DOI: 10.3901/JME.2020.11.001

智能应急救援装备研究现状与发展趋势*

董炳艳^{1,2} 张自强³ 徐兰军² 朱自虎¹ 杨琪³
赵京³ 李德武⁴ 陈树君³

- (1. 应急救援装备产业技术创新战略联盟 北京 100070;
2. 新兴际华集团应急研究总院 北京 100070;
3. 北京工业大学智能机械研究院 北京 100124;
4. 应急管理部救援协调和预案管理局 北京 100006)

摘要: 在地震、火灾等灾害现场,抢险救援任务的紧迫性突显了对智能化应急救援装备的迫切需求。智能应急救援装备的使用可极大地提高救援队伍的战斗力,快速、高效地处理各类灾害,特别是突如其来的严重灾难,大大减少救援人员的伤亡和国家的财产损失,具有重要的研究意义。按照工作环境和用途可将智能应急救援装备分为空中救援装备、陆地救援装备、水下救援装备以及通用救援装备等。在对智能应急救援装备及关键技术的研究现状进行概述的基础上,分析发现了当前研究还存在着缺乏高效的机构设计方法、装备可靠性不佳、智能化程度较低、通信技术成熟度不高以及人机友好性较差等问题,这都导致了智能应急救援装备在大型灾害现场应用程度不高。指出了智能应急救援装备将向着先进的结构设计、可靠的运动性能、高智能化、快速精准的通信及良好的人机交互的方向发展。

关键词: 救援装备; 智能控制; 自主决策; 精准通信; 人机友好

中图分类号: TP242

Research Status and Development Trend of Intelligent Emergency Rescue Equipment

DONG Bingyan^{1,2} ZHANG Ziqiang³ XU Lanjun² ZHU Zihu¹ YANG Qi³
ZHAO Jing³ LI Dewu⁴ CHEN Shujun³

- (1. China Emergency Response Alliance, Beijing 100070;
2. Emergency Research Institute of Xinxing Cathay International Group, Beijing 100070;
3. Intelligent Machinery Research Institute, Beijing University of Technology, Beijing 100124;
4. Rescue Coordination and Plan Management Bureau, Ministry of Emergency Management, Beijing 100006)

Abstract: In the disaster scenes, such as earthquake and fire, the urgency of the rescue mission highlights the urgent need for intelligent emergency rescue equipment. The use of intelligent emergency rescue equipment can greatly improve the combat effectiveness of the rescue team, and deal with various disasters quickly and efficiently, especially the sudden and serious disasters. It can reduce the casualties and property losses, which is of great significance for its research. According to the working environment and use, intelligent emergency rescue equipment can be divided into air, land, underwater and common rescue equipment. On the basis of summarizing the research status of intelligent emergency rescue equipment and key technologies, it is found that there are still some problems in the current research, such as lack of efficient mechanism design method, poor reliability of equipment, low intelligence, low maturity of communication technology and poor man-machine friendliness, which lead to the low application of intelligent emergency rescue equipment in large-scale disaster field. Intelligent emergency rescue equipment will develop in the direction of advanced structure design, reliable motion performance, high intelligence, fast and accurate communication and good human-computer interaction.

Key words: rescue equipment; intelligent control; autonomous decision; precision communication; human-machine friendly

* 应急管理部救援协调和预案管理局项目和北京市教育委员会一般项目
(KM201910005032)资助项目。20190530 收到初稿, 20190920 收到修改稿

0 前言

近年来,我国的自然灾害和人为事故频发,严重影响了人们的生命财产安全。例如,2018年,我国各种自然灾害共造成全国 1.3 亿人次受灾,589 人死亡,46 人失踪。2019 年一季度,各种自然灾害共造成全国 139.6 万人次受灾,87 人死亡。而对于安全事故,2018 年发生生产安全事故 4.9 万起,死亡 3.46 万人^[1-2]。这些事故都对国家的经济发展造成了巨大的损失。在灾难发生后,如果能够在最佳营救时间内利用先进的应急救援装备开展高效的救援,便可大幅降低救援难度,提高救援行动的成功率,减少不必要的人员伤亡。因此,应急救援行动对各种先进应急救援装备产生迫切的需求,引起了政府、科研院所乃至企业极大关注^[3]。

应急救援装备是指专门用于各种灾害现场应急救援的设备,满足应急救援状态下对监测预警、预防防护、通信指挥、处置救援、医疗救护、交通运输、后勤保障等实际功能的需要。其具有专业性强、可靠性要求高等特点,能够在复杂多变的灾害现场代替救援人员快速完成相关任务。我国应急装备的研发起步较晚,2003 年,我国颁布了《中华人民共和国突发事件应对法》、《国家突发公共事件总体应急预案》等一系列法律条例,使得应急救援工作逐步规范化、制度化。2008 年汶川地震后,我国进一步完善并形成了“一案三制”的应急管理体系,应急平台体系初具规模,我国应对各类突发事件的能力得到快速提升。2017 年,十九大报告中指出:坚决遏制重特大安全事故,提升防灾减灾救灾能力。2018 年 4 月,应急管理部正式成立,我国的应急管理事业迈上了新台阶。这些制度的建立都为应急救援装备的研发提供了政策支持。

然而,现有的应急救援装备多为人工操作,结构笨重且救援效率低,无法满足灾害现场的救援需求。近年来,许多科研人员逐渐将新的技术手段与救援装备相结合,先进的智能控制技术、多感知融合技术、无线通信技术等逐渐应用于救援装备,使得应急救援装备具有了智能的控制策略、精确的环境感知、突发情况下的自学习与自适应等能力,极大地将人从繁重耗时的救援工作中解脱出来,且能够完成救援人员无法完成的任务,在救援过程中发挥了更大的作用。例如,形态各异的搜救机器人具有体积小、灵活性高、越障能力强等特点,且可携带多种传感器,能够在有潜在危险的环境中替代人

类工作,例如进入倒塌的建筑物和有毒有害环境,或深处废墟内部以接触幸存者,对被埋压人员进行智能追踪,并对数据和图像进行智能识别、分析,提高救援效率。由此可见,智能化的应急救援装备已经成为了现代灾害救援任务中不可或缺的一部分,突显出良好的应用前景。

综上所述,智能化是现代救援装备的发展趋势之一,对其研究符合我国在应急救援方面的宏观布局,也是提高我国复杂灾害条件下抢险救援效率的必要手段之一。智能化应急救援装备的技术突破及产业化推广,必将增强应急救援产业的自主创新能力,提升我国智能应急救援装备的附加值和国际品牌竞争力,实现由制造大国向制造强国的历史跨越,助力完成“中国制造 2025”的宏伟目标。

1 智能应急救援装备国内外现状

1.1 发展概述

早期的救援装备大多为手动式的破拆、搬运等设备,救援人员的工作强度大、救援效率低,难以满足救援需求,大量被困人员因救援不及时或受到二次伤害而丧生。近二十年来,尤其是恐怖袭击大量发生之后,许多国家在应急救援装备方面做了大量的研究工作,以提高救援效率。

智能应急救援装备是指将智能技术与传统装备相结合,具有智能化、数字化、精准化、专业化等特点的一类应急救援装备,其能够实现人-环境-任务的高效融合,并具有一定决策能力,从而适应未来“快速、精确、高效”的救援需求。

智能救援装备种类繁多,根据救援环境和用途的不同,可分为空中救援装备、陆地救援装备、水下救援装备以及通用救援装备。其中,空中与水下救援装备的研发起步较晚,而由于地震、塌方、火灾等大部分灾难发生在陆地,因此,陆地救援装备研究成果较多,其又可以分为小型搜救装备、大型救援装备以及后勤保障装备等。此外,通用救援装备是指可应用于不同场景具有一定共性的救援装备,包括生命探测仪器、智能可穿戴装备以及通信装备等。智能救援装备分类如图 1 所示。通过不同智能救援装备的协调配合,可最终实现智能化的救援过程。

1.2 空中救援装备

空中救援装备以搜索任务为主,可突破复杂环境限制,对救援现场进行快速的大范围监控,具有良好的应用前景。小型无人机是常用的空中搜救装

备,通过搭载摄像头、生命探测雷达等,实现了对灾害现场的环境建模及目标识别。自 20 世纪 70 年代末 80 年代初以来,随着微机电系统(MEMS)、新型材料、新传感器制造技术以及飞行控制原理等技术的进步,小型无人机得到了突飞猛进的发展。在

救援领域,研究主要集中在如何利用小型无人机开展相应控制算法研究,以满足复杂救援现场的实际需求。根据空中救援装备的任务需求,研究内容包括救援现场的目标识别、轨迹规划、持久续航以及多机编队飞行等。

图 1 智能救援装备分类

(1) 目标识别。由于灾害现场情况复杂,如何从高空快速识别目标是亟待解决的问题。现有的目标识别方法主要通过视觉信息的图像处理实现目标识别^[4]。例如,马德里卡洛斯三世大学智能系统实验室为解决因事故现场环境复杂而导致的图像处理延迟问题,提出了一种基于机载传感器综合获取目标物颜色和深度数据的受害者辨别方法,通过信息的提取与判断,可在人体发生平移、旋转等移动情况下实现幸存者(或遇难人员)的准确判断,算法具有较强的鲁棒性。此外,通过多信息融合技术,还可对多目标进行跟踪监测,如图 2 所示^[5]。为了进一步提高目标识别的准确性,韩国庆尚大学计算机工程系提出了一种基于无人机在不同高度协同的改进的分层概率目标搜索算法。高空无人机首先进行广域搜索,当目标存在的概率高于某一阈值时,搜索信息被传送到低空无人机,通过在高空和低空无人机之间传输信息来缩短搜索时间和搜索距离。试

验表明,该算法比单一无人机视觉搜索算法的效率提高了 13%左右^[6]。在国内,长安大学钟南^[7]针对海上救援场景,通过采用深度学习算法对水上目标视频信息进行识别,采用卷积神经网络结构处理多维数组数据,满足面向水上船只及人员等漂浮物目标检测的需求。

图 2 多目标跟踪示意图

(2) 轨迹规划。轨迹规划主要是指无人机在灾害现场确定最优路径,以提高救援效率。在国外,

杨百翰大学 LIN 等^[8]考虑到无人机传感器信息会因环境因素的不同(如不同的植被密度或照明条件)为寻找最优路径带来困难这一问题,提出了一种启发式算法,该算法使用高斯混合模型对搜索子区域进行优先级排序,在不同的分辨率条件下搜索参数空间的有效路径。在国内,西北大学信息科学与技术学院为解决现有搜救无人机总是沿着固定的飞行路径搜索而导致灵活性不高的问题,提出了一种 2-OptACO 算法。分析结果表明,该方法比遗传算法和蚁群算法具有更快的收敛速度,可以得到更好的全局最优解^[9]。山东农业大学 WANG 等^[10]针对森林火灾的突发性强、蔓延性快、破坏性大等特点,利用三次插值法对规划空间的地形进行了描述,提出了基于涡流搜索(Vortex search, VS)算法的森林火灾救援无人机路径规划方法。该算法所规划的路径具有平滑且距离短的特征,适用于无人机的低空飞行。

(3) 持久续航。灾害事故中的救援任务往往要求救援装备长时间连续工作,这就对无人机的续航能力提出了较高的要求。苏黎世理工学院 Oettershagen 等^[11]针对无人机的有效载荷容量小、能量边际低的问题,从硬件和软件两方面开展了相关研究。在硬件方面,无人机采用了一种轻量级、日夜两用型的传感器系统,并将太阳能技术应用于无人机。在软件方面,提出了一种基于热上升气流跟踪框架的扩展卡尔曼滤波算法。该算法将环境因素考虑在内,降低了无人机飞行中的功率消耗。模拟试验表明,该无人机系统可持续 26 h 的搜救任务,具有较好的持久性。该无人机主体结构及电子系统如图 3 所示。

图3 太阳能无人机及电子系统示意图

(4) 无人机编队。灾害现场具有地形复杂、灾害区域覆盖范围广、通信条件较差、外界干扰因素多等特点,单一无人机在执行救援任务时往往存在耗时长、准确性较差等问题,无法满足复杂灾害现场的救援需求。与单一无人机相比,无人机编队可实现更大的覆盖范围、更精确的感知数据以及更好的容错性能,是空中搜救装备的发展趋势之一^[12]。特别地,国内多个省份的相关部门已经开展了面向应急救援的无人机编队实操训练,完成救援现场信

息采集、图像回传、俯视航拍、全景图及二维地图制作等任务。卢森堡大学 DENTLER 等^[13]基于具有混合动力学的蚁群算法,将碰撞机制引入到无人机编队的规划当中,如图 4 所示,减少了无人机的平均跟踪误差,将无人机平均最小距离缩小至 1.5 m。内华达大学 SIDDIQUI 等^[14]研发出一种计算机模拟环境,如图 5 所示,可以更加逼真地对无人机编队飞行过程进行仿真。在国内,国防科技大学 LIU 等^[15]提出了一种基于主题的任务规划模型,将任务规划策略的选择变成了任务优先执行顺序的选择。任务优先级执行的排列和组合有助于制定大规模可行的任务规划策略,提高运算速度。合肥工业大学吴瑞^[16]对多编队无人机群在不确定环境下的任务分配问题进行了研究,以任务分配效益最大化为目标,基于合同网双层协商方法对多无人机编队进行任务分配,达到了较好的飞行效果。

