何根据具体任务需求, 通过态势信息处理技术和态势图生成与服务技术, 实现快速、精准、全面的态势感知, 是地下空间态势感知的关键问题。与此同时, 地下空间黑暗、狭窄、氧气含量低且通讯受限, 为提高地下空间态势感知能力, 感知主体开始由单智能体向集群协同转变。各机器人单体通过获取不同维度和不同深度的环境信息, 可更全面地感知地下空间的状况, 通过多层次态势信息交互以弱化复杂环境引起的信息不确定性带来的不良影响^[130]。

地下空间态势信息多源异构、数据海量且价值密度低, 因此态势要素的融合成为态势感知的技术难点之一^[131]。许多学者对此开展研究, 提出了基于时空大数据平台的态势感知系统架构^[132-135], 将局部的、短时的数据信息转换成为整体的、长时域的信息, 对环境安全进行全方位的实时监控。然而, 如何根据多源、多类型、多维度态势数据的特点构建相对统一的技术体系, 避免信息来源和类型增多而导致方法失效, 仍是态势信息处理的难点。

地下空间多层次态势信息在不同层面具有不同语义, 单一层面的评估不能有效地量化其语义特征。此外, 任务的重要程度及依赖关系、环境脆弱性等级和复杂程度等因素都将影响整体评估

结果。可视化技术可用来展现态势感知所处理的海量异构数据及其处理结果。关于态势图生成^[136-139]和态势多尺度表达^[140-143]已有相关研究, 通过生成综合态势图显示环境中具有实时性的态势数据, 更全面的与用户交互。但如何根据具体任务、管理层级、限制性环境之间的不同实时获取地下空间态势图, 仍是态势生成与理解技术的难题。

2.3 自主导航定位技术

DARPA 快速轻量自主计划旨在使用飞行器在未知环境中开发高速、稳健、自主飞行的算法, 使其在无外部通信和定位时, 以 20 m/s 的速度在未知环境中(室内、室外、地下)自主飞行^[53]。飞行器仅依靠机载传感器在未知环境中自主搜索, 其中包括自主感知和导航, 即无人机高速向目标点飞行的过程中定位自身信息和感知周围环境, 同时准确快速地避开障碍物。在无外界辅助定位的环境中, 无人机通常使用来自一个或多个机载摄像头的图像流进行自我定位, 视觉同步定位和建图^[144]与视觉惯性里程计^[145]方法逐步受到关注。然而, 由于传感器的范围有限, 相机需要有利的照明条件才能发挥最佳功能^[146], 对于光照不足的地下环境, 通常使用基于激光扫描匹配的方法, 如广义-迭代最近点^[147]、正态分布变换^[148]和多分辨率面元地图^[149]等。

为使无人机在无全球定位系统的未知环境中完成精准定位和导航, 文献^[150]介绍了一种视觉测距系统, 通过来自刚性安装的摄像头或一组摄像头的视觉数据来估计自身的运动, 可提供高度准确的里程估计, 并且通常与惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)结合以处理短暂的快速运动^[151-155]。文献^[156]提出了一种基于扩展

卡尔曼滤波器的实时视觉辅助惯性导航算法,推导出能够表达从多个相机位姿观察到静态特征时出现的几何约束的测量模型,可在大规模真实世界环境中进行高精度姿态估计。文献[157]提出了一种基于扩展卡尔曼滤波器的视觉惯性里程估计器,该里程计将高速高漂移IMU数据和低速率低漂移视觉数据集成在多状态约束卡尔曼滤波框架中,成功解决未知环境中的运动跟踪问题。文献[158]以履带式移动机器人为研究对象,开展地下环境自主探索策略研究,通过地形分析算法和自主环境探索策略实现中小范围地下环境内的自主探索。文献[159]通过融合IMU、激光雷达和摄像机的数据信息来估计微型飞行器6个自由度的姿态和速度,在没有任何外部基础设施(全球定位系统或外部摄像头)的情况下实现自主导航和测绘。文献[160]介绍了一种基于小型轻型飞行平台的集成烟囱检查机器人,融合轻型3D激光扫描仪、立体相机和用于表面检测的高分辨率相机,在烟囱环境中完成了建图和自主飞行任务。文献[161]基于激光雷达提出一种无碰撞局部规划器的自主探索技术,可在真实矿山环境中成功自主勘探飞行。上述研究在缓慢、平稳的飞行中被证实有较好的效果,但不适用于快速的闭环系统中。为解决这一问题,文献[162]介绍了一种融合视觉和惯性导航系统的惯性状态估计映射方法,能够提供高速率、低延迟的状态估计,以实现飞行器在充满障碍的未知环境中高动态飞行。

2.4 集群协同控制技术

DARPA 地下挑战赛(SubT)旨在探索无人系统在地形复杂、通信退化、无外界定位、广阔且未知的恶劣地下场景执行任务所需的技术,辅助军队及其后勤保障人员以应对突发性人为灾害或自然灾害。通过群体协同在突发灾害后的地下空间进行搜寻与救援行动可以大大减少定位受害者所需的时间,从而增加受害者的生存机会^[57]。群体协同中,每个单体都应具备一定的状态估计、规划和决策能力,尤其是在探索限制性未知环境等场景下,每个单体的自我感知能力对整个任务至关重要。陆军装备部举办的“跨越险阻”陆上无人系统挑战赛-地下无人系统侦察搜索比赛旨在解决无人系统的地下机动、地下空间测绘、地下目标搜索、地下目标获取等问题^[58]。

地下空间集群协同领域的探索是一个具有挑战性的问题,许多学者对此领域开展研究^[163-170]。文献[171]研究了无人机/地面车辆(UAV/UGV)协同系统中的自动地面地图构建和高效路径规

划,通过无人机构建地面地图辅助无人车识别障碍物,同时实现地面地图构建和高效路径规划。文献[172]介绍了一种多机器人矿山勘探和测绘的自主系统,由腿式四足机器人和微型飞行器相互配合,在无外界定位的地下空间实现完全自主的探索。文献[173]通过激光雷达、摄像头、IMU、气体检测器、热像仪传感器补充机器人的内置传感,并采用概率方法考虑未知环境中的不确定性,解决了地下空间大规模探索问题。文献[174]提出了一种2层搜索策略,将感知任务分解为粗略探索层和精细映射层,通过无人机和无人车在无外界定位的三维未知环境中协作完成搜索、测绘和导航。文献[175-176]提出一种融合来自传感器的连续信息和离散信息、语义几何特征等信息的同步定位与建图系统,用于多机器人地下隧道的搜索问题。文献[177]提出一种基于激光雷达的多机器人SLAM系统,使用3D激光雷达数据构建了地下隧道的点云地图,不仅可以对多个机器人轨迹稳健估计,还可检测和定位感兴趣的对象。在未知环境中做出最大奖励的决策需要在信念空间上构建价值学习和策略,即机器人所有可能状态的概率分布。然而,在大型空间环境中的信念空间规划面临着严峻的计算挑战。为解决这一问题,文献[178]提出一种具有丰富信息图形的分层信念空间规划器,能够执行长期、超出通信范围的任务。文献[179]提出一种基于图的地下勘探路径规划方法,将局部规划器与全局规划器相结合,由空中机器人和腿式机器人在地下空间完成自主勘探。文献[180]提出了一种具有快速准确的图形估计和简单的拓扑规划的方法,减轻了机器人对精确路径规划的需求和基于位置的路径跟踪控制器的带宽要求。

