面向重大疫情应急防控的智能机器人系统研究

张辉^{1,2*}, 王耀南^{1,2*}, 易俊飞², 钟杭², 刘理², 缪志强², 江一鸣²

1. 湖南大学机器人学院, 长沙 410082

2. 湖南大学机器人视觉感知与控制技术国家工程实验室, 长沙 410082

* 通信作者. E-mail: zhanghuihy@126.com, yaonan@hnu.edu.cn

收稿日期: 2020-04-24; 接受日期: 2020-04-30; 网络出版日期: 2020-07-15

国家自然科学基金 (批准号: 61971071)、国家重点研发计划 (批准号: 2018YFB1308200)、湖南省自然科学基金 (批准号: 2018JJ3079)、湖南省重点研发计划 (批准号: 2018GK2022)、长沙市科技计划项目 (批准号: kq1907087) 和湖南省创新型省份建设专项经费 (批准号: 2020SK3007) 资助项目

摘要 近年来, SARS 病毒和 MERS 冠状病毒等全球传染性疫情频繁发生, 2019 年 12 月至 2020 年 5 月 7 日, 新冠肺炎 (COVID-19) 疫情已造成世界范围内 210 多个国家的 370 多万人感染, 其中超过 26 万人死亡. 此次疫情严重影响了人民生命安全和、社会正常秩序和经济稳定发展, 因而探索和实施面向重大传染病的新型防控方案迫在眉睫. 随着机器人和人工智能技术的发展, 复杂场景下的多类型应急防控智能机器人应运而生, 并在疾病防控、排查诊断及治疗护理中扮演着至关重要的角色. 本文以重大疫情防控过程中面临的物资供给不足、消毒任务繁重等问题为切入点, 研究了医用物资搬运机器人、多场景消毒机器人、医护辅助机器人、排查防控机器人、复工复产机器人等系统方案和应用情况, 并对环境感知、自主导航、运动规划、5G 通信技术等多项疫情应急防控机器人关键技术的现状进行了对比分析. 最后, 对面向重大疫情应急防控智能机器人系统的前景提出了技术展望.

关键词 疫情应急防控, 疫情机器人, 环境感知, 自主导航, 运动规划, 5G 通信技术

1 引言

钟南山院士指出, “传染病没有国界, 没有强力干预新冠肺炎不可能消失”. 新发和再发传染病是一个重要的公共卫生问题, 尽早发现并立即应对疾病控制至关重要^[1]. 世界各国之间的联系日益紧密、人员流动日益广泛, 导致近年来传染性疾病规模日渐广泛^[2], 一般疫情若未能得到合理控制, 就极易发展成为重大疫情. 重大疫情的暴发区别于一般疫情的暴发, 它会给全人类都带来巨大的灾难. 据统计, H1N1/A 流感病毒^[3]自暴发以来全球至少有 18156 人死亡; 埃博拉病毒^[4,5]有 28646 确诊和疑似病例, 其中有 11323 例死亡. 由此可见, 重大疫情的暴发仍然是世界范围内造成死亡的主要因素之一^[6].

引用格式: 张辉, 王耀南, 易俊飞, 等. 面向重大疫情应急防控的智能机器人系统研究. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 1069–1090, doi: 10.1360/SSI-2020-0107
Zhang H, Wang Y N, Yi J F, et al. Research on intelligent robot systems for emergency prevention and control of major pandemics (in Chinese). Sci Sin Inform, 2020, 50: 1069–1090, doi: 10.1360/SSI-2020-0107

2019 年 12 月至今, 一场新冠肺炎 (COVID-19) 疫情在全世界范围暴发. 据世界卫生组织报告 (截至 2020 年 5 月 7 日), 在超过 210 个国家/地区累计确诊病例 370 多万. 2020 年 2 月, Wu 等^[7] 就对新冠肺炎的传播力进行了一项建模研究, 对其发展为全球流行病进行了合理预测; 并预测若不能采取有效的措施, 病毒将席卷全球, 所有医护人员乃至全世界人民将面临巨大压力. 尽管在此期间, 我国政府采取了一系列有力的措施进行防控, 学者们也竭尽全力对病毒展开研究, 如对抗病毒药物的有效性进行评估^[8]、对病毒的 CT 影像特征进行研究^[9], 但依旧无法有效地阻止一场大规模传染病的暴发. 面对这种重大疫情, 如何科学、有效地防控成为值得深思的问题.