图4 无人机群系统模型

图5 无人机编队仿真

综上所述,国内外研究人员在无人机搜救方面取得了大量的研究成果。无人机作为主要的技术手段,已经在许多灾后救援中得到了初步应用。然而,研究人员对事故现场的环境模型进行了不同程度的简化,这使得空中救援装备在更加复杂的实际环境中的搜索精度及搜索效率有待于进一步提高。此外,现有空中救援装备大多只能完成搜寻功能,对救援任务的帮助有限。随着智能控制技术的发展,部分科研人员开展了利用无人机进行物品抓捕的相关研究^[17-18],这一研究成果将使得空中救援装备在完成搜寻的同时,可执行一些简单的紧急操作任务,以提高救援效率。但该技术仍然处于研发阶段,尚未得到实际应用。

1.3 陆地救援装备

由于大部分对人员产生巨大威胁的事故发生在陆地,因此陆地救援装备的种类更加丰富,功能也更加多样。按照结构形式及应用需求,可简单分为小型搜救机器人、大型工程救援装备及救援保障装备等。

1.3.1 小型搜救机器人

小型搜救机器人主要用来代替营救人员进入地形复杂的灾害现场完成环境监测、生命搜索等任务。根据不同的运动形式及功能,又可分为履带式搜索

机器人、轮式搜索机器人、仿生搜索机器人及小型救援机器人等。

(1) 履带式搜索机器人。

履带式机器人具有支撑面积大、崎岖路面运动性能好等优点,是救援机器人应用最为广泛的运动方式之一。在救援过程中,其通过智能的环境感知与路径规划^[19],主要完成生命搜寻、物品搜索等功能。为了提高机器人的环境适应性,在传统的履带结构的基础上,救援人员又研发了可变形履带机器人等新型的移动机器人^[20]。

传统履带式机器人一开始主要用于军事作战,且大多体积较大,不适合在灾后废墟狭小空间中搜救被困人员。为解决这一问题,许多研究人员基于传统的履带机器人,对可变形履带式机器人进行了研制。该类型的履带式机器人能够根据地形改变自身形态,可以更好地适应复杂环境。例如,奥地利应用科学大学EDLINGER等^[21]设计了一款履带式救援机器人,如图 6 所示。该机器人具有导航和感知能力,并具有良好的机动性,可连续翻越多达 15 个坡道地形以及 40~45 节楼梯。具有代表性的履带式搜救机器人还有美国桑迪亚实验室 2010 年研制的 Gemini-Scout 救援履带车。如图 7 所示。该履带车的行走机构采用分节式履带,机动性能较好,有较强的跨越台阶、沟槽的能力。Gemini-Scout 整车长 1.2 m,总高 0.7 m,采用无线控制方式。其装有视频采集摄像机、红外线测距仪、多功能气体浓度传感器及导航仪,同时可以携带救援物资,从而增加了被困人员获救的概率^[22]。此外,日本东北大学(图 8)^[23]、伊朗图什理工大学(图 9)^[24]等也对可变形履带搜救机器人进行了相关研究。

图 6 英国履带式机器人

图 7 Gemini Scout 机器人

图 8 日本东北大学机器人

图 9 伊朗 KN 机器人

在国内,履带式搜救机器人的研发起步较晚,

但仍然取得了大量的研究成果。2005 年,中科院沈阳自动化研究所开发了一款可重构模块化的履带式搜救机器人,如图 10a 所示。其能根据路面状况进行构型重构,具有九种运动构型和三种对称构型,能根据地形变换构型,以适应复杂环境。然而,机器人软硬件的控制、驱动的难度较大^[25-26]。此外,沈阳自动化研究所还研发了一种可变形履带机器人 AMOEBA-I,如图 10b 所示,它具有快速转弯、克服障碍物、穿越沟槽等能力。在常规模式下,其可以翻越高达 29.63 cm 的障碍物;在前后履带臂的协作下,能够翻越最大高度为 58 cm 的障碍物,机器人整体搜救性能较为出色^[27-28]。中国矿业大学设计了一款可用于矿难搜救的履带式机器人,如图 11 所示。该机器人使用了双电动机驱动履带单元,动态性能较高。在控制算法方面,其可在“速度驱动模式”和“扭矩驱动模式”之间自由切换。试验表明,该机器人具有良好的爬坡性能,且移动效率较高^[29]。此外,北京理工大学(图 12)^[30]、太原理工大学^[31]等也都对履带式搜救机器人进行了深入研究。

(a) 模块化搜救机器人

(b) AMOEBA-I

图 10 沈阳自动化研究所履带式搜救机器人

图 11 中国矿业大学机器人

图 12 北京理工大学机器人

履带式机器人的通过能力强,可在崎岖的路面上快速前进。改进后的可变形履带机器人的越障能力有了进一步的提高。但其在前进过程中摩擦力大,能量损失大。此外,履带机器人的尺寸一般都很大,只能在废墟表面工作,无法进入狭小的废墟内部空间进行搜救。

(2) 轮式搜索机器人。

轮式搜索机器人具有结构简单、可靠性高、移动速度快的特点,目前国内外众多学者对轮式搜索机器人开展了大量的研究工作^[32]。

日本京都大学的 KAZUYUKI 等^[33]研发了一款

轮式搜索机器人 MATOI, 可用于由生物化学武器造成的灾难现场, 如图 13 所示。MATOI 的质量为 109 kg, 有效载荷为 80 kg, 最大移动速度可达 8.33 m/s。机器人平台集成了 GPS, 摄像头, 激光测距扫描仪等众多传感器, 具有防水、防尘和抗电磁干扰的优点。以色列研发了一款轮式搜救机器人, 如图 14 所示^[34]。该机器人搭载有摄像机、夜视设备及相关传感器, 负重可达 300 kg, 能够按照预先设定的路线在救援自动行驶, 可替代救援人员执行危险任务, 以减少伤亡人数。此外, 瑞士联邦学院研制的轮式搜索机器人 Shrimp(图 15)^[35]、日本东京工业大学研制的轮式搜索机器人 R-crank(图 16)^[36]也是轮式搜索机器人的典型代表。

图 13 MATOI 机器人

图 14 以色列轮式救援机器人

图 15 Shrimp 机器人

图 16 R-crank 机器人

国内对应用于救援的轮式搜索机器人的相关研究也取得了一定的成果。哈尔滨工业大学研发了一款用于灾难搜索的小型遥控轮式机器人, 如图 17 所示^[37]。该机器人由移动平台、多传感器、任务规划器、嵌入式控制器和无线通信模块组成, 整体尺寸为 30 m×26 m×18 m, 质量为 1.5 kg。由于该机器人体积较小, 在搜索过程中可依靠人工无线控制移动到废墟内部, 应用范围较广。西南大学研发了一种基于多连杆结构的轮式机器人, 如图 18 所示, 可用于灾难环境的探测搜索^[38]。该机器人的长度为 30 cm, 连杆长度为 51.5 cm, 底盘高度为 7 cm。通过设计连杆尺度, 该机器人能很好地解决连杆轮式机器人中出现的奇异现象, 从而越障性能及运动稳定性较好。此外, 中信重工开诚智能装备有限公司(图 19)^[39]和西南交通大学(图 20)^[32]也对轮式搜索机器人进行了研究。

图 17 哈工大轮式机器人

图 18 西南大学机器人

图 19 中信重工轮式机器人

图 20 西南交大机器人

轮式搜索机器人是从普通轮式移动机器人发展而来的, 具有结构简单, 成本低及移动速度快的优点。轮式搜索机器人的设计方法相对成熟, 但在复杂崎岖的灾难搜救现场, 机器人的越障能力较弱, 在一定程度上影响了实际的救援效果。

(3) 仿生搜索机器人。

为了进一步提高搜索机器人的复杂环境适应性, 科研人员受到自然界生物的启发, 研制出多种可用于灾害复杂环境的仿生搜索机器人, 主要以蛇形搜索机器人为主。该研究目前还处于实验室阶段, 未来有在应急救援领域应用的可能性。

国外较早开展了蛇形搜索机器人的研究, 并取得了丰硕的成果。例如, 日本的 OHASHI 等^[40]研制了一款蛇形搜索机器人 ACM-R7, 如图 21 所示。其长 1.6 m, 质量 11.7 kg, 具有 18 个自由度, 且具有防水的能力。但由于 ACM-R7 的每个关节独立驱动, 因此控制系统较为复杂, 且在运动中能耗较大。英国普利茅斯大学研发了一款基于 3D 打印的可用于灾难现场搜索的蛇形搜索机器人。该机器人的机身利用柔性材料制成, 抗冲击性能较好, 刚度高。机器人的控制器位于头部, 利用嵌入式计算可以通过无线通信连接到远程 PC, 允许操作员远程控制机器人^[41]。除了上述两类蛇形搜索机器人外, 由日本 SGI 公司和电气通信大学联合研制成功的基于履带的蛇形搜索机器人也具有很强的代表性, 如图 22 所示。第一代机器人“KOHGA”由 7 个关节将 8 个履带单元串联而成。在 7 个关节中, 除前两个关节为主动关节外, 其余关节均为从动关节。KOHGA 采用无线控制的方式, 安装有摄像机、红外线测距仪、多功能气体浓度传感器及导航仪, 可实现对灾害现场的环境监测。在此基础上, 研究人员还开发了具有更

强环境适应性的第二代机器人^[42-43]。

在国内,西安科技大学李红岩^[44]针对于煤矿蛇形救援机器人(图 23),研究了其在矿井下事故现场局部未知环境下的环境参数探测、姿态控制以及路径规划等问题,通过提出局部未知障碍物几何特征地图匹配的方法、基于优化人工势场栅格蚁群算法、具有参数自适应调整的多目标点牵引的人工势场算法等,使得蛇形机器人具有良好的环境适应性。北京化工大学研制了一种新型的蛇形搜索机器人,如图 24 所示。该机器人的长度为 125 mm,直径为 42 mm,质量为 3.2 kg,偏航角为 $\pm 45^\circ$ 。机器人由 8 个具有 3 自由度的并联机构组成,可在空间开展有效的三维搜索运动^[45]。

图 21 ACM-R7 机器人

图 22 第一代“KOHGA”

图 23 西安科技大学机器人

图 24 北京化工大学机器人

蛇形搜索机器人的体积相对较小,能够进入相对狭窄的缝隙。但是蛇形搜索机器人大多采用被动轮式运动,只适合在较为平坦的地面或者水中运动,且控制复杂、可靠性不高,在一定程度上限制了其在实际搜救行动中的应用。

除了蛇形搜索机器人以外,日本东京工业大学^[46]和上海交通大学^[47]等还对腿式搜索机器人进行了相关研究。但由于腿式机器人移动速度慢,效率低,其在应急搜索救援领域尚未得到应用。

灾害救援现场的应用效果表明,当废墟环境过于复杂时,现有履带式救援机器人、轮式救援机器人以及仿生救援机器人均无法完全满足救援需要。为此,基于上述运动形式,研究人员也对具有复合运动功能的救援机器人进行了研究,以使得救援机器人能够具有不同运动形式的优点,提高机器人在崎岖地形下的运动效率。具有典型代表的救援机器人包括轮腿复合救援机器人^[48]、轮履复合救援机器人^[49]等。然而,上述救援机器人仍处于实验室阶段,具有实际应用存在一定的差距。

(4) 小型救援机器人。

上述履带式或轮式机器人多通过搭载各种传感器,以完成搜索任务为主。在此基础上,许多学者通过在机器人上搭载操作装置,使得其能够完成更加复杂的救援任务。例如,韩国研制了一种履带式救援机器人,如图 25 所示。其由头部、躯干和双机械臂组成,可通过机械臂完成伤员搬运等功能。在此基础上,研究人员还对其稳定控制方法进行了研究^[50]。在国内,哈尔滨工业大学在履带式救援机器人上配备了执行装置,它可利用蠕动功能在重物下面建立运动通道使其在下面穿行,并可在废墟环境下完成起缝、顶撑等不同任务需求,如图 26 所示。该机器人最低可以深入 40 mm 的裂缝中,可将 700 kg 的物体顶撑至距离地面 410 mm 的位置^[51]。此外,沈阳建筑大学等也对能够完成救援任务的小型移动机器人进行了研究(图 27)^[52]。

图 25 韩国搜救机器人

图 26 哈尔滨工业大学机器人

图 27 沈阳建筑大学起缝机器人

由于许多救援领域具有很强的特殊性,因此,通用的一般化救援装备难以满足救援需要。许多科研人员针对于特殊救援领域,研制了种类繁多的专用化救援装备。其中,具有灭火功能的消防救援装备最具有代表性。该类救援装备可以代替救援人员完成高层或超高层建筑的灭火任务。国外起步较早,美国、日本等都对灭火机器人进行了研究。