2.5 存在的问题

综上所述,已有工作对地下空间无人系统方面进行了深入研究,但在突破关键技术、整合系统有效资源实现基本功能等方面还存在一些问题:

1)态势要素感知方面:地下环境光照弱、烟尘多、湿度高等因素,容易造成传感器的失效和退化等问题,导致无人系统所携带传感器性能下降。因此,需要通过融合来自多种传感器的信息来提升无人系统在地下空间态势要素感知的鲁棒性。

2)无人系统单体性能方面:实际地下环境中存在突发事件、时空受限、长时导航、穿越狭窄区域等情况,单体性能在体积、计算负载、载荷、传

传感器精度、环境适应性等方面存在不足,需通过芯片技术、人工智能、信息物理系统等技术,提高无人系统单体对特殊地形环境的适应性、自主性、抗干扰能力、目标识别精度和导航精度等。

3)智能交互方面:人与无人系统及无人系统之间通常通过直接和间接的方式进行信息传输。基于通信设备直接进行交互已经得到了广泛的研究。通过手势指令、标记等基于线索推断的间接交互适用于直接交互受限环境中,但目前相关研究较少且缺乏理论支撑。

3 结束语

本文对近年来地下空间无人系统态势感知的发展状况进行了回顾,针对这一问题众多学者开展了相关研究。关于未来可能的研究方向,我们认为可在以下几个角度进行考虑:

1)实时可靠通信:地下环境信息类型多样,目前通信系统结构受多个矛盾相互制约。地下空间稳定可靠的通信需同时考虑数据传输的实时性和部署的灵活性,并具备重构能力。地下空间的通信呈现出可重构化、协同化、云计算化趋势。

2)多栖高性能无人系统:机器人各单体需要在狭窄、地形复杂的地下空间中相互协作且长时间执行任务,这对机器人的体积、机动性能、传感器精度、计算、载荷、通信能力以及多模态运动方面有较高的要求。地下无人系统在执行任务时需同时兼顾执行任务的效率和无人系统穿越复杂地形的能力,多栖高性能无人系统可融合不同运动模式的优点,具有较好的机动性能,在复杂地形环境中的穿越能力大幅提高。因此,仍需对无人系统本体的性能和多模态运动方面进一步探索。

3)异构机器人协同:态势感知是无人系统与地下空间进行自主交互的关键,无人系统基于视觉、激光雷达、超声波等外部传感器从不同角度可获取周围环境的直观感知信息和自身状态信息。在实际地下空间,仅依靠自身获取的直观信息,难以保障无人系统安全地执行任务。因此有必要通过异构无人系统相互协作,提高整体移动性、灵活性和特定任务的性能。如何通过异构无人系统协同对地下空间进行全面态势感知,也是一个值得探索的问题。

4)协同任务分配与路径规划:地下空间环境复杂,无人系统的协同任务分配与路径规划是其在地下空间高效执行任务的前提。在实际地下空间,各无人系统间信息共享,获取环境中多尺度信息,实现无人系统的高效任务分配与路径规

划。如何实现无人系统高效的协同任务分配与路径规划,值得进一步探索。

5)空天地网跨域感知:地上地下空间一体化感知是通过软硬件资源共享实现地上广探和地下细测,在此基础上利用信息共享实现地上和地下协同感知。同时,地上地下一体化感知是实现地上减灾地下防灾一体化、地上地下空间管理一体化、地上地下空间协同作战的基础。因此,如何实现地上地下空间一体化感知,同样也是一个值得研究的问题。

参考文献:

- [1] 操秀英. 中国已成为地下空间开发利用大国 [N]. 科技日报, 2021-12-28(1).
CAO Xiuying. China has become a major country in underground space development and utilization [N]. Technology Daily, 2021-12-28(1).
- [2] 姜涛, 秦斯成, 宋道柱, 等. 地下空间安全评价方法综述 [J]. 环境工程, 2015, 33(S1): 661-668.
JIANG Tao, QIN Sicheng, SONG Daozhu, et al. Research summary of safety assessment methods of underground space [J]. Environmental engineering, 2015, 33(S1): 661-668.
- [3] 贾宗仁, 周夏, 李方舟, 等. 我国地下空间资源调查背景、需求及对策 [J]. 中国矿业, 2021, 30(S2): 8-12.
JIA Zongren, ZHOU Xia, LI Fangzhou, et al. The background, demand and countermeasures of the underground space investigation in China [J]. China mining magazine, 2021, 30(S2): 8-12.
- [4] 才惠莲. 我国城市地下空间立法的特点、问题及改进 [J]. 安全与环境工程, 2022, 29(1): 218-224.
CAI Huilian. Characteristics, problems and improvement of urban underground space legislation in China [J]. Safety and environmental engineering, 2022, 29(1): 218-224.
- [5] 傅光明, 刘兴荣. “地下斗争”: 未来战场新视野 [J]. 军事文摘, 2017(9): 61-63.
FU Guangming, LIU Xingrong. “underground struggle”: a new vision of future battlefield [J]. Military digest, 2017(9): 61-63.
- [6] 赵京燕. 创新科技, 向深空深海深地挺进 [J]. 国土资源, 2016(10): 8-11.
ZHAO Jingyan. Innovating science and technology, advancing deeply into deep space and deep sea [J]. Land & resources, 2016(10): 8-11.
- [7] 习近平. 在中国科学院第二十次院士大会、中国工程院第十五次院士大会、中国科协第十次全国代表大会上的讲话 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(16): 6-11.