习近平主席在疫情期间提出了“最终战胜疫情, 关键要靠科技”的指导思想. 机器人和人工智能作为最前沿的科技, 在疫情防控过程中起着至关重要的作用. 机器人可以代替人工完成一些高重复性、高危险性的工作. 随着科技飞速发展及智能时代的到来, 各式智能机器人接踵而出, 如用于教育的社交机器人^[10]、用于征服太空的空间机器人^[11]等. 一般说来, 针对不同的工作任务, 可以设计具有不同功能的智能机器人完成任务. 随着机器人、人工智能、5G 通信 (5th generation mobile networks) 等技术的飞速发展, 应用智能机器人可以为防控方案提供一种全新的智能化思路. 针对疫情防控过程暴露出的核心问题, 如医疗物资匮乏、消毒任务繁重、医护人员短缺、排查防治困难等, 投入和使用机器人进行疫情防控无疑会具有极大的优势. 为此 Yang 等^[12] 重点分析了智能机器人在抗击疫情中的可行性, 并且在抗击疫情过程中还会推动机器人技术本身的发展.

在疫情期间, 王耀南院士带领团队, 并联合湖南大学机器人学院、机器人视觉感知与控制技术国家工程实验室、湖南爱米家智能科技有限公司、湖南省人民医院等多方力量, 为抗击疫情贡献出了一份力量. 本团队通过调研定点医院的消毒任务需求后, 针对疫情防控与消杀、智能消毒与巡检、机器人药品配送等场景, 研制了医用紫外消毒机器人、医用喷洒消毒机器人、医用物资配送机器人等应急防控机器人. 此外, 本团队正在加紧研制集测温 - 取样 - 诊断于一体的移动式双臂协作机器人, 以协助医护人员实现对患者检测定位和咽拭子采样, 且该机器人可搭载医用诊疗设备以及实现自主大范围移动.

结合本团队研制的一系列应急防控机器人, 本文提出了一种疫情应急防控机器人系统, 主要包括医用物资搬运机器人、多场景消毒机器人、医护辅助机器人、排查防控机器人、复工复产机器人等多类智能机器人, 且该系统具有高灵活性、高精度度、持续工作时间长等特点. 这不仅可以提高工作效率, 还可减少人员直接接触, 以避免工作人员交叉感染. 因此对疫情应急防控机器人系统展开详细研究是必要的. 疫情应急防控机器人多场景应用如图 1 所示.

2 疫情应急防控机器人系统

2.1 医疗物资搬运机器人

疫情暴发后面临的首要问题是医疗物资短缺, 以此次新冠肺炎的暴发为例, 武汉乃至全国均面临口罩、防护服、护目镜等医疗物资短缺的问题. 医疗物资短缺的重要原因是生产、运输和配送效率不高, 故提高生产、运输、配送过程的效率是解决物资短缺的重要途径. 人工搬运有极大的局限性, 一方面其运输能力有限 (一般小于 50 kg), 另一方面效率不高且受体力制约连续工作一般不能超过 3 h. 为解决人工搬运效率低下的问题, 可自主搬运作业的机器人应运而生. 医疗物资搬运机器人可在生产过程、运输过程、配送过程发挥重要作用, 这对企业的复工复产有重大意义. 搬运机器人也可以在医院、隔离区等多场景开展物资配送工作. 它能够在复杂环境中自主定位并递送产品、货物等, 且载货能

图 1 (网络版彩图) 多场景疫情应急防控机器人及其应用

Figure 1 (Color online) Multi-scene robots and their application for emergency prevention and control of pandemics