美国霍氏科技公司研制的遥控灭火机器人 Thermite RS 1-T2 如图 28 所示。其采用履带式行走机构,由 18.64 kW 的柴油发动机提供动力,搭载的摄像头可对火场内部实施侦察。主要通过机器人来拖动水带,同时车载全方位喷嘴开展灭火作业,每分钟可提供 2211 L 水^[53]。美国的 In Rob Tech 公司生产的消防灭火机器人 FFR-1 如图 29 所示,其

配备的冷却系统可使机器人在 $6\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温环境下将自身温度保持在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 机器人具有较强的耐高温特性^[54]。在国内, 中国矿业大学研制了一款消防机器人, 如图 30 所示, 并对消防炮不同俯仰角下的运动稳定性进行了研究^[54]。由中信重工开诚智能装备有限公司研制的消防灭火机器人如图 31 所示。其搭载的消防水炮的工作压力为 $1.2\sim 1.5\text{ MPa}$, 最大流量为 120 L/s , 最大射程为 150 m , 特别适用于石化及燃气等易爆环境^[55]。

图 28 Thermite RS 1-T2

图 29 FFR-1

图 30 中国矿业大学机器人

图 31 中信重工机器人

基于上述传统的救援机器人, 研究人员将一些新的机构形式应用于消防机器人当中。例如, 为解决现有灭火机器人很难直接接触到火源的问题, 东京大学 ANDO 等^[56]设计了一种软体灭火机器人, 如图 32 所示。机器人喷嘴模块有两个出水口, 可通过出水口水流的控制保持软体灭火装置的稳定飞行。试验表明, 长约 2 m 的机器人可以利用水的反作用力在空中稳定飞行, 并可改变喷头的方向。

图 32 软体灭火机器人试验过程

上述研究表明, 为了提高救援效率, 国内外都对小型救援装备开展了相关研究。其中, 灭火装备的研究较为成熟, 已经能够在救援现场完成部分救援任务。然而, 小型救援装备仍然存在功能简单、难以完成复杂任务的问题。由于灾害现场环境复杂, 操作对象及任务种类繁多且具有很强的不确定性, 这对机器人操作的准确性、运动的灵活性及救援的

可靠性等提出了较高的要求。因此, 现有小型救援装备难以满足救援需求, 有待于进一步研究。

1.3.2 大型工程救援装备

大型工程救援装备主要用来完成大型障碍物或废墟的破拆、移除等任务。现有工程救援装备仍然以一般性的工程机械为主, 但研究人员也开始对其智能化进行研究^[57]。例如, 日本消防研究所研发的 T-53 履带式自动行走双臂救援机器人如图 33 所示^[58]。T-53 机体前部两侧各装有一只 7 自由度机械臂, 可以实现精确操作。波兰科学技术大学 DERLUKIEWICZ 等^[59]针对用于高温、灰尘、辐射或噪音等恶劣工作条件下操作的遥控破拆机器人, 提出了一种通过有限元优化来提高机器鲁棒性的方法。日本研究员 HAGA 等^[60]为了降低挖掘机重复作业性, 研究出一种可以根据挖掘深浅来自动进行控制的挖掘装置, 该装置在很大程度上提高了挖掘机的工作效率。在国内, 江苏八达重工研制了双动力双手臂大型救援装备, 如图 34 所示, 其在四川雅安地震中得到了应用^[61]。新兴重工集团研制的抢险破障车如图 35 所示, 具备智能化控制和信息传输功能, 集成推土、夯实、吊装、剪切、挖掘破拆功能, 可快速更换工作装置, 在道路被灾害损毁或非道路行进时, 快速开辟通路, 第一时间到达灾害现场, 进行救援作业。

图 33 T-53 救援机器人

图 34 八达重工救援机器人

图 35 新兴重工抢险破障车

随着大型工程机械向着智能化方向发展的同时, 救援属具也由粗放型作业向着智能化、精细化作业的方向发展。为了提高救援效率, 北京工业大学赵京团队在多功能属具的研制方面取得了一定的成果, 其所设计的钳剪抓一体多功能救援属具如图 36 所示, 可采用顺序工作模式, 依次进行钳、剪和抱抓操作, 完成破碎、破拆、移除作业, 并通过传感器实现智能的感知^[62-63]。针对地震废墟中遇到

一时无法移除的大型水泥板，而被困人员亟待救援的情况，赵京团队还设计一种快速在钢筋混凝土材质建筑体上开辟大口径孔道的多功能救援属具，如图 37 所示，可在切割的同时完成预制板芯的移除，对挽救伤员生命有着重要意义^[64]。这种多功能救援属具可快速地将通用的工程机械转换成专用的大型救援装备，并可在灾后快速投入使用，在提高救援效率的同时，提升了大型工程救援机械的生命营救能力。

图 36 钳剪抓一体属具 图 37 开孔取芯一体属具

然而，由于大型救援装备大多吨位较大，工作量繁重，且工作过程较为粗放，因此智能化和精细化程度普遍不高。如何提高大型救援装备的智能化，是需要进一步解决的问题。

1.3.3 救援保障装备

救援保障装备主要是指在救援中提供安全的生存空间，并可提供医疗、污水处理等功能的救援装备。根据功能不同，目前的救援保障装备可分为智能救生舱和后勤保障装备。

(1) 智能救生舱。在灾难发生后，逃生人员如果能够第一时间通过相关设施及时保障自己的生命安全，则能够避免不必要的伤亡。因此，着力研发智能救生舱，使得更多的逃生人员在灾难发生后等待救援过程中生命受到有效地保障就显得尤为重要。所谓救生舱，就是在遇到突发的灾害或灾难时，能够为逃生人员提供紧急避难、保护自身生命安全且具有一定容积的密闭性舱体结构。

目前，全球范围内很多国家都研发了可用于应急救援的救生舱，其中以矿用救生舱应用最为广泛。矿用救生舱大多由设备过渡舱、生存舱、辅助舱三部分组成，包括供氧系统、气体监测系统、降温除湿系统、通信系统和照明系统等，是典型的智能装备^[65]。在国外，美国 Srata 公司(Strata Products USA)主要生产钢制救生舱(图 38a)和充气可折叠避难舱(图 38b)。澳大利亚 Mine ARC 公司生产的矿用救生舱(图 38c)有煤层型和标准型两大类。目前，这是世界上唯一获得美国矿工与安全办公室认证以及达到

美国煤矿救生舱设备相关标准的产品^[65]。另外知名的公司还有 Jack Kennedy Metal Products(美国)、Modern Mine Safety Supply LLC(美国)、Draeger Safety Inc.(德国)等^[66]。我国救生舱的研究起步较晚，但矿用救生舱已经在市场上投入使用^[67]。

(a) Strata 救生舱

(b) Strata 充气救生舱

(c) MineARC 救生舱

图 38 国外研发的救生舱

除了矿用救生舱外，家用救生舱具有尺寸小、便于安放等特点，能够为市区内地震、火灾等事故中的逃生人员提供躲避的场所。对于小型家用救生舱，青岛科技大学进行了持续的研究。在 2014 年，研究人员设计了一种过渡型家用救生舱，并对圆柱形、长方形和过渡型三种救生舱的静力学特性进行了分析^[68]。在此基础上，研究团队分别设计出柜式家用救生舱和类三角形家用救生舱，并对其抗冲击性等性能进行了分析^[69]。

目前，救生舱的种类仍然比较单一，对于不同灾害环境下的救生舱尚未开展系统研究。此外，现有的智能救生舱仅能实现人员防护和简单通信等功能，如何进一步提高其智能化水平，实现舱内环境的智能监测、多媒体信息的无线融合等是需要进一步解决的问题。

(2) 后勤保障装备。后勤保障装备可以在自然灾害发生时提供物资补给、电力供应、现场照明、医疗救治和生活物资供给等保障任务，满足灾区的医、食、住、行等需求，因此，对其研制具有重要意义^[70]。国外对于应急物资保障车的研究和设计起步早，其产品规模和功能也远远高于我国目前水平。例如，德国生产的应急物资保障车具有很强的越野性能，灾难发生后，该车可承担起照明、医疗保障和实物运输等功能^[71]。我国也研发了不同种类的后勤保障装备，并灾害救援中得到了应用。

目前的后勤救援保障装备多为需要人工操作的相关设备，该类装备的智能化研究尚属空白，后勤

保障装备的低智能化难以满足高效的救援需求。因此,后勤保障装备的智能化研究具有重要的意义及广阔的应用前景。

1.4 水下救援装备

水下救援装备的重点在于水下搜寻和水下救援,其特点是深水作业能力强,操作简便,国内外众多学者对水下救援装备进行了研究。

世界上第一台水下救援机器人是 1974 年由 Hydro 公司生产的 RCV-225 型有缆无人水下运载器,如图 39 所示^[72]。该装备的质量为 82 kg,作业深度为 400 m。目前世界上最著名的水下救援装备是美国的 Jason 系列水下救援机器人。它是一种双体机器人系统,由中继站和机器人本体组成。2002 年,Jason 系列的第二代 Jason-2 号水下救援机器人(图 40)投入使用。其最大下潜深度达到 6 500 m^[72]。在上述水下救援装备研究的基础上,智能化成为了水下救援装备的研究方向之一。例如,孟加拉库尔纳工程技术大学研发了一种新型的救援机器人,如图 41 所示。该机器人既可以在水面漂浮,又可以在水下完成搜救工作。机器人采用基于物联网的新的通信技术提高人机交互的便捷性,可以有效地应用于任何浅水水域的勘测和救援^[73]。意大利开发了一种用于水下搜索的机器鱼,如图 42 所示,该机器人的三维尺寸为 498 mm×55 mm×147 mm,其采用生物机电一体化设计,并研究了仿生运动模式,为开发具有复杂行为的仿生水下机器人奠定了基础^[74]。

图 39 RCV-225

图 40 Jason-2

图 41 孟加拉救援装备

图 42 意大利机器鱼

我国对水下救援装备的研究起步较晚,但也取得了一定成果。针对水下搜救作业难度大,强度高、危险系数高等难题,中国船舶科学研究中心(702 所)研制了一款适用于浅水水域搜救的遥控式机器人。该机器人的最大潜水深度为 100 m,最大前进速度

3.7 km/h(2 节),最大下潜速度 1.85 km/h(1 节),整体质量为 108 kg。机器人的动力充沛,机动性和稳定性较好,可用于水下伤员搜索及辅助打捞等,有效解决了浅水水域搜救的难题^[75]。此外,沈阳自动化研究所^[76]、江苏科技大学^[77]及广州航海学院设计的水下搜救的机器人(图 44)^[78]也是水下救援机器人的典型代表,其通过搭载摄像头等传感器,具有追踪打捞、环境监测等功能,可在水流突变等特殊情况下具有一定的防护能力。

图 43 702 所水下机器人 图 44 广州航海学院机器人

水下救援机器人的研发相对较少,仍然存在以下问题:① 目前多数水下搜救机器人是通过救援人员在岸上操纵上位机,对水下机器人的运动状态和反馈信息进行实时处理,这就对救援人员的操作能力提出了较高的要求,提高水下救援机器人人机交互的智能化程度是目前救援领域亟待解决的问题;② 由于淡水水域和海水水域的差别,且水下环境存在能见度低等问题,水下搜救装备应根据环境的不同在功能和性能上有所侧重,而目前针对环境影响的研究相对较少;③ 目前的水下搜救装备操作能力不足,还需要对其水下的切割、抓捕等功能进行深入研究。

1.5 通用救援装备

通用救援装备是指可应用于不同场景具有一定共性的救援装备,包括生命探测仪器、智能可穿戴装备、通信装备等。

1.5.1 生命探测仪器

生命探测仪器主要用于灾害发生后生命信息的获取,从而指导救援人员准确快速地展开救援,可应用于陆地,空中及水下等领域,在应急救援搜索中起着至关重要的作用。生命探测仪器种类繁多,较为常见的探测方式包括红外生命探测仪、气敏生命探测仪、生命探测雷达等。红外生命探测仪主要利用红外辐射来感知人体温度差异,以判断废墟中是否存在幸存者,但该探测器不能有障碍物遮挡,且容易受到环境温度以及周围热源的干扰。气敏生命探测仪主要是指通过判断周围环境二氧化碳浓度以判断生命信息,但该探测仪无法用于开放空间,因此使用场景受限。相比较其他两类生命探测仪,

生命探测雷达的应用更为广泛。生命探测雷达是一种将微功率超宽带雷达技术与生物医学工程技术结合研制而成的救生设备^[79-80]。根据不同的发射信号，生命探测雷达可分为连续波和超宽带两大类，其中基于超宽带体制的生命探测雷达应用较广且较为先进^[81]。超宽带生命探测雷达使用电磁波作为探测媒介来探测呼吸、心跳所引起的人体体表的微动，然后提取所需的生命体征参数，最后判断有无生命体存在。超宽带生命探测雷达具有发射脉冲极窄、高距离分辨率、穿透能力强和较好的抗干扰能力等优点^[82-83]。