- XI Jinping. Speech at the 20th academician conference of the Chinese academy of sciences, the 15th academician conference of the Chinese academy of engineering and the 10th national congress of the China association for science and technology[J]. Gazette of the state council of the People's Republic of China, 2021(16): 6–11.
- [8] 底青云, 朱日祥, 薛国强, 等. 我国深地资源电磁探测新技术研究进展 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2128–2138.
- DI Qingyun, ZHU Rixiang, XUE Guoqiang, et al. New development of the electromagnetic(EM)methods for deep exploration[J]. Chinese journal of geophysics, 2019, 62(6): 2128–2138.
- [9] 王赟, 菅一凡, 贺永胜, 等. 地下实验室与深地环境下的地球物理观测 [J]. 地球物理学报, 2022, 65(12): 4527–4542.
- WANG Yun, JIAN Yifan, HE Yongsheng, et al. Underground laboratories and deep underground geophysical observations[J]. Chinese journal of geophysics, 2022, 65(12): 4527–4542.
- [10] 谢和平, 张茹, 邓建辉, 等. 基于“深地–地表”联动的深地科学与地灾防控技术体系初探 [J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4): 1–12.
- XIE Heping, ZHANG Ru, DENG Jianhui, et al. A preliminary study on the technical system of deep earth science and geo disaster prevention-control based on the “deep earth-surface” linkage strategy[J]. Advanced engineering sciences, 2021, 53(4): 1–12.
- [11] ZHANG Cun, WANG Fangtian, BAI Qingsheng. Underground space utilization of coalmines in China: a review of underground water reservoir construction[J]. *Tunnelling and underground space technology*, 2021, 107: 103657.
- [12] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知 [EB/OL]. (2016–7–28) [2021–5–20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm.
- State Council of the People's Republic of China. State council on the issuance of the "thirteenth five-year" national science and technology innovation plan notice[EB/OL]. (2016–7–28) [2021–5–20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm.
- [13] 姜建军. 实施“三深一土”国土资源科技创新发展战略的思考 [J]. 国土资源科技管理, 2017, 34(3): 1–8.
- JIANG Jianjun. Thoughts on implementing the strategy of “three depths and one soil” for scientific and technological innovation and development of land and resources[J]. Scientific and technological management of land and resources, 2017, 34(3): 1–8.
- [14] 宋玉香, 张诗雨, 刘勇, 等. 城市地下空间智慧规划研究综述 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1611–1621, 1645.
- SONG Yuxiang, ZHANG Shiyu, LIU Yong, et al. Review on urban underground space smart planning studies[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2020, 16(6): 1611–1621, 1645.
- [15] 王耀南, 安果维, 王传成, 等. 智能无人系统技术应用与发展趋势 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 9–26.
- WANG Yaonan, AN Guowei, WANG Chuancheng, et al. Technology application and development trend of intelligent unmanned system[J]. Chinese journal of ship research, 2022, 17(5): 9–26.
- [16] 王国法, 庞义辉, 任怀伟. 煤矿智能化开采模式与技术路径 [J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(1): 013501.
- WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei. Intelligent coal mining pattern and technological path[J]. Journal of mining and strata control engineering, 2020, 2(1): 013501.
- [17] 葛世荣, 郝尚清, 张世洪, 等. 我国智能化采煤技术现状及待突破关键技术 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 28–46.
- GE Shirong, HAO Shangqing, ZHANG Shihong, et al. Status of intelligent coal mining technology and potential key technologies in China[J]. Coal science and technology, 2020, 48(7): 28–46.
- [18] 范京道, 闫振国, 李川. 基于 5G 技术的煤矿智能化开采关键技术探索 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 92–97.
- FAN Jingdao, YAN Zhenguo, LI Chuan. Exploration of intelligent coal mining key technology based on 5G technology[J]. Coal science and technology, 2020, 48(7): 92–97.
- [19] 国家发展改革委, 国家能源局, 应急管理部, 等. 关于加快煤矿智能化发展的指导意见 [J]. 中国安全生产, 2020, 15(3): 5.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Emergency Management, et al. Guiding opinions on accelerating the development of intelligent coal mines[J]. China occupational safety and health, 2020, 15(3): 5.
- [20] GUO Changfang, YANG Zhen, CHANG Shuai, et al. Precise identification of coal thickness by channel wave based on a hybrid algorithm[J]. *Applied sciences*, 2019, 9(7): 1493.
- [21] WANG Tong, SUN Jie, LIN Zhongyue, et al. Coordinated exploration model and its application to coal and coal-associated deposits in coal basins of China[J]. *Acta geologica sinica - English edition*, 2021, 95(4): 1346–

- 1356.
- [22] HAO Yang, WU Yu, P G R, et al. New insights on ground control in intelligent mining with internet of things[J]. *Computer communications*, 2020, 150: 788–798.
- [23] LI Jianguo, ZHAN Kai. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment[J]. *Engineering*, 2018, 4(3): 381–391.
- [24] WANG Guofa, XU Yongxiang, REN Huaiwei. Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: review and prospects[J]. *International journal of mining science and technology*, 2019, 29(2): 161–169.
- [25] WANG Guofa. Innovation and development of completed set equipment and technology for high efficient coal mining face in underground mine[J]. *Coal science and technology*, 2010, 38(1): 63–68.
- [26] 范京道, 王国法, 张金虎, 等. 黄陵智能化无人工作面开采系统集成设计与实践 [J]. *煤炭工程*, 2016, 48(1): 84–87.
- FAN Jingdao, WANG Guofa, ZHANG Jinhu, et al. Design and practice of integrated system for intelligent unmanned working face mining system in Huangling coal mine[J]. *Coal engineering*, 2016, 48(1): 84–87.
- [27] SU Yinao. Geosteering drilling technology and its development in China[J]. *Min. Metall. Eng.*, 2003, 23: 4–6.
- [28] BASARIR H, FERID OGE I, AYDIN O. Prediction of the stresses around main and tail gates during top coal caving by 3D numerical analysis[J]. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 2015, 76: 88–97.
- [29] MASSINAEI M, JAHEDSARAVANI A, TAHERI E, et al. Machine vision based monitoring and analysis of a coal column flotation circuit[J]. *Powder technology*, 2019, 343: 330–341.
- [30] WANG Jinhua, HUANG Zenghua. The recent technological development of intelligent mining in China[J]. *Engineering*, 2017, 3(4): 439–444.
- [31] DONG Longjun, SUN Daoyuan, HAN Guangjie, et al. Velocity-free localization of autonomous driverless vehicles in underground intelligent mines[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2020, 69(9): 9292–9303.
- [32] 张科学, 李首滨, 何满潮, 等. 智能化无人开采系列关键技术之一——综采智能化工作面调斜控制技术研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(1): 139–149.
- ZHANG Kexue, LI Shoubin, HE Manchao. Study on key technologies of intelligent unmanned coal mining series I: study on diagonal adjustment control technology of intelligent fully mechanized coal mining face[J]. *Coal science and technology*, 2018, 46(1): 139–149.
- [33] 张科学. 综掘工作面智能化开采技术研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(7): 106–111.
- ZHANG Kexue. Study on intelligent mining technology of fully-mechanized heading face[J]. *Coal science and technology*, 2017, 45(7): 106–111.
- [34] 张科学, 王晓玲, 何满潮, 等. 智能化无人开采工作面适用性多层次模糊综合评价研究 [J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2021, 3(1): 47–56.
- ZHANG Kexue, WANG Xiaoling, HE Manchao, et al. Research on multi-level fuzzy comprehensive evaluation of the applicability of intelligent unmanned mining face[J]. *Journal of mining and strata control engineering*, 2021, 3(1): 47–56.
- [35] 黄曾华, 王峰, 张守祥. 智能化采煤系统架构及关键技术研究 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 1959–1972.
- HUANG Zenghua, WANG Feng, ZHANG Shouxian. Research on the architecture and key technologies of intelligent coal mining system[J]. *Journal of China coal society*, 2020, 45(6): 1959–1972.
- [36] MAYET C, HORREIN L, BOUSCAYROL A, et al. Comparison of different models and simulation approaches for the energetic study of a subway[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2014, 63(2): 556–565.
- [37] JIMÉNEZ-REDONDO J. Driverless operation solutions[J]. *Mass transit*, 2010, 36(3): 60–63.
- [38] MOHAMMED T S, AL-AZZO W F, AKAAK M A, et al. Full automation in driverless trains: a microcontroller-based prototype[J]. *International journal of advanced research in electrical, electronics and instrumentation engineering*, 2014, 3(7): 10417–10422.
- [39] SIEMIATYCKI M. Message in a metro: building urban rail infrastructure and image in Delhi, India[J]. *International journal of urban and regional research*, 2006, 30(2): 277–292.
- [40] 马妍. 城市轨道交通无人驾驶系统中信号与车辆接口分析 [J]. *城市轨道交通研究*, 2018, 21(S1): 10–12.
- MA Yan. Analysis of the interface between UTO signal system and urban rail transit vehicle[J]. *Urban mass transit*, 2018, 21(S1): 10–12.
- [41] WEI Lijie, SHENG Yanzhe, DU Qingyun. Research on automatic unmanned urban rail integrated automation system[J]. *Journal of physics:conference series*, 2019, 1168: 022080.
- [42] 杜焯. 城市轨道交通无人驾驶系统的功能需求及相关技术要点 [J]. *城市轨道交通研究*, 2017, 20(S1): 14–17.
- DU Ye. Analysis on the requirements of driverless signaling system and related technologies in urban rail transit[J]. *Urban mass transit*, 2017, 20(S1): 14–17.