力 ≥ 100 kg, 使得它兼具传统递送机器人负载量大和能够完成室内递送服务的双重功能。

2.1.1 物资搬运机器人发展历程

早在 1996 年时, Snyder 等^[13] 开发了一种物料搬运的系统. 该系统提出以类似人类手臂的一种机械手搬运物料以取代人工搬运, 并且对机械手的控制问题进行了探讨. 此外, Sakai 等^[14] 设计了一种能处理农业中重物料的机械手, 并利用运动学指标对搬运重物的机械手进行分析, 验证了机械手在搬运物资过程中的优越性. 为提高搬运过程的效率及搬运过程的灵活性, 同时保证工人处于最高安全水平, Universidad Politécnica de Madrid 的自动化和机器人技术中心设计和开发了一个模块化的柔性协作机器人原型, 其搬运过程更灵活且智能化程度更高^[15]. 在当前工业 4.0 的背景下, 为更好地优化搬运机器人的性能和节省成本, Wan 等^[16] 介绍并分析了一种被称为上下文感知云机器人 (CACR) 的认知工业实体, 并验证了其搬运效率的优越性; 为进一步满足制造业生产的需求, Azizi 等^[17] 设计和制

图 2 (网络版彩图) 抗疫中多场景物资搬运机器人的应用

Figure 2 (Color online) Application of multi-scene material handling robots in anti-pandemics

作了一个包括传送带、机器人和传感器的智能搬运系统。

此外,为实现搬运机器人对目标的精度抓取和分拣,许多学者都付出了努力^[18~20]. Wang 等^[21]提出了尺度不变特征变换 (SIFT) 与矩不变量融合的目标识别定位方法,这种方法可以减小尺度、变形、光照等对目标的影响,进而提高分拣机器人的灵活性. Gürel 等^[22]通过对搬运机器人采取速度控制策略,可以减少能量损失.

2.1.2 多场景下物资搬运机器人及应用

在面对重大疫情时,为满足物资需求,采用搬运机器人取代人工搬运和配送,不仅可以提高物资的供给效率和减少浮尘的产生,还能降低人员交叉感染几率,这在抗疫过程中意义十分重大.关于搬运机器人在抗击疫情中的主要应用场景如图 2 所示,本小节对其进行具体的介绍.

(1) 医院场景下物资搬运.在疫情暴发期间,对于火神山和雷神山医院这种大型医院来说,人工搬运医疗物资的工作量巨大,利用搬运机器人实现医院内的物资运输和配送尤为重要.在医院场景中应用的搬运机器人,可分为医疗器械搬运机器人、药品搬运机器人、废料回收搬运机器人;借助机器人可以实现从仓库至病房医疗物资的搬运配送、从药房到病房的药品配送,以及从仓库到手术室的医疗器械配送及回收.为此, Takahashi 等^[23]开发了一种用于医院的自主全向移动配送机器人系统,该机器人可用于运送行李、重要的标本和其他材料.针对单配送机器人一次只能完成一项任务的局限性, Jeon 等^[24]提出了一种通过将多个任务分配给一个机器人的舰队优化方法,来最大化同时操作一组机器人,并提出了一种减少查找路径组合计算量的算法,以提高多机器人协同工作的效率.

(2) 隔离场景下物资搬运.采用隔离措施是阻断传染过程的重要环节,它通常包括居家隔离和设定隔离区.无论采取何种隔离措施,其面临的首要问题便是生活物资的供应.在这种情况下,一些大型超市、餐厅可利用多个配送搬运机器人,建立一个智能无人参与环境,以实现自动招待客人、送餐、清洁餐桌等任务^[25,26],减少顾客之间的交叉感染. Yuan 等^[27]设计了一种基于轮毂电机驱动的快递车辆平台,它通过将人工智能技术与搬运机器人相结合的智能配送机器人,可实现复杂场景的自主配送任务.这样一方面可以根据包裹尺寸调整配送箱柜的大小;另一方面可以实现车柜分离,直接对货柜

图 3 (网络版彩图) 多类型消毒机器人的多场景应用

Figure 3 (Color online) Multi-scenario application of multi-type disinfection robots

进行整体更换, 为物资配送机器人实现社区楼下配送任务提供了技术支持. 由上可知, 应用搬运机器人对隔离场景进行配送也是科学抗击疫情的重要举措. 在我国抗击疫情期间, 京东物流自主研发的智能配送机器人迅速投入应用, 实现了第一时间对武汉地区的物资供应. 此外, 上海木木机器人有限公司研发的诺亚医院物流机器人也在全国超过 50 多个医院得到应用.