对于超宽频探测雷达相关技术，美国 Lawrence Livermore National Laboratory 使用超宽带雷达检测了障碍物后的静止人体，从而开创了超宽带生命探测雷达领域。随着技术的逐渐成熟，超宽频探测雷达在灾害现场逐步得到了应用。通过复杂废墟环境下雷达的穿透性能、抗干扰能力、探测精度等关键技术被突破，相关产品被研制出来，并逐渐在生命搜索中得到了应用^[84]。

美国研发的 Lifelocator 3+型生命探测雷达如图 45 所示，尺寸是 45 cm×45 cm×23 cm，质量为 11 kg(包括电池)，探测角度为 120°。主要采用超宽带无线传输技术，在建筑物坍塌、地震、雪崩和泥石流等灾难现场，无需进入即可帮助救援人员在 2~3 min 内探测到被困人员。不足之处是雷达波不能穿透大面积纯的金属板^[85]。德国研发的 BioRadar 生命探测雷达如图 46 所示，主要用于探测生命体的移动。该雷达能探测到被困人员包括呼吸和心跳在内的所有的身体移动信息。但该仪器不涉及多目标探测，同时穿透能力较弱(不超过 10 m)，且装备质量大，不便于在救援中携带^[86]。

图 45 美国生命探测雷达

图 46 德国生命探测雷达

为解决生命探测雷达穿透力不足及信息感知精度不高的问题，国内的国防科大、四军医大、电子科大、中科院电子所等科研机构及企业对生命探测雷达进行了深入研究。为了解决多普勒运动信息的反演本质上存在的非线性问题，浙江大学吕勤毅^[87]针对最优多普勒雷达传感架构和线性多普勒相位解调算法开展了一系列研究，逐一解决了此前存在的

相关难点，并通过实验演示了基于同一架构的大动态和微弱运动的线性反演，使得多普勒雷达传感在非接触生命信号检测中得到实际应用。第四军医大学马腾^[88]针对对讲机引入的窄带射频干扰(Radio frequency interference, RFI)和风吹草动两种干扰，对超宽带(Ultra wide band, UWB)生物雷达应用中的环境干扰问题及其抑制技术开展了系统性的实验研究，探明了窄带 RFI 和风吹草动干扰对 UWB 生物雷达人体呼吸检测性能的影响，在此基础上提出了 UWB 生物雷达环境干扰的应对策略，对 UWB 生物雷达的应用具有重要的指导意义。此外，中科院电子所所在攻克生命探测雷达关键技术的基础上，针对我国反恐维稳和地震灾害生命救援等需求，开发出穿墙成像雷达样机、生命探测雷达样机。

综上所述，国内外众多机构在生命探测雷达的研发上取得了一定的成果，但仍然存在以下问题：

① 生命探测雷达远距离的探测精度不高，这就导致了探测雷达在稍大范围内无法准确探测到生命信息；② 目前多数产品只能一维或二维测距，且不涉及多目标探测，限制了救援效率；③ 废墟环境存在大量不同材料的障碍物，复杂障碍物对探测精度影响较大。上述问题都限制了生命探测雷达在救援中的应用。

1.5.2 智能可穿戴装备

可穿戴智能设备是指利用穿戴式技术对救援人员的日常穿戴用品进行智能化设计，从而开发出的可以穿戴的设备的总称。随着时代发展，可穿戴智能设备也将在消防和地震等救援工作中得到广泛的应用。目前用于救援的智能可穿戴装备分为助力外骨骼和小型智能可穿戴装备等。

(1) 助力外骨骼。在消防、地震等救援过程中，助力外骨骼是重要的智能可穿戴装备。其可以为人类的行走提供动力，增强肌体的行走能力和速度，缓解高负荷和长时间行走下的疲劳感，扩大人类的运动范围。通过穿戴外骨骼，可将工具、通信系统和护具等集于一身，携带更多的装备，提高工作效率。在国外，韩国 DSME 公司研制了一款可应用于救援的下肢助力外骨骼“DSME wearable robot”，如图 47 所示，用来帮助工人完成重体力工作。该下肢外骨骼在驱动方式上分别采用了液压驱动和电动机驱动两种方式，质量分别为 41 kg 和 28 kg，有效负重均为 30 kg。另外，其单独设计有上肢的吊装设备，可以帮助穿戴者轻松抬起重物^[89]。美国加州伯克利分校研制了一款既可用于军事作战，又可用于灾难救援的下肢助力外骨骼“BLEEX”，如图 48 所示。该外骨骼采用液压驱动，自身质量为

50 kg, 还可额外承受 34 kg 的负载, 同时穿戴者仅感受到 2 kg 的负重, 可用于灾难现场辅助救援人员搬运物资、清理废墟等^[90]。日本 ISHIDA 等^[91]研制了一种大力士外套, 可在救援现场完成 40 kg 的搬运活动。此外, 美国 JACOBSEN 等^[92-94]对救援用助力外骨骼机器人进行了研究。

图 47 韩国助力外骨骼

图 48 伯克利外骨骼

我国对助力外骨骼也进行了大量研究。哈尔滨工业大学研发了一款地震救援外骨骼, 如图 49a 所示。该外骨骼机器人的自身质量为 40 kg, 最大负载为 50 kg, 最大行进速度为 5 km/h。可以完成包括蹲下站起在内的多种动作, 能够在地震后的废墟环境下实现相对灵活的运动^[95]。同时研究人员在机器人髋关节处的自由度上进行了拟人化的设计, 使其可以与不同穿戴者的髋关节完美贴合, 提高穿戴者的舒适性。海军航空工程学院研制了一款可用于灾难救援的助力外骨骼“NAEIES”, 如图 49b 所示。该外骨骼服采用电动机驱动, 髋关节具有伸展/弯曲和外展/内收两个自由度, 可在 15 kg 的负载下行进 2 h^[96]。此外, 电子科技大学(图 49c)^[97]、华东理工大学(图 49d)^[98]也对用于救援的下肢助力外骨骼进行了研究, 所设计的外骨骼机器人具有较好的负重能力。

从上述对救援助力外骨骼的研究现状中可看出, 多数助力外骨骼可承受较重负载, 能够初步在救援现场开展辅助救援工作。但该类助力外骨骼还存在以下问题: ① 携带的能源有限, 无法长时间连续工作; ② 救援人员穿戴外骨骼后在崎岖的未知环境下的运动速度、运动稳定性等性能都有待于进一步提高; ③ 外骨骼与人体的相容性较差, 人体穿戴的舒适性和运动的跟随性有待于提高。这都使得助力外骨骼机器人尚未在灾害现场得到应用。

(2) 小型智能可穿戴装备。小型智能可穿戴装备主要用于地震、火灾等灾难现场中救援人员的个人防护及信息传输等。如在火灾事故现场的消防官兵可佩戴智能眼镜和智能头盔等设备进入灾害现场, 同时利用智能设备, 指挥员和战斗员眼前可显示空气呼吸器中的气体剩余量、火场地图、火场内

部温度、火场内部消防员相对位置及灭火救援预案等信息, 此外还可将消防员自身背后的视频图像投射显示在其本人显示屏上, 起到预防意外事故发生的作用^[99]。目前国内外众多专家学者对救援用智能头盔进行了研究。例如, 法国研发了一种智能头盔, 其质量为 950 g, 内置通信装置, 可实现消防官兵间的无干扰通话^[100]。我国对智能防护装备的研究较少, 多数生产商对救援用头盔的研发仍停留在物理保护层面。孙弋等^[101]将通信系统加入头盔的设计中, 研发了一种新型的消防通信头盔。该头盔由语音转换接收器、分离式话筒和扩音器三部分组成, 可实现 PTT(按键通话)和 VOX(声音驱动通话)两种功能, 消防人员可根据实际情况采取不同的方式进行实时通信。

(a) 哈尔滨工业大学

(b) 海军航空工程学院

(c) 电子科技大学

(d) 华东理工大学

图 49 国内外骨骼机器人

目前, 小型智能可穿戴装备在医疗领域应用较多, 技术也相对成熟, 但在救援领域应用较少。由于救援现场属于极端环境, 如何将智能可穿戴技术应用于救援领域, 适应救援人员的需求, 是亟待解决的问题。

1.5.3 通信装备

突发事故发生后, 快速有效的通信是应急救援的基本要求, 许多灾害环境为地理条件复杂的山区、河湖等野外场所, 涉及偏远无人的公路, 也涉及繁华拥挤的城市街道, 及时的通信报告与救援指挥, 对于应急救援的及时性、准确性、高效性都具有重要的保障作用和意义。目前应急救援通信涉及通信设备(基站)及通信技术两大方面。

(1) 应急通信设备-基站。当突发灾难发生后,地面通信完全中断,灾区成为信息孤岛。基站设备是专门为预防重大自然灾害的破坏而建设的,可在灾害发生后的短时间内正常开通并提供服务。基站设备可将灾区信息收集起来,通过组网通信技术将灾区数据信息发送给救援人员,确保救援的快速开展。

国外 20 世纪末便开始了对救援用移动式通信基站的研究。北德克萨斯大学研发了一种基于系留式无人机的高空应急通信基站^[102]。在小型越野车上搭载了无人机通信系统,能够快速到达灾难现场,重建通信网络。研究人员使用光电复合电缆为无人机等设备供电,电池寿命长达 8 h,与传统无人机基站相比,电池寿命延长了 31 倍。当移动式基站装载在地面移动的车辆或海面行驶的船舶上时,无法像固定式基站安装在高处,移动式基站平台本身的高度限制了天线的高度。为解决该问题,美国研究人员将执行装置安装在移动式基站的升空平台上,以此提高移动式基站的覆盖范围。

我国对移动式基站的研究起步较晚,但也涌现出一批实用的研究成果。中国矿业大学与无锡市永神利煤矿安全设备厂共同研发了一种可用于矿难现场的移动式小型通信基站。主要利用蓄能动力移动技术、井下环境通信技术和密闭空间呼吸环境保障技术等技术手段,使得救援人员可快速收集信息,发送灾情报告并进行必要的危害源控制^[103]。此外,武汉大学^[104]也对救援用小型通信基站进行了研究。

(2) 应急通信技术。在救援现场,通信的稳定性、可靠性、精确性是研究的重点。在国外, IAPICHINO 等^[105]提出了一种基于网络协议的 Manet 网络,其将卫星信号与基站信号结合起来,通过基本的手持设备进行远距离通信。美国卫迅公司开发了一套基于卫星重叠通信的应急救援通信技术。该技术可以把两个波重叠起来传输,在不考虑卫星功率受限的情况下,叠加之后可以减少信号的总带宽,同时节约一半成本。该技术可保障灾区信息正常传输,同时具有通信容量大、覆盖范围广和传输距离远等优点^[106]。TAKAHATA 等^[107]将 Wi-Fi 网络与移动通信网络结合起来,建立了一种在灾难发生之后用于通信的移动网络。该网络节点之间的通信链路具有多个信道,可根据距离、功率和传输信道频率选择最佳信道。在我国,西北工业大学对应急通信透地技术进行了研究。基于电流场通信理论,提出了一种可在水下进行高速数字信息通信的方法,并设计了一种适用于水下的电场通信模型,试验证明了该方法可实现水下测量数据的高效回

收,为透地通信技术的研究提供理论基础^[108]。此外,为了解决应急通信系统中网络节点能耗不均的问题,沈明玉等^[109]将节点按剩余能量和网络负载分为几个不同状态,以不同方式满足路由请求,以此提高网络生存周期和分组投递率,并在进行了仿真试验,结果表明使用该方法改进的路由协议在使用条件相同的情况下,能量的使用情况及网络的拥塞状态比没有使用该方法的网络有所改善,同时整个网络生存周期得以延长。此外,有些学者利用跨层设计的思想,对通信系统网络进行能耗均衡。例如王庆文等^[110]主要在物理层和网络层对通信网络进行跨层处理,他们根据节点的额外通信面积和局部能量状况设置转发延迟系数,在选路时优先考虑通信面积增大较多和剩余能量较大的节点,从而达到均衡全网能耗的目的。

目前,国内外对救援现场的通信技术进行了大量研究,但由于环境的不确定性强(干扰信号较多)、地质条件复杂(如煤矿救援涉及不同地质结构)、大型障碍物较多,通信的距离、准确性、多信息融合技术等都有待于进一步提高。