- [43] LIU Huixuan, ZHAO Dongfu, LI Guohua, et al. Review on operation management mode of urban underground utility tunnel[C]//Proceedings of the 2018 International Symposium on Humanities and Social Sciences, Management and Education Engineering (HSSMEE 2018). Paris, France: Atlantis Press, 2018: 192–195.
- [44] ABBAS M Z, ABU BAKER K, AYAZ M, et al. Key factors involved in pipeline monitoring techniques using robots and WSNs: comprehensive survey[J]. *Journal of pipeline systems engineering and practice*, 2018, 9(2): 04018001.
- [45] KWAK P J, PARK S H, CHOI C H, et al. IoT(internet of things)-based underground risk assessment system surrounding water pipes in Korea[J]. *International journal of control and automation*, 2015, 8(11): 183–190.
- [46] 王越林, 陆烨. 城市地区管道渗漏引发地面塌陷成灾机理的 CFD-DEM 联合计算模拟分析 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 60–67.
WANG Yuelin, LU Ye. CFD-DEM simulation of disaster mechanism of pavement collapse caused by pipeline leakage in urban areas[J]. *Journal of civil and environmental engineering*, 2021, 43(2): 60–67.
- [47] LEE L H, RAJKUMAR R, LO L H, et al. Oil and gas pipeline failure prediction system using long range ultrasonic transducers and Euclidean-Support Vector Machines classification approach[J]. *Expert systems with applications*, 2013, 40(6): 1925–1934.
- [48] CHENG J C P, WANG Mingzhu. Automated detection of sewer pipe defects in closed-circuit television images using deep learning techniques[J]. *Automation in construction*, 2018, 95: 155–171.
- [49] 石纯民, 董建敏. 地下空间: 未来战争的关键战场 [J]. 科学中国人, 2018(20): 74–75.
SHI Chunmin, DONG Jianmin. Underground space: the key battlefield of future war[J]. *Scientific Chinese*, 2018(20): 74–75.
- [50] 刘波. 抗美援朝战争中的“地下长城”[J]. 同舟共进, 2020(12): 45–48.
LIU Bo. The ‘underground great wall’ in the War to Resist US aggression and Aid Korea[J]. *Forging ahead together*, 2020(12): 45–48.
- [51] 康宁. 阿富汗战争和地下空间 [J]. 浙江国土资源, 2003(1): 62–64.
KANG Ning. Afghanistan war and underground space[J]. *Zhejiang land & resources*, 2003(1): 62–64.
- [52] 傅光明, 徐新文. 地下战场: 未来战争的新空间 [J]. 国防科技, 2017, 38(1): 8–12.
FU Guangming, XU Xinwen. Underground battlefield-a new space of the future war[J]. *National defense science & technology*, 2017, 38(1): 8–12.
- [53] LEDA J C. Defense advanced research projects agency home page. Fast lightweight autonomy (FLA) [EB/OL]. <http://www.darpa.mil/program/fastlightweightautonomy>.
- [54] PASCHALL S, ROSE J. Fast, lightweight autonomy through an unknown cluttered environment: distribution statement: a approved for public release; distribution unlimited[C]//2017 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE, 2017: 1–8.
- [55] 王彤, 李磊, 蒋琪. 美国“快速轻量自主”项目推进无人系统自主能力发展 [J]. 无人系统技术, 2019, 2(1): 58–64.
WANG Tong, LI Lei, JIANG Qi. DARPA fast lightweight autonomy program promotes unmanned system autonomy development[J]. *Unmanned systems technology*, 2019, 2(1): 58–64.
- [56] 孙雷, 韩峰. 便携式 ULF/VLF 机械通信天线技术的研究进展 [J]. 电讯技术, 2021, 61(3): 384–390.
SUN Lei, HAN Feng. Research progress of portable mechanically based antenna project for ULF/ VLF communication[J]. *Telecommunication engineering*, 2021, 61(3): 384–390.
- [57] CHUNG T. DARPA subterranean (Sub T)challenge [EB/OL]. <https://www.subchallenge.com>, DARPA.
- [58] 高博特. “跨越险阻 2021”第四届陆上无人系统挑战赛赛事通知 [EB/OL]. https://www.auvsc.com/page123?article_id=1619.
Gao Bote. The 4th land-based unmanned systems challenge "over the hedge 2021" event notice[EB/OL]. https://www.auvsc.com/page123article_id=1619
- [59] 国防科技快响小组. “地下探测—2020”城市地下空间内物体探测系统挑战赛, “深度透视—2020”城市地下空间结构探测系统挑战赛 [EB/OL]. <https://ibook.antpedia.com/x/491292.html>.
Defense Science and Technology Express Team. "Underground detection - 2020" urban underground space object detection system challenge, "deep perspective - 2020" urban underground space structure detection system challenge[EB/OL]. <https://ibook.antpedia.com/x/491292.html>.
- [60] KENDOUL F. Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems[J]. *Journal of field robotics*, 2012, 29(2): 315–378.
- [61] 李新年, 李清华, 王常虹, 等. 美国地下领域无人系统发展现状及启示 [J]. 导航定位与授时, 2021, 8(6): 52–59.
LI Xinnian, LI Qinghua, WANG Changhong, et al. Development and enlightenment of unmanned underground system in the United States[J]. *Navigation positioning and timing*, 2021, 8(6): 52–59.
- [62] FOROOSHANI A E, BASHIR S, MICHELSON D G, et