2.2 多场景下消毒机器人

在重大疫情的防治过程中, 最重要的环节便是针对各种公共场所的消毒, 以便于切断传染途径. 针对不同场所的无菌强度要求不同, 其所需的消毒力度也有区别. 一般说来, 消毒种类主要分为疫源地消毒和预防性消毒. 疫源地消毒是指对有传染源存在的隔离病房进行消毒, 以免病原体外传; 预防性消毒是指在未发现传染源情况下, 对可能被病原体污染的物品、公共场所和人体进行消毒. 消毒机器人的出现, 为复杂场所下的消毒提供了一种全新的解决方案. 智能消毒机器人可全过程自主消毒, 且单台消毒机器人可携带消毒液 1500 ml, 单次连续工作时长达 3 h, 它可应用于隔离病房、手术室、发热门诊等院内消毒, 以及地铁站、道路等公共场所消毒. 消毒机器人的多场景应用如图 3 所示.

2.2.1 医院内多场景下消毒机器人及其应用

(1) 紫外线消毒机器人. 紫外线消毒机器人主要通过释放出特定波长的紫外线, 进而破坏微生物机体细胞中的脱氧核糖核酸 (deoxyribonucleic acid, DNA) 或核糖核酸 (ribonucleic acid, RNA) 的分子结构, 造成生长性细胞和再生性细胞永久性死亡, 从而实现杀菌消毒的效果, 一般用于疫源地消毒. 新冠肺炎不仅通过飞沫传播, 还可通过污染的表面传播, 且在无生命体征的表面存活数天, 包括金属、玻璃及塑料等, 而紫外线装置用于减少医院高接触表面的污染是有效的^[12].

2012 年, Shatalov 等^[28]设计的一种紫外线发射装置能有效地用于杀菌消毒. Mathebula 等^[29]验证了在便携式设备中使用杀菌紫外线二极管系统 (ultraviolet C light emitting diode, UVC-LED) 进行消毒的可行性. Chanprakon 等^[30]开发了一种用于手术室或病房进行灭菌的紫外线机器人, 它可以实现 360° 无死角消毒且能进行自主避障, 并验证了 8 s 以内可消除距紫外线消毒机器人 35 mm 处放置的金黄色葡萄球菌细菌样品. 在此次国内抗击疫情期间, 湖南大学国家重点实验室、湖南大学机器人学院及湖南爱米家智能科技有限公司等多方力量研制出的医用紫外线消毒机器人, 能够智能自动导航, 并能同时对医院病房进行紫外线和喷洒两种消毒.

(2) 过氧化氢蒸汽消毒机器人. 过氧化氢蒸汽 (hydrogen peroxide vapor, HPV) 消毒机器人利用了气态过氧化氢比液态更具灭菌能力的优点, 其作用原理是通过复杂的化学反应解离具有高活性攻击病毒的羟基, 进而破坏病毒的细胞膜、蛋白质和 DNA 以达到消毒灭菌效果; 它通常用于隔离病室、手术室等密闭空间的灭菌. HPV 可以减少环境污染, 且降低了生成耐药性生物的风险^[31]. 但是过氧化氢蒸汽消毒机器人仅在可见区域有效, 而无法到达封闭区域, 如放有物品的抽屉或其底部^[32].

在国内抗击疫情期间, 上海梵通生物科技有限公司研制出的第二代消毒机器人, 采用汽化过氧化氢高水平消毒技术和人工智能技术相结合, 消毒面积可达到 300 m², 可应用于医院场景下病房、手术室、检验科的消毒.

(3) 其他类型消毒机器人. 其他类型消毒机器人包括电磁消毒机器人、次氯酸消毒机器人等. 由于其他类型的消毒机器人在实际推广和应用中并不广泛, 在此不再赘述. 另外结合多种消毒方式的机器人, 在实际应用中能发挥更强大的作用, 抗疫期间, 钛米消毒机器人可集成过氧化氢、紫外线、等离子空气过滤多种消毒方式对多重场景进行自主消毒任务.

上述消毒机器人, 可在医院场景内进行全面的消毒杀菌. 在疫情防控过程中, 它一方面可以保护医护人员、减少医护人员被感染的风险; 另一方可以高标准完成消毒任务, 包括死角消毒; 最后, 它还能缓解医护人员的压力, 无需专业医护人员进行消毒杀菌.