2 智能应急救援装备共性技术

为了实现应急救援装备的智能化,相关共性技术需要被突破,主要涉及智能环境感知技术、智能运动控制及导航技术、自学习技术、人机交互技术以及网络协同技术。

2.1 智能环境感知技术

智能救援装备在工作过程中主要通过传感器来获取环境信息并搜寻幸存人员。由于灾难现场一般具有复杂性和不确定性,室内结构化环境中传统的环境感知算法不能满足救援工作的需求,例如,传统的激光测距仪及声呐等仪器在充满烟雾和灰尘的环境中也很难以发挥作用。因此,传感检测识别技术和多传感信息融合技术需要被研究。例如,BAUM 等^[111]考虑到由于灾害现场浓烟、碎片和非结构化地形导致机器人很难在能见度很低的条件下工作的问题,开发了一种音频分类算法,用于识别与消防相关的声音,如遇险人员(婴儿哭声、尖叫声、咳嗽声)、结构故障(木材折断、玻璃破碎)、消防车和人群等。该方法从音频记录中提取出一系列特征,并通过前馈神经网络进行分类。该网络结构简单,可在有限的硬件上实现性能,分类结果总体精度达到 85.7%。钟煜华^[112]对救援机器人在城市搜救任务下基于三维激光雷达的环境感知问题进行了一系列研究,主

要包括机器人实时同步定位与建图、实时地形分类及可通行区域识别等问题,试验结果表明,该分析方法具有良好的可行性。

智能的环境感知技术是应急救援装备实现智能化的基础,面向不确定恶劣极端环境下的环境感知技术是智能救援装备未来的研究方向之一。

2.2 智能运动控制及导航技术

智能运动控制技术可以提高救援装备的运动精度和任务完成的可靠性。例如,为了提高灭火机器人喷嘴的控制精度,美国 MCNEIL 等^[113]提出了一种基于视觉的喷水方向控制算法。通过摄像头辨别目标位置,并采用线性最小二乘优化的方法确定每个采样时间喷嘴的最佳俯仰角。在此基础上,采用卡尔曼滤波方法去除测量中的干扰因素,从而更好地确定当前喷嘴的方位。试验表明,机器人可实时调整喷嘴的姿态,实现更加准确的灭火,并具有纠错功能。

在智能导航方面,移动装备导航的本质是在一定的约束条件下,找到一条可顺利到达终点的路径。例如,马来西亚的 SAUDI 等^[114]采用拉普拉斯方程来求解机器人路径规划算法中的势函数,并通过依次迭代的方法求解复杂方程的数值解。目前该方法应用得还不多,但良好的适应性和灵活性使其在救援机器人路径规划领域拥有很大的应用前景。

智能的运动控制和导航技术可以使得救援装备极大地摆脱人的干预,实现智能的、自主的运动,是应急救援装备的共性技术之一,研究的重点体现在极端环境下运动的准确性等方面。

2.3 自学习技术

灾难废墟环境的不确定性使得救援机器人的运动能力与救援需求不符。需要利用有限的轨迹样本进行自学习,使得机器人在崎岖地形下具有自适应能力。

救援装备的自学习主要包括建模、在线运行和自主学习三个阶段。建模即对于对象的输入量和输出量进行比较,找出其中的运算关系,得出所描述的模型;在线运行即对此模型不断地进行在线修改,减少模型算法与实时数据的差异性;自主学习即进行预测评估,并做出相应的在线参数自校正。例如,日本的 HITOMI 等^[115]针对救援机器人提出了一种强化自学习方法。通过模拟发现,经过 1 000 个周期,机器人可快速完成自学习,同时所得的控制器不受斜坡梯度和突发扰动变化的影响。上述研究虽然达到了良好的自学习效果,但忽略了机器人的能耗问题。为解决该问题,中国广东工业大学的王丽杨等^[116]

针对救援机器人提出了一种高能效的自学习控制系统。在机器人运动过程中考虑每个训练样本的能耗,并根据样本能耗对样本进行加权学习。同时所提出的自学习目标函数中含有与能耗有关的松弛因子,即训练过程更重视能耗较低的样本。

救援机器人的自学习是一个长时间的训练过程,目前大部分机器人学习算法都是基于仿真的离线算法。因此如何利用引入相关先验知识、算法改进、学习模式改进等方法来加速自学习过程,并实现针对实际救援情况的自学习,是一个亟待解决的问题。

2.4 人机交互技术

救援装备的人机交互是指通过计算机输入输出设备实现人与救援装备对话的技术。人机交互技术旨在协调人与救援设备之间的关系,消除两个智能系统之间的通信及对话边界,使人与救援设备之间可以更方便、顺畅地进行信息交流。

在复杂的灾难现场,救援人员可通过有线或无线的方式遥控搜救机器人。操作者需要根据人机交互系统提供的大量数据和信息,有效地对机器人本身及其所携带的有关装置进行控制。此时,操作者一般精神高度紧张且需要长时间连续高负荷工作。因此,良好的人机交互系统可在提高救援效率的同时减轻救援人员的工作强度^[117]。

在救援机器人的人机交互系统中,最理想的交互方式是自然语言交互,主要研究如何使机器人理解人类语言,并且将人类语言转换为机器人可以执行的指令。例如,斯里兰卡的 PYLASINGHE 等^[118]针对自然语言中存在的模糊表达的问题,提出了一种使用口头语音命令控制机器人的人机交互方式。主要采用神经网络建立了分类器,从而对人机交互中的模糊语义进行定义,并在试验中可以通过语言控制的方式完成对运动路径的预测。

因此,如何实现人机高效、友好的交互,是智能应急救援装备研究中的一个富有挑战性的领域。

2.5 网络协同技术

某些自然灾害受灾范围广,成灾频率高,对国民经济造成极大威胁。灾害发生后,需要准确、快速、高效地将应急救援装备送达灾区,以减少人员伤亡,加速灾区重建。因此,救援装备的调度问题受到多数研究学者的关注^[119-122]。例如,为了提高消防车辆的利用效率,科研人员对调度的优化算法进行了研究。BELVAL 等^[123]考虑到季节性对区域资源分配的影响,提出了一种新的物流模型,以根据不同影响因素实现消防车的快速调配。OWADA 等^[124]提出

了一种新的通信系统, 该系统由多接口移动自组网路由器和车载天线组成, 为消防队赶往救援现场提供实时的道路信息。网络搭建方案如图 50 所示。然而, 由于救援装备种类繁多, 且救援现场时间紧迫、任务繁重、救援装备智能化程度不高, 如何实现不同智能救援装备的网络协同是面临的技术挑战^[125]。

图 50 消防车网络系统

3 智能应急救援装备存在问题

智能应急救援装备在短短十余年的时间里, 已经取得了大量的研究成果。特别地, 针对于灾害现场的特殊情况, 相关的关键技术也取得了突破性进展。然而, 现有的智能救援装备仍然没有广泛地应用于救援现场, 究其原因, 存在以下问题。

3.1 缺乏面向通用/专用不同需求的装备结构设计方法

对于大部分智能应急救援装备而言, 结构是其功能实现的基础。现有的部分智能救援装备缺乏准确的自身定位或对救援需求估计不足, 导致装备结构无法满足救援需要。

(1) 对于具有一定通用性的智能应急救援装备, 由于其能够在火灾、塌方、危化等不同灾害现场进行使用, 因此其在结构方面应具有结构自适应、极端环境可靠性高等特点。例如, 现有的履带式地面搜救机器人可通过履带结构的变形实现越障功能。但仍然存在运动效率较低、可靠性较差、极端地形下的适应性不佳等问题, 这都限制了其应用。而对于专用智能应急救援装备而言, 其极端条件下的专业化不足, 导致了大量专用救援装备在应用过程中存在破坏式使用, 造成了资源浪费。此外, 缺乏针对复杂任务本身的新型机构设计方法, 使得通过传统经验设计出的专用救援装备无法满足现代救援对于功能多样化、结构轻量化、操作精细化的要求。例如, 对于可实现连续多任务操作的智能救援属具而言, 如何通过结构及尺度设计实现机构简单、可靠性高、功能丰富且可进行精细化操作的特点, 是需要研究的问题。

(2) 部分大型专用救援装备造价高、运维成本

高、储备占地面积大, 对于小概率灾害救援来说, 制造大量大型专用救援装备极不经济。而大型通用工程机械难以满足专业的救援需求。如何在结构上通过新的设计方法, 实现通用救援装备与专用救援装备的转换, 在满足救援需求的同时降低大型救援装备的成本是目前救援装备领域存在的问题之一。

3.2 特殊灾害环境下的救援装备的性能难以满足需要、可靠性不佳

智能应急救援装备的应用场合多为震动、高冲击、高温、危化、湿热等极端场合, 在使用过程中受到环境因素的影响较大, 而现有研究在结构设计、性能分析、运动控制等方面都未能将环境因素考虑在内, 或数学模型无法较为准确地反应外部环境复杂的扰动对其影响。例如, 在地震后狭小空间内的移动搜救机器人除了受到地形的影响, 可能还会受到高频振动、泥泞/坚硬/松软不同地质条件等环境影响, 过于简化的数学模型会导致机构设计及性能分析的结果与实际情况偏差较大, 在运动精度、使用可靠性等方面存在较大差距, 装备的实际应用效果也难以达到要求。例如, 山西王家岭煤矿透水灾害发生 80 h 后, 总计抽水才下降 17 cm, 抽水进度非常缓慢; 大型钻机性能落后, 测孔仪定位不准, 成孔率很低, 同时无法准确定位遇险人员的具体位置, 从而导致救援进度无法满足预期。特别地, 智能应急救援装备的可靠性是其需要重点考虑的性能, 即灾后环境对各组件(如运动机构、传感系统与控制单元)功能正常运转的不良影响。救援装备应能够在不确定的环境条件下长时间工作。

3.3 救援装备的智能化程度有待于进一步加强

目前, 我国应急救援装备的智能化程度较低, 难以在救援过程中主动地协助救援人员完成复杂任务。在环境感知方面, 灾害现场往往伴随着环境能见度低、高温高湿度、废墟结构呈不规则形态等极端状态。在这类环境下, 由于相关技术尚未得到突破, 智能救援装备难以对周围环境进行准确地感知, 造成了其无法协助救援人员完成人员搜寻、危险预警等功能。在自学习及自主决策方面, 由于环境的外部扰动因素较多, 复杂的声音信息、杂乱的图像信息等大量的无效信息会严重地干扰智能救援装备的自学习过程, 从而造成错误的判断。此外, 自学习及自决策还存在响应速度慢等问题, 无法适应紧迫的救援任务。在多机协调控制方面, 智能救援装备还无法通过多装备协调控制共同完成某一任务, 且多装备传输信息的融合技术有待于进一步提高。上述问题都导致了现有的救援装备控制系统复杂、

智能化程度不高,应急救援装备很大程度上还需要依靠人的协助。其对人的依赖降低了救援效率。

3.4 通信基站抢建技术复杂、复杂环境的通信技术有待于突破

在灾害救援现场,快速精准的通信是顺利完成救援任务的核心。其主要涉及两方面的内容,一是通信基站的快速搭建,二是复杂多扰动环境下的高效通信技术。对于前者而言,若需要在救援现场快速搭建一个完整的基站,需要配备基站主体设备、无线传输系统、供电系统等,在完成硬件系统的组装之后,还需要完成一系列复杂工作,如主设备调测、卫星传输调测、调测天馈、基站数据制作和联网调测等。同时,考虑到灾难发生时专业救援人员数量紧缺,复杂的基站搭建工作将使得通信难以快速恢复。在应急通信技术方面,由于灾害现场环境复杂,甚至存在极端条件,通信过程仍然存在穿透力不强、长距离下信号衰减严重等问题。例如,在矿井救援中,无论是采用透地通信技术还是泄露通信技术,矿井中复杂的地质条件以及有限的能量供应都使得通信存在稳定性较差、传输距离受限、抗干扰能力不佳等问题,使得矿井下的声音、图像等多信息难以高效传输,给矿井下的救援工作带来了困难。

3.5 智能应急救援装备的人机友好性有待提高

对于救援人员而言,智能救援装备应具有良好的操作便捷性。例如,在金沙江堰塞湖事件中,面对先进的救援装备,救援人员难以在短时间内进行顺畅的操作,而相关专业人员又无法快速抵达救援现场,这就使得救援进度受到严重影响。因此,救援装备智能化及复杂程度提高、救援功能不断丰富的同时,如何让救援人员能够进行便捷的操作,是需要研究的问题。此外,智能救援装备应具有良好的交互系统,及救援人员能够通过人机界面等信息传递媒介,从声音、图形等多种不同的途径快速了解现场情况,也是需要解决的问题。此外,由于被困人员存在不同程度的伤势,搜救装备如何能够和生命体征虚弱的被困人员进行高效便捷的交互,从而将信息传递给救援人员,也是应重点解决的问题。

综上所述,虽然智能救援装备的研发已经取得了一定的进展,但是在结构设计方法、使用性能、智能化程度、高效的通信及人机友好等方面仍然存在一定的问题,这都使得现有的智能救援装备在救援现场使用效率低、对救援工作的帮助有限。