- al. A survey of wireless communications and propagation modeling in underground mines[J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2013, 15(4): 1524–1545.
- [63] BANDYOPADHYAY L K, CHAULYA S K, MISHRA P K. *Wireless communication in underground mines*[M]. Boston, MA: Springer US, 2010.
- [64] 胡青松, 杨维, 丁恩杰, 等. 煤矿应急救援通信技术的现状与趋势 [J]. *通信学报*, 2019, 40(5): 163–179.
HU Qingsong, YANG Wei, DING Enjie, et al. State-of-the-art and trend of emergency rescue communication technologies for coal mine[J]. *Journal on communications*, 2019, 40(5): 163–179.
- [65] YARKAN S, GUZELGOZ S, ARSLAN H, et al. Underground mine communications: a survey[J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2009, 11(3): 125–142.
- [66] THOMESSE J P. Fieldbus technology in industrial automation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 93(6): 1073–1101.
- [67] LI Jianqiang, YU F R, DENG Genqiang, et al. Industrial Internet: a survey on the enabling technologies, applications, and challenges[J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2017, 19(3): 1504–1526.
- [68] 张喜萍. 基于工业以太网的全数字矿井视频监控系统 [J]. *煤矿安全*, 2018, 49(12): 112–114.
ZHANG Xiping. Digital mine video monitoring system based on industrial Ethernet[J]. *Safety in coal mines*, 2018, 49(12): 112–114.
- [69] JASPERNEITE J, FELD J. PROFINET: an integration platform for heterogeneous industrial communication systems[C]//2005 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Piscataway: IEEE, 2006: 8–22.
- [70] PATRI A, NAYAK A, JAYANTHU S. Wireless communication systems for underground mines - a critical appraisal[J]. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2013, 4(7): 3149–3153.
- [71] RANJAN A, SAHU H B, MISRA P. Modeling and measurements for wireless communication networks in underground mine environments[J]. *Measurement*, 2020, 149: 106980.
- [72] CHEN Wei, WANG Xuzhou. Coal mine safety intelligent monitoring based on wireless sensor network[J]. *IEEE sensors journal*, 2021, 21(22): 25465–25471.
- [73] ALDOSSARI S M, CHEN K C. Machine learning for wireless communication channel modeling: an overview[J]. *Wireless personal communications*, 2019, 106(1): 41–70.
- [74] 孙彦景, 吴天琦, 施文娟, 等. 无线透地通信理论与关键技术研究 [J]. *工矿自动化*, 2017, 43(9): 46–53.
SUN Yanjing, WU Tianqi, SHI Wenjuan, et al. Research on theory and key technologies of wireless through-the-earth communication[J]. *Industry and mine automation*, 2017, 43(9): 46–53.
- [75] 郝建军, 孙晓晨. 几种透地通信技术的分析与对比 [J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 29(1): 59–63.
HAO Jianjun, SUN Xiaochen. Analysis and comparison of several through-the-earth communication technologies for mining[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (natural science edition)*, 2014, 29(1): 59–63.
- [76] CARREÑO J, SILVA L, NEVES S, et al. Through-the-earth (TTE) communications for underground mines[J]. *Journal of communication and information systems*, 2016, 31(1): 164–176.
- [77] 丁宏. DARPA 机械天线项目或掀起军事通信革命 [J]. *现代军事*, 2017(4): 71–73.
DING Hong. DARPA mechanical antenna project or military communication revolution[J]. *Conmilit*, 2017(4): 71–73.
- [78] 崔勇, 吴明, 宋晓, 等. 小型低频发射天线的研究进展 [J]. *物理学报*, 2020, 69(20): 171–183.
CUI Yong, WU Ming, SONG Xiao, et al. Research progress of small low-frequency transmitting antenna[J]. *Acta physica sinica*, 2020, 69(20): 171–183.
- [79] BICKFORD J A, MCNABB R S, WARD P A, et al. Low frequency mechanical antennas: electrically short transmitters from mechanically-actuated dielectrics[C]//2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Piscataway: IEEE, 2017: 1475–1476.
- [80] BICKFORD J A, DUWEL A E, WEINBERG M S, et al. Performance of electrically small conventional and mechanical antennas[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2019, 67(4): 2209–2223.
- [81] XU Jianchun, CAO Jinjing, GUO Menghao, et al. Metamaterial mechanical antenna for very low frequency wireless communication[J]. *Advanced composites and hybrid materials*, 2021, 4(3): 761–767.
- [82] CHU L J. Physical limitations of omni-directional antennas[J]. *Journal of applied physics*, 1948, 19(12): 1163–1175.
- [83] BURCH H C, GARRAUD A, MITCHELL M F, et al. Experimental generation of ELF radio signals using a rotating magnet[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2018, 66(11): 6265–6272.
- [84] YANG Guangying, DU Jianke, WANG Ji, et al. Frequency dependence of electromagnetic radiation from a finite vibrating piezoelectric body[J]. *Mechanics research communications*, 2018, 93: 163–168.
- [85] YANG Shaolong, XU Jianchun, GUO Menghao, et al.

- Progress on very/ultra low frequency mechanical antennas[J]. *ES materials & manufacturing*, 2021: 1–12.
- [86] SUN Zhi, AKYILDIZ I F. Magnetic induction communications for wireless underground sensor networks[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2010, 58(7): 2426–2435.
- [87] AKYILDIZ I F, SUN Zhi, VURAN M C. Signal propagation techniques for wireless underground communication networks[J]. *Physical communication*, 2009, 2(3): 167–183.
- [88] AGBINYA J I. Investigation of near field inductive communication system models, channels and experiments[J]. *Progress in electromagnetics research B*, 2013, 49: 129–153.
- [89] 崔勇, 王琛, 宋晓. 基于驻极体材料的机械天线式低频通信系统仿真研究 [J]. *自动化学报*, 2021, 47(6): 1335–1342.
- CUI Yong, WANG Chen, SONG Xiao. Simulation and analysis of mechanical antenna low frequency communication system based on electret material[J]. *Acta automatica sinica*, 2021, 47(6): 1335–1342.
- [90] 施伟, 周强, 刘斌. 基于旋转永磁体的超低频机械天线电磁特性分析 [J]. *物理学报*, 2019, 68(18): 314–324.
- SHI Wei, ZHOU Qiang, LIU Bin. Performance analysis of spinning magnet as mechanical antenna[J]. *Acta physica sinica*, 2019, 68(18): 314–324.
- [91] DOMINGO M C. Magnetic induction for underwater wireless communication networks[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2012, 60(6): 2929–2939.
- [92] 王晓煜, 张雯厚, 孙丽慧, 等. 超低频机械天线通信模型及信号接收线圈研究 [J]. *电子学报*, 2021, 49(4): 824–832.
- WANG Xiaoyu, ZHANG Wenhui, SUN Lihui, et al. Research on super-low frequency mechanical antenna model and experimental study of magnetic sensor coil[J]. *Acta electronica sinica*, 2021, 49(4): 824–832.
- [93] WANG Chen, CUI Yong, WEI Minsong. Mechanically-rotating electret ULF/VLF antenna transmitter[C]//2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Piscataway: IEEE, 2019: 1383–1384.
- [94] LIANG Bowen, CUI Yong, SONG Xiao, et al. Multi-block electret-based mechanical antenna model for low frequency communication[J]. *International journal of modeling, simulation, and scientific computing*, 2019, 10(5): 1950036.
- [95] FAWOLE O C, TABIB-AZAR M. An electromechanically modulated permanent magnet antenna for wireless communication in harsh electromagnetic environments[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2017, 65(12): 6927–6936.
- [96] BARANI N, SARABANDI K. Mechanical antennas: emerging solution for very-low frequency (VLF) communication[C]//2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Piscataway: IEEE, 2019: 95–96.
- [97] KEMP M A, FRANZI M, HAASE A, et al. A high Q piezoelectric resonator as a portable VLF transmitter[J]. *Nature communications*, 2019, 10: 1715.
- [98] DONG Cunzheng, HE Yifan, LI Menghui, et al. A portable very low frequency (VLF) communication system based on acoustically actuated magnetoelectric antennas[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2020, 19(3): 398–402.
- [99] NAN Tianxiang, LIN H, GAO Yuan, et al. Acoustically actuated ultra-compact NEMS magnetoelectric antennas[J]. *Nature communications*, 2017, 8: 296.
- [100] REZAEI H, KHILKEVICH V, YONG Shaohui, et al. Mechanical magnetic field generator for communication in the ULF range[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2020, 68(3): 2332–2339.
- [101] SELVIN S, SRINIVAS PRASAD M N, HUANG Yikun, et al. Spinning magnet antenna for VLF transmitting[C]//2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Piscataway: IEEE, 2017: 1477–1478.
- [102] 周强, 姚富强, 施伟, 等. 机械式低频天线机理及其关键技术研究 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50(1): 69–84.
- ZHOU Qiang, YAO Fuqiang, SHI Wei, et al. Research on mechanism and key technology of mechanical antenna for a low-frequency transmission[J]. *Scientia sinica (technologica)*, 2020, 50(1): 69–84.
- [103] RILEY J M, ENDSLEY M R, BOLSTAD C A, et al. Collaborative planning and situation awareness in Army command and control[J]. *Ergonomics*, 2006, 49(12/13): 1139–1153.
- [104] 陈军, 张岳, 陈晓威, 等. 基于模糊灰色认知图的复杂战场智能态势感知建模方法 [J]. *兵工学报*, 2022, 43(5): 1093–1106.
- CHEN Jun, ZHANG Yue, CHEN Xiaowei, et al. FGCM-based modeling method of intelligent situation awareness in complex battlefield[J]. *Acta armamentarii*, 2022, 43(5): 1093–1106.
- [105] 孔亦思, 胡晓峰, 朱丰, 等. 战场态势感知中的注意力机制探析 [J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(10): 2233–2240, 2246.
- KONG Yisi, HU Xiaofeng, ZHU Feng, et al. Attention mechanism in battlefield situation awareness[J]. *Journal of system simulation*, 2017, 29(10): 2233–2240, 2246.

- [106] 陈军, 梁晶, 程龙, 等. 基于 FCM 的多无人机协同攻击决策建模方法 [J]. 航空学报, 2022, 43(7): 325526.
CHEN Jun, LIANG Jing, CHENG Long, et al. Cooperative attack decision modeling method of multiple UAVs based on FCM[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2022, 43(7): 325526.
- [107] ENDSLEY M R, ROBERTSON M M. Situation awareness in aircraft maintenance teams[J]. [International journal of industrial ergonomics](#), 2000, 26(2): 301–325.
- [108] 唐帅文, 周志杰, 姜江, 等. 考虑扰动的无人机集群协同态势感知一致性评估 [J]. 航空学报, 2020, 41(S2): 724233.
TANG Shuaiwen, ZHOU Zhijie, JIANG Jiang, et al. Consensus evaluation of UAV swarm cooperative situation awareness considering perturbation[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2020, 41(S2): 724233.
- [109] BASHIRI B, MANN D D. Automation and the situation awareness of drivers in agricultural semi-autonomous vehicles[J]. [Biosystems engineering](#), 2014, 124: 8–15.
- [110] BASS T, GRUBER D. A glimpse into the future of id[J]. The magazine of USENIX & SAGE, 1999, 24(3): 40–45.
- [111] 龚俭, 臧小东, 苏琪, 等. 网络安全态势感知综述 [J]. 软件学报, 2017, 28(4): 1010–1026.
GONG Jian, ZANG Xiaodong, SU Qi, et al. Survey of network security situation awareness[J]. Journal of software, 2017, 28(4): 1010–1026.
- [112] 张红斌, 尹彦, 赵冬梅, 等. 基于威胁情报的网络安全态势感知模型 [J]. 通信学报, 2021, 42(6): 182–194.
ZHANG Hongbin, YIN Yan, ZHAO Dongmei, et al. Network security situational awareness model based on threat intelligence[J]. Journal on communications, 2021, 42(6): 182–194.
- [113] ERBACHER R F, FRINCKE D A, WONG P C, et al. A multi-phase network situational awareness cognitive task analysis[J]. [Information visualization](#), 2010, 9(3): 204–219.
- [114] FERGUSON D C, WORDEN S P, HASTINGS D E. The space weather threat to situational awareness, communications, and positioning systems[J]. [IEEE transactions on plasma science](#), 2015, 43(9): 3086–3098.
- [115] 尤政, 赵开春. 仿生偏振特征感知与导航信息融合的空间态势感知系统 [J]. 遥感学报, 2018, 22(6): 917–925.
YOU Zheng, ZHAO Kaichun. Space situational awareness system based on bionic polarization feature sensing and navigation information fusion[J]. Journal of remote sensing, 2018, 22(6): 917–925.
- [116] COHEN G, AFSHAR S, MORREALE B, et al. Event-based sensing for space situational awareness[J]. [The journal of the astronautical sciences](#), 2019, 66(2): 125–141.
- [117] DELANDE E, FRUEH C, FRANCO J, et al. Novel multi-object filtering approach for space situational awareness[J]. [Journal of guidance, control, and dynamics](#), 2018, 41(1): 59–73.
- [118] ENDSLEY M R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems[J]. [Human factors: the journal of the human factors and ergonomics society](#), 1995, 37(1): 32–64.
- [119] LENDERS V, TANNER A, BLARER A. Gaining an edge in cyberspace with advanced situational awareness[J]. [IEEE security & privacy](#), 2015, 13(2): 65–74.
- [120] CHIAPPE D, RORIE R C, MORGAN C A, et al. A situated approach to the acquisition of shared SA in team contexts[J]. [Theoretical issues in ergonomics science](#), 2014, 15(1): 69–87.
- [121] STANTON N A, STEWART R, HARRIS D, et al. Distributed situation awareness in dynamic systems: theoretical development and application of an ergonomics methodology[J]. [Ergonomics](#), 2006, 49(12/13): 1288–1311.
- [122] 高杨, 李东生, 程泽新. 无人机分布式集群态势感知模型研究 [J]. [电子与信息学报](#), 2018, 40(6): 1271–1278.
GAO Yang, LI Dongsheng, CHENG Zexin. UAV distributed swarm situation awareness model[J]. [Journal of electronics & information technology](#), 2018, 40(6): 1271–1278.
- [123] SALMON P M, STANTON N A, WALKER G H. Distributed situation awareness and vehicle automation[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2020: 293–317.
- [124] SALAS E, SHUFFLER M L, THAYER A L, et al. Understanding and improving teamwork in organizations: a scientifically based practical guide[J]. [Human resource management](#), 2015, 54(4): 599–622.
- [125] SANER L D, BOLSTAD C A, GONZALEZ C, et al. Measuring and predicting shared situation awareness in teams[J]. [Journal of cognitive engineering and decision making](#), 2009, 3(3): 280–308.
- [126] 邵振峰, 左肖龙, 邵焱明, 等. 无人遥感平台场景感知关键技术与应用 [J]. 测绘地理信息, 2023, 48(6): 1–7.
SHAO Zhenfeng, ZUO Xiaolong, SHAO Yanming, et al. Key technologies and applications of scene perception in unmanned remote sensing platform[J]. [Journal of geomatics](#), 2023, 48(6): 1–7.
- [127] SHU Yufei, FURUTA K. An inference method of team situation awareness based on mutual awareness[J]. [Cognition, technology & work](#), 2005, 7(4): 272–287.
- [128] KOKAR M M, ENDSLEY M R. Situation awareness and cognitive modeling[J]. [IEEE intelligent systems](#),