4 智能应急救援装备发展趋势

面对地震、塌方、火灾等灾害现场高效救援的需求,随着智能技术的不断发展,智能应急救援装备的发展可划分为三个阶段。第一阶段,智能应急救援装备辅助救援人员进行施救。此时,救援人员仍然是救援的主体,但智能应急救援装备能够通过主动完成小部分搜救任务,为救援人员提供有效的救援信息,起到辅助作用;第二阶段,智能应急救援装备与人协作,共同承担救援任务。此时,救援装备能够智能地完成感知、分析、推理、决策、控制等功能,独立完成部分救援工作;第三阶段,智能应急救援装备为救援主体,救援人员只需要进行辅助即可。此时,应急救援装备高度智能化,可独立完成各种复杂任务。目前国内外智能救援装备的研发仍处于第一阶级。我国在智能应急救援装备产业方面的研发具备一定的基础,基本掌握了智能救援装备的设计制造、控制系统软硬件、运动规划等相关技术,不少装备拥有自主知识产权。未来,我国智能应急救援装备的发展趋势如下。

4.1 装备结构向着面向通用/专用复杂需求的环境、结构、材料、驱动一体化设计方向发展

(1) 针对不同灾害现场的救援需求,将新型机构、新材料、新驱动等应用于救援装备的机构设计中,并采用结构、尺度一体化设计方法,使其能够灵活高效的在狭小空间等特殊场合完成既定功能,并具有结构简便、刚度高、可靠性好等优点。例如,对于部分中度及重度自然灾害,道路、桥梁损坏严重或者边远山区交通闭塞,陆地运输严重受阻,而现有水路和空中运输工具的运输能力有限,缺乏可快速抵达救援现场的有效装备,模块化的快速拆装结构是救援装备的发展趋势之一。通过结构的模块化设计并建模分析不同的模块对结构刚度和可靠性的影响,可最终实现大型智能应急救援装备高效拆分与组装,该技术可实现救援装备快速组装后投入抢险救援任务,大幅提高救援的时效性。

(2) 在机构的数学建模中,实现结构、材料、环境一体化建模。将工作空间、材料变形、环境的振动、非周期性冲击载荷等复杂环境条件作为模型中的重要因素,精确建立一体化模型,精确反映其功能特征。在此基础上,可采用神经网络等算法,实现机构智能的构型综合及设计,以满足功能要求。

(3) 通用大型工程机械装备快速转化为专用大型救援装备技术是发展趋势之一,该技术可实现通

用大型工程机械装备在平时服务于国家经济建设、在灾害发生时能够转换成专用大型救援装备,在灾害救援中发挥一机多用的功能。为此,需要提出系统的结构设计方法。

4.2 装备性能向着高可靠性、低能耗以及较好的环境适应性的方向发展

在可靠性方面,应急救援装备应该在地形复杂(崎岖路面、泥泞土地等)、环境不确定因素高(余震等引起的建筑物坍塌易造成不可预知的冲击)、极端环境出现率高(高温、湿热、腐蚀性环境等)以及长时间使用的复杂条件下具有高可靠性,不易发生疲劳、磨损、腐蚀等问题^[126]。因此,应开展高温热场下防护材料、极寒条件下防护材料、自修复材料、高强度轻型材料等新型材料的研究;开展救援装备自润滑机理研究,减小摩擦磨损;对控制系统稳定性及突发条件下的自恢复方式进行研究,提高软件系统的可靠性。同时,提出面向地震、塌方等复杂灾害条件下的动态/静态相结合的可靠性分析方法,实现对不同救援装备可靠性的定量评估。

在能源利用方面,由于灾害现场能源紧张,很难及时提供大量能源供众多装备长时间使用,应急救援装备应具有能耗低的特点,即在保证运转功率和使用时长的基础上,所消耗的能量最少。此外,对于未来的智能应急救援装备,体积小、转化率高的太阳能、生物质能、地热能、氢能等新型能源装置可在救援装备上进行使用,尽可能地实现就地取材完成能量转化,以解决灾害现场紧缺的能源问题。

在环境适应性方面,灵巧的结构将使得可移动智能应急救援装备向着极端地形适应性的方向发展,具有很强的越障能力和运动效率。结合其在极端环境下信息传输的实时性与可靠性、夜间环境感知的准确性等性能,智能救援装备应能够在不同时间、不同空间、不同地形下都能够进行使用。

4.3 装备的智能化向着极端环境精准感知、多维信息自主决策、智能容错、多机动态协同的方向发展

在环境感知方面,微型光学结构纳米传感器、钙钛矿单晶数字图像传感器等新型的传感器及深度学习算法将应用于智能救援装备上,通过多传感器融合技术、高效的信息提取与处理技术、多任务并行及动态分析等先进的技术,并结合遥感技术及多机多信息判断,实现在坍塌或危化品爆炸后造成的废墟、浑浊复杂的水下区域、动态的杂乱环境、烟尘等造成的视线受阻等条件下实现较为准确的环境感知,为运动决策提供准确的参考。

在自主决策方面,面向救援现场复杂任务,动态概率网络决策方法、基于贝叶斯网络的决策方法等新型的决策算法将被应用于智能救援装备上,并通过突破面向大规模连续状态及具有高维空间的增强学习方法等相关技术,大幅提高决策问题的求解效率,最终实现智能应急救援装备将向着复杂任务高效的自主决策及高鲁棒性的方向发展。此外,救援人员与救援装备决策的矛盾分析与自主判断也是自主决策未来发展的方向之一。

在智能容错方面,智能应急救援装备未来应能够实现智能容错,即在部分构件或系统因不可预知因素发生故障时,可通过自适应动态规划(Adaptive dynamic programming, ADP)等智能的自学习策略改变运动方式或控制模式,最大限度地继续完成相关工作,以减少由于装备故障而对救援工作造成的影响。

在多机协同方面,智能救援装备由单一装备独立完成某一任务向着多机协同的方向发展,通过采用元启发式优化算法、动态规划算法等先进的算法,多装备共同协作完成某一任务,扩大救援装备的使用范围,完成大量单一装备无法完成的工作,将更多的救援人员从危险的救援工作中解放出来。

4.4 通信技术向着设备的极速组网、复杂空间环境多元信息远距离高穿透性精准通信的方向发展

在硬件方面,应用于灾害现场的通信装备将向着小型化、集成化、一体化的方向发展,通过移动式和固定式相结合的方式,以便能够省去繁琐的组网过程,实现在狭小空间内更加高效的硬件搭建。特别地,移动通信车辆也应向着小型化、模块化的方向发展。

在关键技术方面,5G通信技术将被用于救援装备,高速、低功耗、低时延将大幅提高救援效率。同时,高温、高压、多重覆盖物阻隔等极端条件下的信息传播衰减机理将被揭示,语音、视频、文字多媒体通信方式同步采集及融合技术,空中、地面、地下、水下等具有复杂障碍物的多维空间的高穿透技术将被突破,最终实现极端环境下人机/机机高效通信。

4.5 救援装备向着操作便捷、人机友好的方向发展

操作的便捷性和人机交互的友好性是智能应急救援装备的发展趋势。对于前者,虽然智能装备因功能丰富,结构和控制系统都较为复杂,但操作的便捷性不可忽视,这可以降低救援装备对操作人员的专业度要求,使得救援人员可在灾难现场快速操作救援装备,提高救援效率。对于后者,救援装备应具有友好的交互界面,以提高救援人员对复杂救

援装备的接受程度。

除上述发展趋势外,结合现有应急救援装备的性能特点,建立一套完整的性能评价体系是应急救援装备领域的发展趋势之一。通过建立一系列标准体系,可以减小不必要的浪费,实现救援资源的快速整合^[127-128]。

5 结论

智能化是应急救援装备的发展趋势之一,是在重大自然灾害和人为事故救援中提高救援效率、保障救援人员和受困人员生命安全的重要途径。因此,大力发展智能应急救援装备,加强重大自然灾害的防治瓶颈技术的研发,全面提升我国应急救援装备技术水平,可以为应急抢险救灾提供更加有力的保障。智能救援装备种类繁多,根据救援环境和用途的不同,可分为空中救援装备、陆地救援装备、水下救援装备以及通用救援装备。在综述了智能应急救援装备及共性技术国内外发展现状的基础上,指出了我国智能应急救援装备的研发还存在缺乏面向通用/专用不同需求的结构设计方法、特殊灾害环境下的救援装备的性能不佳、智能化程度不高、通信基站技术不成熟、人机交互效果不佳等问题,这都使得智能救援装备尚未在大型救援现场得到广泛应用。指出智能应急救援装备将通过多学科融合,在结构设计、环境感知、自主决策与运动控制、高效通信及人机交互等方面实现智能化,最大限度地代替救援人员完成救援任务。

参 考 文 献

- [1] 浙江省化学品安全协会. 2018 年生产安全事故死亡 3.46 万人, 煤矿死亡 333 人[EB/OL]. [2019-09-14]. <http://www.zjhpxh.org.cn/?mod=newsdat&id=3251>. ZCSA. 34.6 million people died in production safety accidents in 2018, and 333 in coal mines[EB/OL]. [2019-09-14]. <http://www.zjhpxh.org.cn/?mod=newsdat&id=3251>.
- [2] 应急管理部. 应急管理部、国家减灾委办公室发布 2018 年全国自然灾害基本情况[EB/OL]. [2019-09-14]. https://www.mem.gov.cn/xw/bndt/201901/t20190108_229817.shtml. Ministry of Emergency Management. The Ministry of Emergency Management and the Office of the National Committee for Disaster Reduction issued the basic situation of natural disasters in 2018. [EB/OL]. [2019-09-14]. <http://www.zjhpxh.org.cn/?mod=newsdat&id=3251>.
- [3] 胡卫建, 尚红, 司洪波, 等. 我国应对大震巨灾应急救援装备的技术需求研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(5): 844-850.
- [4] HU Weijian, SHANG Hong, SI Hongbo, et al. The demand study of the technological equipments for disposal to the emergency rescue of a great earthquake in China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universtatis Pekinensis, 2010, 46(5): 844-850.
- [5] NURIA M D, THUEUX Y, SAVVARIS A, et al. Target detection using Gaussian mixture models and fourier transforms for UAV maritime search and rescue[C] // Proceedings of the International Conference on Unmanned Aircraft Systems, June 13-16, 2017, Miami, FL, USA. IEEE, 2017: 1418-1424.
- [6] AL-KALL A, GOMEZ-SILVA M J, MORENO F M, et al. An appearance-based tracking algorithm for aerial search and rescue purposes[J]. Sensors, 2019, 19(3): 652.1-652.30.
- [7] HA I K, CHO Y Z. A probabilistic target search algorithm based on hierarchical collaboration for improving rapidity of drones[J]. Sensors, 2018, 18(8): 2535.1-2535.18.
- [8] 钟南. 无人机水上交通安全应急处置关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2016. ZHONG Nan. The key technology of marine traffic safety and emergency for unmanned aerial vehicle[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [9] LIN L, GOODRCH M A. Hierarchical heuristic search using a gaussian mixture model for UAV coverage planning[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2014, 44(12): 2532-2544.
- [10] JI X, HUA Q, LI C, et al. 2-OptACO: an improvement of ant colony optimization for UAV path in disaster rescue[C] // Proceedings of the International Conference on Networking & Network Applications. IEEE Computer Society, 2017: 225-231.
- [11] WANG C Y, LIU P, ZHANG T X, et al. The adaptive vortex search algorithm of optimal path planning for forest fire rescue UAV[C] // Proceedings of the 3rd IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Oct. 12-14, 2018, Chongqing, China. IEEE, 2018: 400-403.
- [12] OETTERSHAGEN P, STASTNY T, HINZMANN T, et al. Robotic technologies for solar-owered UAVs: Fully autonomous updraft-ware aerial sensing for multiday search-and-rescue missions[J]. Journal of Field Robotics, 2017, 35(4): 612-640.