- 2012, 27(3): 91–96.
- [129] 俞肇元, 袁林旺, 吴明光, 等. 地理学视角下地理信息的分类与描述 [J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(1): 17–24.
YU Zhaoyuan, YUAN Linwang, WU Mingguang, et al. Classification and description of geographic information from the perspective of geography[J]. Journal of geo-information science, 2022, 24(1): 17–24.
- [130] TABREZ A, LUEBBERS M B, HAYES B. Descriptive and prescriptive visual guidance to improve shared situational awareness in human-robot teaming[C]//Proceedings of the 21st International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. New York: ACM, 2022: 1256–1264.
- [131] 王永利, 谢策, 张永亮, 等. 态势认知总体框架及其关键技术 [J]. 指挥信息系统与技术, 2021, 12(3): 7–12.
WANG Yongli, XIE Ce, ZHANG Yongliang, et al. Framework and its key technology of situation cognition[J]. Command information system and technology, 2021, 12(3): 7–12.
- [132] YUAN Faxi, FAN Chao, FARAHMAND H, et al. Smart flood resilience: harnessing community-scale big data for predictive flood risk monitoring, rapid impact assessment, and situational awareness[J]. [Environmental research: infrastructure and sustainability](#), 2022, 2(2): 025006.
- [133] PAL A, WANG Junbo, WU Yilang, et al. Social media driven big data analysis for disaster situation awareness: a tutorial[J]. [IEEE transactions on big data](#), 2023, 9(1): 1–21.
- [134] WANG Qi, BU Siqi, HE Zhengyou, et al. Toward the prediction level of situation awareness for electric power systems using CNN-LSTM network[J]. [IEEE transactions on industrial informatics](#), 2021, 17(10): 6951–6961.
- [135] 简玲, 叶天鹏, 林祥, 等. 多源融合的大数据网络安全态势感知平台研究与探索 [J]. 信息安全, 2020(S2): 139–143.
JIAN Ling, YE Tianpeng, LIN Xiang, et al. Research and exploration on security situation awareness platform of big data network based on multi-source fusion[J]. Netinfo security, 2020(S2): 139–143.
- [136] FAN Chao, JIANG Yucheng, MOSTAFAVI A. Social sensing in disaster city digital twin: integrated textual–visual–geo framework for situational awareness during built environment disruptions[J]. [Journal of management in engineering](#), 2020, 36(3): 04020002.
- [137] KODITUWAKKU H A D E, KELLER A, GREGOR J. InSight2: a modular visual analysis platform for network situational awareness in large-scale networks[J]. [Electronics](#), 2020, 9(10): 1747.
- [138] 申良强, 刘健, 任煜, 等. 复杂阵地态势可视化关键技术研究 [J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(7): 147–150.
SHEN Liangqiang, LIU Jian, REN Yu, et al. Research on the key techniques of complex position about situation visualization[J]. Fire control & command control, 2019, 44(7): 147–150.
- [139] 张昊. 通用战场态势可视化系统的设计及实现 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(17): 258–265.
ZHANG Hao. Design and implementation of general battlefield visualization system[J]. Computer engineering and applications, 2018, 54(17): 258–265.
- [140] 黄亚锋, 李旭东, 张航峰. 战场态势多尺度表达研究 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30(2): 452–458, 464.
HUANG Yafeng, LI Xudong, ZHANG Hangfeng. Multi-scale representation of battlefield situation[J]. Journal of system simulation, 2018, 30(2): 452–458, 464.
- [141] 刘靖旭, 宋留勇, 王潇雨. 网络空间态势的多尺度表达研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(11): 1202–1206.
LIU Jingxu, SONG Liuyong, WANG Xiaoyu. Study on the multi-scale representation of network space situation[J]. Journal of China academy of electronics and information technology, 2019, 14(11): 1202–1206.
- [142] ZHUO X, KURZ F, REINARTZ P. Fusion of multi-view and multi-scale aerial imagery for real-time situation awareness applications[J]. [The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences](#), 2015, XL-1/W4: 201–206.
- [143] 刘嵩, 武志强, 游雄, 等. 基于兵棋推演的综合战场态势多尺度表达 [J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(5): 382–385, 390.
LIU Song, WU Zhiqiang, YOU Xiong, et al. Multi-scale expression of integrated battlefield situation based on wargaming[J]. [Journal of geomatics science and technology](#), 2012, 29(5): 382–385, 390.
- [144] CADENA C, CARLONE L, CARRILLO H, et al. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: toward the robust-perception age[J]. [IEEE transactions on robotics](#), 2016, 32(6): 1309–1332.
- [145] DELMERICO J, SCARAMUZZA D. A benchmark comparison of monocular visual-inertial odometry algorithms for flying robots[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation . Piscataway: IEEE, 2018: 2502–2509.
- [146] ALISMAIL H, KAESS M, BROWNING B, et al. Direct visual odometry in low light using binary descriptors[J]. [IEEE robotics and automation letters](#), 2017, 2(2): 444–451.
- [147] SEGAL A, HAEHNEL D, THRUN S. Generalized-