- [12] JOSE O D S B, ENDLER M. Coordinating movement within swarms of UAVs through mobile networks[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops. March 23-27, 2015, St. Louis, MO, USA. IEEE, 2015: 154-159.
- [13] DENTLER J, ROSALIE M, DANOY G, et al. Collision avoidance effects on the mobility of a UAV swarm using chaotic ant colony with model predictive control[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 93(1): 227-243.
- [14] SIDDIQUI K T A, FEIL-SEIFER D, JIANG T, et al. Development of a swarm UAV simulator integrating realistic motion control models for disaster operations[C] // Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Controls Conference (DSCC). October 11-13, 2017, Tysons Corner, Virginia, USA. ASME, 2017: 1-10.
- [15] LIU J, WANG W, WANG T, et al. A motif-based rescue mission planning method for UAV swarms using an improved PICEA[J]. IEEE Access, 2018, 6: 40778-40791.
- [16] 吴瑞. 不确定环境下多无人机编队任务分配方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
WU Rui. Research on task assignment method for multiple UAV formation under uncertainty[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [17] QI J T, KANG J A, LU X. Design and research of UAV autonomous grasping system[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). OCT 27-29 2017, Beijing, China. IEEE, 2017: 126-131.
- [18] RAMON S P, ARRUE B C, OLLRO A. Location and grasping objects using a stereo sensor on UAV in outdoor environments[J]. Sensors, 2017, 17(1): 103.1- 103.16.
- [19] MENNA M, GIANNI M, FERRI F, et al. Real-time autonomous 3D navigation for tracked vehicles in rescue environments[C] // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. September 14-18, 2014, Chicago, IL, USA. IEEE, 2014: 696-702.
- [20] 陈剑飞. 软体搜救机器人的研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
CHEN Jianfei. The research of a soft rescue robot[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [21] EDLINGER R, ANDREAS P, ZAUNER M. Mechanical design and system architecture of a tracked vehicle robot for urban search and rescue operations[C] // Proceedings of the International Conference on Research and Education in Robotics, May 27-30, 2010, Rapperswil Jona, Switzerland. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 46-56.
- [22] DAVID H. Next-gen coal mining rescue robot[EB/OL]. [2019-09-14]. <https://www.popularmechanics.com/science/energy/a6095/next-gen-coal-mining-rescue-robot/>.
- [23] NAGATANI K, KIRIBAYASHI S, OKADA Y, et al. Redesign of rescue mobile robot Quince[C] // Proceedings of the IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, November 1-5, 2011, Kyoto, Japan. IEEE, 2011: 13-18.
- [24] KAMEGAWA T, YAMASAKI T, MATSUNO F. Evaluation of snake-like rescue robot KOHGA for usability of remote control[C] // Proceedings of the IEEE International Safety, Security and Rescue Robotics, June 6-9, 2005, Kobe, Japan. IEEE, 2005: 25-30.
- [25] LIU J, WANG Y, MA S, et al. Analysis of tipover stability for novel shape shifting modular robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(2): 187-192.
- [26] LIU J, WANG Y, LI B, et al. Link-type shape shifting modular robot for search and rescue[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 10(S): 179-183.
- [27] CHANG J, LI B, WANG C, et al. Evaluation method on steering for the shape-shifting robot in different configurations[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(1): 21-32.
- [28] CHANG J, LI B, WU C, et al. The research of shape-shifting robot skid-turning with line configuration[C] // Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, July 6-8, 2012, Beijing, China. IEEE, 2012: 3800-3804.
- [29] LI Y, ZHU H, LI M. A novel explosion-proof walking system: Twin dual-motor drive tracked units for coal mine rescue robots[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(10): 2570-2577.
- [30] ZHU J, GAO J, LI K, et al. Embedded control system design for coal mine detect and rescue robot[C] // Proceedings of the International Conference on Computer Science and Information, July 9-11, 2010, Chengdu, China. IEEE, 2010: 64-68.
- [31] 王志同. 煤矿救援履带车关键技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
WANG Zhitong. Research on key thechnology of mine rescue crawler[D]. Taiyuan: Taiyuan University of

- Technology, 2018.
- [32] 王奉晨. 全地形轮式移动机器人设计与性能分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- WANG Fengchen. Design and performance analysis of all-terrain wheel mobile robot[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [33] KAZUYUKI K, HIROKI I, FUMITOSHI M, et al. Evaluation of snake-like rescue robot KOHGA for usability of remote control[C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), November 5-8, 2012, College Station, TX, USA. IEEE, 2012: 1-6.
- [34] 徐晓兰. 机器人简史[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- XU Xiaolan. A brief history of robots[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015.
- [35] SIEGWART R, LAMON P, ESTIER T, et al. Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain[J]. Journal of Robotics and Autonomous Systems, 2002, 40(2-3): 151-162.
- [36] YAMADA S, HIROSE S, ENDO G, et al. R-crank: Amphibious all terrain mobile robot[C]// Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 9-14, 2016, Daejeon, South Korea. IEEE, 2016: 1067-1072.
- [37] LI H, LI B, XU W. Development of a remote-controlled mobile robot with binocular vision for environment monitoring[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Automation, August 8-10, 2015, Lijiang, China. IEEE, 2016: 737-742.
- [38] SHENG C Y, WANG Y J, FANG C, et al. The design and obstacle-overcoming analysis of multiphase connecting-rod wheeled robot[C]// Proceedings of the 2016 3RD International Conference on Materials Engineering, Manufacturing Technology and Control, February 27-28, 2016, Taiyuan, China. IEEE, 2016: 1599-1603.
- [39] 中信重工开诚智能装备有限公司. KRXJ51-LS 矿用隔爆兼本安型轮式巡检机器人[EB/OL]. [2019-09-14]. <http://www.citichic.com/productinfo/795144.html?templateId=411386>.
- CITIC Heavy Industries Kaicheng Intelligence. KRXJ51-LS explosion-proof wheeled inspection robot[EB/OL]. [2019-09-14]. <http://www.citichic.com/productinfo/795144.html?templateId=411386>.
- [40] OHASHI T, YAMADA H, HIROSE S. Loop forming snake-like robot ACM-R7 and its serpenoid oval control[C]// Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 18-22, 2010, Taipei, Taiwan, China. IEEE, 2011: 413-418.
- [41] DRAPER R, SHEARD J, TROUGHTON M, et al. Soft robotic snake with variable stiffness actuation[C]// Proceedings of the Conference Towards Autonomous Robotic Systems. Springer, 2017: 363-377.
- [42] KAMEGAWA T, YAMASAKI T, MATSUNO F. Evaluation of snake-like rescue robot KOHGA for usability of remote control[C]// Proceedings of the IEEE International Safety, Security and Rescue Robotics, June 6-9, 2005, Kobe, Japan. IEEE, 2005: 25-30.
- [43] MIYANAKA H, WADA N, KAMEGAWA T, et al. Development of an unit type robot "KOHGA2" with stuck avoidance ability[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 10-14, 2007, Roma, Italy. IEEE, 2007: 3877-3882.
- [44] 孙洪, 刘立祥, 马培蓀. 攀爬蛇形机器人爬树的静态机理研究[J]. 机器人, 2008, 30(2): 112-116.
- SUN Hong, LIU Lixiang, MA Peisun. On the three-climbing static mechanism of a snake robot climbing trees[J]. Robot, 2008, 30(2): 112-116.
- [45] 田路. 蛇形机器人的机构设计及控制系统研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- TIAN Lu. Mechanism design and study on motion control system of snake-like robot[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [46] HIROSES S, KATO K. Study on quadruped walking robot in Tokyo Institute of Technology-past, present and future[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 24-28, 2000, San Francisco, CA, USA. IEEE, 2000: 414-419.
- [47] HU N, LI S. Multi-objective hierarchical optimal control for quadruped rescue robot[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2018, 16(4): 1866-1877.
- [48] 苗智英. 3-PUU 轮腿式移动机器人运动性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- MIAO Zhiying. Research on moving performance of 3-PUU wheel-legged mobile robot[D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [49] 李浩. 一种轮履复合救援机器人底盘的动力学分析与优化[D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- LI Hao. The dynamics analysis and optimization for the chassis of a wheeled-tracked rescue robot[D]. Tianjin:

- Tianjin University of Technology, 2015.
- [50] CHOI B, PARK G, LEE Y. Practical control of a rescue robot while maneuvering on uneven terrain[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(5): 2021-2028.
- [51] 刘义祥. 废墟表层顶撑机器人研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- LIU Yixiang. Research on debris surface jack robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [52] 刘鹏. 起缝机器人控制系统的设计与实现[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014.
- LIU Peng. Design and implementation of the control system of a split-opening robot[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014.
- [53] 姜华. 高空救援灭火机器人的设计与实现[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- JIANG Hua. Design and achievement of high-rise building fire fighting robot[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [54] 张成. 履带式灭火机器人动力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- ZHANG Cheng. Study on dynamic characteristics of tracked fire fighting robot[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [55] 孙宁, 裴文亮, 闵桂元, 等. 消防灭火机器人设计及应用[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(7): 942-944.
- SUN Ning, PEI Wenliang, MIN Guiyuan, et al. Design and application of fire fighting robot[J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(7): 942-944.
- [56] ANDO H, AMBE Y, ISHII A, et al. Aerial hose type robot by water-jet for fire fighting[J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2018, 3(2): 1128-1135.
- [57] GU S, CEN Y, HUANG J, et al. Simulation and experimental research on a hydraulic-mechanical joint model of a demolition robot's main arm[C]// Proceedings of the International Conference on Information Science and Control Engineering, July 8-10, 2016, Beijing, China. IEEE, 2016: 1115-1120.
- [58] 肖玉林. 一种救援机器人收纳系统的结构设计与分析[D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- XIAO Yulin. The structure design and analysis of the rescue device of the rescue robot[D]. Tianjin: Tianjin University of technology, 2015.
- [59] DERLUKIEWICZ D, PTAK M, WILHELM J, et al. The numerical-experimental studies of demolition machine operator work[C]// Proceedings of the 13th International Scientific Conference, June 22-24, 2016, Wrocław, Poland. Springer, 2016: 129-138.
- [60] HAGA M, HIROSHI W, FUJISHIMA K. Digging control system for hydraulic excavator[J]. Mechatronics, 2001, 11(6): 665-676.
- [61] 刘金国, 王越超, 李斌, 等. 灾难救援机器人研究现状、关键性能及展望[J]. 机械工程学报, 2006, 42(12): 1-12.
- LIU Jinguo, WANG Yuechao, LI Bin, et al. Current research, key performances and future development of search and rescue robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12): 1-12.
- [62] WANG C R, ZHAO J, XIA E D. Multi-objective optimal design of a novel multi-function rescue attachment based on improved NSGA-II[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, 40(7): 344-1-344-15.
- [63] WANG C R, ZHAO J, XIA E D. Design and optimization of a novel rescue end-effector[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(3): 1032-1044.
- [64] 吴佳尉. 开孔取芯一体破拆救援属具的设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- WU Jiawei. Design of a hole opening and coring rescue subsidiary tool[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [65] 方海峰. 煤矿井下救生舱及硐室防护结构动力学研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- FANG Haifeng. Study on dynamics for safeguard structures of coal mine movable rescue chamber and refuge chamber[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [66] 高广伟, 张禄华. 煤矿井下移动救生舱的设计思路[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(4): 162-164.
- GAO Guangwei, ZHANG Luhua. Design principles of Mobile Coal Mine refuge chamber[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(4): 162-164.
- [67] 常德功, 高新君, 费振忠, 等. 新型矿用救生舱防护密闭门的抗冲击性分析[J]. 机电工程, 2013, 30(10): 1178-1181.
- CHANG Degong, GAO Xinjun, FEI Zhenzhong, et al. Impact analysis on blast airtight door of new mine refuge chamber[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(10): 1178-1181.

- [68] 丁中敏. 家用救生舱的优化设计与性能分析[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.
- DI Zhongmin. Optimization design and performance analysis on the family refuge chamber[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2014.
- [69] 杨福芹, 丁中敏, 常德功. 家用救生舱的概念设计[J]. 机电工程, 2014, 31(1): 12-14.
- YANG Fuqin, DING Zhongmin, CHANG Degong. Conceptual design of family refuge chamber[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2014, 31(1): 12-14.
- [70] 李金年, 张颖. 灾害医疗救援中应急车辆的装备[J]. 医疗卫生装备, 2011, 32(2): 75-77.
- LI Jinnian, ZHANG Ying. Equipment of emergency vehicles in disaster medical relief[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2011, 32(2): 75-77.
- [71] 中国卡车网. 一次看遍德国消防的应急救援车辆[EB/OL]. [2019-09-14]. http://www.chinatruck.org/news/201606/20_62308.html.
- CHINATRUCK ORG. Emergency rescue vehicles for fire protection in Germany[EB/OL]. [2019-09-14]. http://www.chinatruck.org/news/201606/20_62308.html.
- [72] 贾现军. 小型水下救援机器人位姿控制及其在水下搜救中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- JIA Xianjun. Position and attitude control of small rescue ROV and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [73] JIKO M N, SHAYKET M H, BHUIYAN A G, et al. Design and implementation of amphibious smart rescue robot[C]// Proceedings of the International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering, December 8-10, 2016, Rajshahi, Bangladesh. IEEE, 2016: 1.
- [74] ALESSI A, SUDANO A, ACCOTO D, et al. Development of an autonomous robotic fish[C]// Proceedings of the IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, June 24-27, 2012, Rome, Italy. IEEE, 2016: 1032-1037.
- [75] 消防用浅水域搜救机器人[J]. 消防界, 2015(3): 52.
- Shallow water search and rescue robot for fire protection[J]. Fire Industry, 2015(3): 52.
- [76] 孙文芳. 基于前混合磨料射流的水下破拆救援机器人的研究[J]. 科技视界, 2019(1): 77-78.
- SUN Wenfang. Research on underwater disassembly and rescue robot based on premixed abrasive jet[J]. Science Technology Vision, 2019(1): 77-78.
- [77] 周海霞. 水下作业机器人 ROV 动力定位控制研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.
- ZHOU Haixia. Research on ROV dynamic positioning control of underwater operating vehicle[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019.
- [78] 陈饰勇, 王立涛, 陆金福, 等. 一种框架形水下机器人的机械结构[J]. 广州航海学院学报, 2017, 25(1): 22-23.
- CHEN Shiyong, WANG Litao, LU Jinfu, et al. The Mechanical design of a frame underwater robot[J]. Journal of Guangzhou Maritime Institute, 2017, 25(1): 22-23.
- [79] 梁林. 雷达生命探测仪技术发展综述[J]. 数字化用户, 2017, 23(27): 139-140.
- LIANG Lin. Review of the technology development of radar life detector[J]. Digital User, 2017, 23(27): 139-140.
- [80] 刘海盆. 主动电磁波生命信号实时监测处理技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
- LIU Haipen. The technology of real-time detecting and processing active electromagnetic life signal[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [81] 刘冰. 机载生命信号探测系统及其生命体征信号提取算法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- LIU Bing. Research on airborne life signal detection system and its vital sign extraction algorithm[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [82] YAROVVOY A G, LIGTHART L P, MATUZAS J, et al. UWB radar for human being detection[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2006, 21(3): 10-14.
- [83] MAAREF N, MILLOT P, PICHOT C, et al. A study of UWB FM-CW radar for the detection of human beings in motion inside a building[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(5): 1297-1300.
- [84] 谢义方, 方广有. 基于无载频脉冲式超宽带雷达的生命信号检测分析与实现[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(5): 664-670.
- XIE Yifang, FANG Guangyou. Analysis and implementation of vital signal detecting using base-band pulse UWB radar[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2009, 24(5): 664-670.
- [85] 詹秋磊. 主动式矿用生命探测仪的研究与设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- ZHAN Qiulei. Exploration and design of active life detection instrument for coal mine[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [86] 杨剑. 电磁波生命探测方法研究[D]. 成都: 成都理工大

- 学, 2009.
- YANG Jian. The research on coded signal of UWB search and rescue radar[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [87] 吕勤毅. 多普勒雷达传感器及其在非接触生命信号探测中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- LÜ Qinyi. Doppler radar sensor and applications in non-contact bio-signal detection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [88] 马腾. UWB 生物雷达应用中环境干扰抑制技术的实验研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2016.
- MA Teng. Experimental study on environmental interference suppression technique in practical application of UWB bio-radar[D]. Xi'an: The Fourth Military Medical University, 2016.
- [89] 宋道志, 王晓光, 王鑫, 等. 多关节外骨骼助力机器人发展现状及关键技术分析[J]. 兵工学报, 2016, 37(1): 172-185.
- SONG Qqiuazi, WANG Xiaoguang, WANG Xin, et al. Development of multi-joint exoskeleton-assisted robot and its key technology analysis: An overview[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(1): 172-185.
- [90] KAZEROONI H. Human augmentation and exoskeleton systems in Berkeley[J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2007, 4(3): 575-605.
- [91] ISHIDA T, KIVAMA T, OSUKA K, et al. Movement analysis of power-assistive machinery with high strength-amplification[C]// Proceedings of the SICE Annual Conference, August 18-21, 2010, Taipei, Taiwan, China. IEEE, 2016: 2022-2025.
- [92] JACOBSEN S. On the development of XOS, a powerful exoskeleton robot[C]// Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 29-November 2, 2007, San Diego, CA. IEEE, 2007: 1.
- [93] LOW K H, LIU X, YU H. Development of NTU wearable exoskeleton system for assistive technologies[C]// Proceedings of the IEEE International Conference Mechatronics and Automation, July 29-August 1, 2005, Niagara Falls, Ont., Canada. IEEE, 2005: 1099-1106.
- [94] ESQUENAZI A, TALATY M, PACKEL A, et al. The rewalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury[J]. American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation, 2012, 91(11): 911-921.
- [95] ZHANG C, LIU G F, LI C L, et al. Development of a lower limb rehabilitation exoskeleton based on real-time gait detection and gait tracking[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(1): 1.
- [96] 归丽华, 杨智勇, 顾文锦, 等. 能量辅助骨骼服 NAEIES 的开发[J]. 海军航空工程学院学报, 2007, 22(4): 467-470.
- GUI Lihua, YANG Zhiyong, GU Wenjin, et al. Development of power assistance exoskeleton suit (NAEIES)[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2007, 22(4): 467-470.
- [97] 郑航明. 自主减重外骨骼下肢机器人的混合控制系统设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- ZHENG Hangming. Design and implementation of a hybrid control system for autonomous carrying-load lower extremity exoskeletons[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2014.
- [98] 方明周, 王瑜, 朱钧, 等. 负重型下肢外骨骼机器人机构研究与仿真[J]. 华东理工大学学报, 2014, 40(5): 656-659.
- FANG Mingzhou, WANG Yu, ZHU Jun, et al. Research and simulation on structure of weight-bearing lower extremity exoskeleton[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2014, 40(5): 656-659.
- [99] 中国科学院上海硅酸盐研究所. 可穿戴设备在灭火及抢险救援行动中的应用[EB/OL]. [2019-09-14]. http://www.sic.cas.cn/xwzx/kjxx/201507/t20150716_4394181.html.
- Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences. Application of wearable equipment in fire fighting and emergency rescue[EB/OL]. [2019-09-14]. http://www.sic.cas.cn/xwzx/kjxx/201507/t20150716_4394181.html.
- [100] 段胜安, 葛泉波, 杜明. 新型智能消防系统的硬件平台构建与研发[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(z2): 284-289.
- DUAN Shengan, GE Quanbo, DU Ming. New intelligent building fire hardware platform of R&D[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(z2): 284-289.
- [101] 孙弋, 徐瑞华. 基于 WiFi 技术的井下多功能便携终端的设计与实现[J]. 工矿自动化, 2007(3): 60-63.
- SUN Yi, XU Ruihua. Design of a kind of multifunction portable terminal used in underground based on WiFi technology and its implementation[J]. Industry and Mine Automation, 2007(3): 60-63.

- [102] 电子技术设计. 解读无人机秒变 4G 基站背后的技术[EB/OL]. [2019-09-14]. <https://www.ednchina.com/news/20170814UAV.html>.
EDN China. Understanding the technology of unmanned aerial vehicle turning into a 4G base station [EB/OL]. [2019-09-14]. <https://www.ednchina.com/news/20170814UAV.html>.
- [103] 杨维, 孙继平, 王柏艳. 矿井移动通信系统结构及移动台基站研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(1): 54-56.
YANG Wei, SUN Jiping, WANG Baiyan. The study on the structure of mine mobile communication system and the mobile and base stations[J]. Journal of Liaoning university of technology, 2001, 20(1): 54-56.
- [104] 占必红, 杨星星, 廖道坤, 等. 一种双显示巡线机器人地面控制基站: 中国, CN201520795629.X[P]. 2015.
ZHAN Bihong, YANG Xingxing, LIAO Daokun, et al. A ground control base station based on dual display patrol robot: China, CN201520795629.X[P]. 2015.
- [105] IAPICHINO G, BONNET C, DEL RIO HERRERO O, et al. A mobile ad-hoc satellite and wireless Mesh networking approach for public safety communications[C]// Proceedings of the International Workshop on Signal Processing for Space Communications, October 6-8, 2008, Rhodes Island, Greece. IEEE, 2008: 1.
- [106] 相生奇. 基于卫星重叠通信的应急救援通信系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
XIANG Shengqi. Research of emergency rescue communication system based on satellite overlap communications[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [107] TAKAHATA K, TAKADA S, SHIBATA Y. Disaster communication network by combination of different wireless LANs[C]// Proceedings of the International Conference on Advanced Information Networking and Applications-Workshops, March 25-28, 2008, Okinawa, Japan. IEEE, 2008: 1129-1133.
- [108] WU Z, XU J, LI B. A high-speed digital underwater communication solution using electric current method[C]// Proceedings of the International Conference on Future Computer and Communication, May 21-24, 2010, Wuhan, China. IEEE, 2010: v2-14-v2-16.
- [109] 沈明玉, 孙伟. AODV 路由协议中负载及能量均衡技术[J]. 合肥工业大学学报, 2008, 31(11): 1798-1800.
SHEN Mingyu, SUN Wei. Research on load and energy balance technology in AODV routing protocol[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2008, 31(11): 1798-1800.
- [110] 王庆文, 史浩山, 戚茜. 一种新的 Ad Hoc 网络跨层能量均衡广播协议[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(5): 671-675.
WANG Qingwen, SHI Haoshan, QI Qian. A novel cross-layer energy-aware broadcasting protocol (CLEABP) for Ad Hoc networks[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(5): 671-675.
- [111] BAUM E, HARPER M, ALICEA R, et al. Sound identification for fire-fighting mobile robots[C]// Proceedings of the Second IEEE International Conference on Robotic Computing, IEEE, 2018: 79-86.
- [112] 钟煜华. 基于三维激光雷达的救援机器人环境感知研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
ZHONG Yuhua. Environmental perception based on 3D lidar for rescue robots[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- [113] MCNEIL J G, LATTIMER B Y. Robotic fire suppression through autonomous feedback control[J]. Fire Technology, 2017, 53(3): 1171-1199.
- [114] SAUDI A, SULAIMAN J. Robot path planning using four point-explicit group via nine-point laplacian (4EG9L) iterative method[J]. Procedia Engineering, 2012, 41: 182-188.
- [115] HITOMI K, SHIBATA T, NAKAMURA Y, et al. Reinforcement learning for quasi-passive dynamic walking of an unstable biped robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2006, 54(12): 982-988.
- [116] 王丽杨. 基于能效优化的双足机器人自学习控制方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2013.
WANG Liyang. Research on self-learning control methods for biped robots based on energy-efficiency optimization[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.
- [117] 刘庆运. 破拆救援机器人关键技术[J]. 现代制造工程, 2009(7): 149-153.
LIU Qingyun. Research on key technologies of demolition and rescue robot[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009(7): 149-153.
- [118] PYLASINGHE K, WATANABE K, IZUMI K, et al. Modular fuzzy-neuro controller driven by spoken language commands[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, 2004, 34(1): 293-302.
- [119] PAN Y, GAO F, QI C K, et al. Human-tracking strategies for a six-legged rescue robot based on distance and view[J].

- Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 30(2): 219-230.
- [120] XU Y L, GAO F, PAN Y, et al. Method for six-legged robot stepping on obstacles by indirect force estimation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 30(4): 669-679.
- [121] 李明龙, 杨文靖, 易晓东, 等. 面向灾难搜索救援场景的空地协同无人集群任务规划研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(11): 1-9.
- LI Minglong, YANG Wenjing, YI Xiaodong, et al. Swarm robot task planning based on air and ground coordination for disaster search and rescue[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(11): 1-9.
- [122] 甄伟鲲, 康熙, 张新生, 等. 一种新型四足变胞爬行机器人的步态规划研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(11): 26-33.
- ZHEN Weikun, KANG Xi, ZHANG Xinsheng, et al. Gait planning of a novel metamorphic quadruped robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 26-33.
- [123] BELVAL E J, WEI Y, CALKIN D E, et al. Studying interregional wildland fire engine assignments for large fire suppression[J]. International Journal of Wildland Fire, 2017, 26: 642-653.
- [124] OWADA Y, JEONG B, KATAYAMA K, et al. An implementation of multichannel multi-interface MANET for fire engines and experiments with WINDS satellite mobile earth station[C]// Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, April 3-6, 2016, Doha, Qatar. IEEE, 2016: 1.
- [125] 尚佳宁, 赵京, 司洪波, 等. 基于多目标规划的地震应急救援营救装备的优化配置[J]. 灾害学, 2013, 28(4): 193-196.
- SHANG Jianing, ZHAO Jing, SI Hongbo, et al. The optimal allocation for earthquake emergency rescue equipment based on multi-objective optimization[J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(4): 193-196.
- [126] 赵京, 张自强, 郑强, 等. 机器人安全性研究现状及发展趋势[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(7): 4-15.
- ZHAO Jing, ZHANG Ziqiang, ZHENG Qiang, et al. Research status and development trend of robot safety[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(7): 4-15.
- [127] 胡卫建, 颜军利, 赵京, 等. 废墟搜救机器人性能综合评价[J]. 科学技术与工程, 2017(17): 252-259.
- HU Weijian, YAN Junli, ZHAO Jing, et al. Performance comprehensive evaluation of the ruins search and rescue robots[J]. Science Technology and Engineering, 2017(17): 252-259.
- [128] 赵京, 杨聪, 胡卫建. 基于 AHP-模糊综合评价法的轮履复合型搜索机器人性能评价及其软件开发[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(6): 801-808.
- ZHAO Jing, YANG Cong, HU Weijian. Performance evaluation for search robots with wheel-track based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation and development of evaluation software[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(6): 801-808.
-
- 作者简介: 董炳艳, 女, 1979 年出生, 硕士, 副研究员。主要研究方向为应急产业、应急救援装备等。
E-mail: ceradby@163.com
- 张自强(共同通讯作者), 男, 1987 年出生, 博士, 讲师, 主要研究方向为智能救援装备、仿生机器人技术、机器人机构学。
E-mail: zhangziqiang@bjut.edu.cn
- 陈树君(通信作者), 男, 1971 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为现代焊接设备及自动化, 电力电子技术与电磁兼容, 先进焊接工艺。发表论文 100 余篇。
E-mail: sjchen@bjut.edu.cn