- ICP[C]//Robotics: Science and Systems V. Robotics: Science and Systems Foundation, 2009: 1–8.
- [148] MAGNUSSON M, LILIENTHAL A, DUCKETT T. Scan registration for autonomous mining vehicles using 3D-NDT[J]. *Journal of field robotics*, 2007, 24(10): 803–827.
- [149] STÜCKLER J, BEHNKE S. Multi-resolution surfel maps for efficient dense 3D modeling and tracking[J]. *Journal of visual communication and image representation*, 2014, 25(1): 137–147.
- [150] SCARAMUZZA D, FRAUNDORFER F. Visual odometry tutorial[J]. *IEEE robotics & automation magazine*, 2011, 18(4): 80–92.
- [151] OSKIPER T, ZHU Zhiwei, SAMARASEKERA S, et al. Visual odometry system using multiple stereo cameras and inertial measurement unit[C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2007: 1–8.
- [152] JONES E S, SOATTO S. Visual-inertial navigation, mapping and localization: a scalable real-time causal approach[J]. *The international journal of robotics research*, 2011, 30(4): 407–430.
- [153] STEINER T J, RASMUSSEN S A, DEBITETTO P A, et al. Unifying inertial and relative solutions for planetary hopper navigation[C]//2012 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE, 2012: 1–8.
- [154] GOLDBERG S B, MATTHIES L. Stereo and IMU assisted visual odometry on an OMAP3530 for small robots[C]//CVPR 2011 WORKSHOPS. Piscataway: IEEE, 2011: 169–176.
- [155] YAO Erliang, ZHANG Hexin, SONG Haitao, et al. Fast and robust visual odometry with a low-cost IMU in dynamic environments[J]. *Industrial robot: the international journal of robotics research and application*, 2019, 46(6): 882–894.
- [156] MOURIKIS A I, ROUMELIOTIS S I. A multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation[C]//Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2007: 3565–3572.
- [157] LI Mingyang, MOURIKIS A I. High-precision, consistent EKF-based visual-inertial odometry[J]. *The international journal of robotics research*, 2013, 32(6): 690–711.
- [158] 樊真权. 地下环境几何建模与移动机器人自主探索策略研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
FAN Zhenquan. Research on geometric modeling and autonomous exploration strategies of mobile robot for underground environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [159] ÖZASLAN T, LOIANNO G, KELLER J, et al. Autonomous navigation and mapping for inspection of penstocks and tunnels with MAVs[J]. *IEEE robotics and automation letters*, 2017, 2(3): 1740–1747.
- [160] NIEUWENHUISEN M, QUENZEL J, BEUL M, et al. ChimneySpector: autonomous MAV-based indoor chimney inspection employing 3D laser localization and textured surface reconstruction[C]//2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Piscataway: IEEE, 2017: 278–285.
- [161] JUNG S, LEE H, SHIM D H, et al. Collision-free local planner for unknown subterranean navigation[J]. *ETRI journal*, 2021, 43(4): 580–593.
- [162] STEINER T J, TRUAX R D, FREY K. A vision-aided inertial navigation system for agile high-speed flight in unmapped environments: distribution statement A: approved for public release, distribution unlimited[C]//2017 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE, 2017: 1–10.
- [163] HOWARD A, PARKER L E, SUKHATME G S. Experiments with a large heterogeneous mobile robot team: exploration, mapping, deployment and detection[J]. *The international journal of robotics research*, 2006, 25(5/6): 431–447.
- [164] HSIEH M A, COWLEY A, KELLER J F, et al. Adaptive teams of autonomous aerial and ground robots for situational awareness[J]. *Journal of field robotics*, 2007, 24(11/12): 991–1014.
- [165] BALAKIRSKY S, CARPIN S, KLEINER A, et al. Towards heterogeneous robot teams for disaster mitigation: results and performance metrics from RoboCup rescue[J]. *Journal of field robotics*, 2007, 24(11/12): 943–967.
- [166] BUTZKE J, DANIILIDIS K, KUSHLEYEV A, et al. The University of Pennsylvania MAGIC 2010 multi-robot unmanned vehicle system[J]. *Journal of field robotics*, 2012, 29(5): 745–761.
- [167] GREGORY J, FINK J, STUMP E, et al. Application of multi-robot systems to disaster-relief scenarios with limited communication[M]. Cham: Springer, 2016: 639–653.
- [168] ROUČEK T, PECKA M, ČÍŽEK P, et al. DARPA subterranean challenge: multi-robotic exploration of underground environments[C]//Mazal J, Fagiolini A, Vasik P. International Conference on Modelling and Simulation for Autonomous Systems. Cham: Springer, 2020: 274–290.
- [169] LIU Yugang, NEJAT G. Robotic urban search and rescue: a survey from the control perspective[J]. *Journal of intelligent & robotic systems*, 2013, 72(2): 147–165.

- [170] RECCHIUTO C T, SGORBISSA A. Post-disaster assessment with unmanned aerial vehicles: a survey on practical implementations and research approaches[J]. *Journal of field robotics*, 2018, 35(4): 459–490.
- [171] LI Jianqiang, DENG Genqiang, LUO Chengwen, et al. A hybrid path planning method in unmanned air/ground vehicle (UAV/UGV) cooperative systems[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2016, 65(12): 9585–9596.
- [172] MILLER I D, CLADERA F, COWLEY A, et al. Mine tunnel exploration using multiple quadrupedal robots[J]. *IEEE robotics and automation letters*, 2020, 5(2): 2840–2847.
- [173] BOUMAN A, GINTING M F, ALATUR N, et al. Autonomous spot: long-range autonomous exploration of extreme environments with legged locomotion[C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems . Piscataway: IEEE, 2021: 2518–2525.
- [174] QIN Hailong, MENG Zehui, MENG Wei, et al. Autonomous exploration and mapping system using heterogeneous UAVs and UGVs in GPS-denied environments[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2019, 68(2): 1339–1350.
- [175] MASCARICH F, KHATTAK S, PAPACHRISTOS C, et al. A multi-modal mapping unit for autonomous exploration and mapping of underground tunnels[C]//2018 IEEE aerospace conference. Montana: IEEE, 2018: 1–7.
- [176] TARDIOLI D, RIAZUELO L, SECO T, et al. A robotized dumper for debris removal in tunnels under construction[C]//Ollero A, Sanfeliu A, Montano L, et al. Iberian Robotics conference. Cham: Springer, 2018: 126–139.
- [177] EBADI K, CHANG Yun, PALIERI M, et al. LAMP: large-scale autonomous mapping and positioning for exploration of perceptually-degraded subterranean environments[C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2020: 80–86.
- [178] KIM S K, BOUMAN A, SALHOTRA G, et al. PLGRIM: hierarchical value learning for large-scale exploration in unknown environments[J]. *Proceedings of the international conference on automated planning and scheduling*, 2021, 31: 652–662.
- [179] DANG T, TRANZATTO M, KHATTAK S, et al. Graph-based subterranean exploration path planning using aerial and legged robots[J]. *Journal of field robotics*, 2020, 37(8): 1363–1388.
- [180] OHRADZANSKY M T, MILLS A B, RUSH E R, et al. Reactive control and metric-topological planning for exploration[C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation . Piscataway: IEEE, 2020: 4073–4079.

作者简介:



王军, 教授, 博士生导师, 中国矿业大学科学技术研究院副院长、江苏省智能感知与无人系统创新平台主任、人工智能系主任, 江苏省双创计划“科技副总”, 兼任教育部高等学校创新方法教学指导分委员会委员、中国人工智能学会认知系统与信息处理专业委员会副主任, 主要研究方向为智能机器人与无人系统。主持和参与国家科技重大专项、国家自然科学基金项目、教育部人文社会科学基金项目、江苏省自然科学基金项目、企业事业委托项目等 20 余项, 授权 PCT 专利、发明专利、软件著作权等 31 项。发表学术论文 60 余篇, 出版专著及教材 6 部。E-mail: jrobot@126.com。



王佳慧, 博士研究生, 主要研究方向为地下空间无人集群自主控制与协同避障。E-mail: wjh371522@163.com。



吴保磊, 副教授, 主要研究方向为集群控制、机器视觉。主持国防项目 1 项、中央高校基本科研业务费项目、校实验技术开发项目各 1 项, 授权发明专利 5 项、软件著作权 3 项。发表学术论文 3 篇。E-mail: 4092@cumt.edu.cn。