2.2.2 公共场所消毒机器人

在阻断疫情扩散的过程中, 在地形复杂的公共场所进行预防式消毒是有难度的, 这要求预防式消毒机器人具有灵活性强、精度高的特点. 预防式消毒强度低于疫源地消毒, 它通常是在居住区、活动广场等公共场所进行消毒.

履带式移动机器人一般可在复杂场景中自由移动, 进而完成指定任务. Chen 等^[33]设计了一种能在崎岖不平的路面和障碍物上行走的履带式全向移动机器人. 履带式移动机器人广泛应用于工业领域, 如 Sheng 等^[34]设计了一种微型履带式机器人用于工程结构检测. 针对地形复杂的公共场所, 将履带式移动机器人和喷雾消毒相结合以完成自主消毒任务是必要的. 履带式消毒机器人有助于阻断传染途径, 全程实现无人参与、智能导航, 全方位完成消毒任务. 它广泛应用于小区和其他公共场所, 在切断传染途径的过程中发挥了重大作用. 此外, 还有无人机作为载体的消毒机器人, 也可以完成公共

场所的消毒任务,而且无人机消毒具有效率高、覆盖面广的优点.作为复工复产机器人中的一种,这些消毒机器人对于员工的身心健康起着保障作用.

2.3 医护辅助机器人

在疫情防控工作中面临的另一重大问题便是医护人员的紧缺.由于医护人员有限,一方面会导致大量疑似病例无法得到及时的确诊和治疗;另一方面还会导致疫情的蔓延,使其无法得到有效的控制.在此次疫情期间,为解决医护人员的不足,我国政府采取了各类紧急措施如成立其余省份的援鄂医疗队、返聘退休的医疗工作者等,但医护人员的短缺依旧是防控工作的一大短板.为此,疫情防控机器人应“挺身而出”,为解决医护人员短缺问题出一份力.现有医护辅助疫情防控机器人大致可分为诊断类医疗机器人、护理类医疗机器人、手术及术后康复类机器人等.

2.3.1 诊断类医疗机器人

在疫情扩散阶段,科学诊断疑似病例和确诊患者是至关重要的,这能够为阻断疫情扩散提供更好的支持.在医护人员短缺的情况下,若能通过诊断类医疗机器人结合人工智能技术实现健康人员与确诊患者的诊断,一方面可以加快实施对确诊患者的治疗工作,另一方面也可以阻止疫情的扩散.

为帮助医生更好地进行超声波诊断,Salcudean等^[35]提出了一种机器人辅助的方法,以实现超声波诊断远程操作.尽管此诊断过程依旧是以医生诊断为主,但这种利用机器人辅助医生进行诊断的方法,为后续诊断机器人技术的发展开辟了道路.Koizumi等^[36]研究了一种利用机器人视觉的技术,以建立心脏超声心动图的评价和诊断系统.Kobayashi等^[37]设计了一种可诊断老人是否患有老年痴呆症的机器人,主要是让老年人置身于特殊房间中的场景与通讯机器人交谈,利用云机器人技术平台以诊断痴呆症.Kokot等^[38]提出了一种基于监督学习的儿童声音行为自动分类方法,以实现机器人对儿童自闭症的诊断.利用机器人技术对病情进行分析诊断已经成为一种潮流,根据不同的程序开发出具有不同诊断功能的机器人,可以实现问诊过程的无人化.

在面对传染性强的重大疫情时,疫情防控机器人参与诊断过程具有重大意义.它不仅能缓解医护人员的压力,同时由于大数据和人工智能处理算法的参与,诊断过程的效率会更高.例如,结合此次的武汉疫情,达摩院研发的医疗AI可以帮助医生诊断成千上万例临床疑似新冠肺炎病例CT影像,它不仅能够在20 s内完成单个影像的分析,而且准确率达96%.对比传统医生的诊断方式,这种AI诊断机器人的诊断效率明显提高.

2.3.2 护理类医疗机器人

在防控疫情时,从疑似患者接受诊断到确诊患者接受治疗的整个过程都少不了医护人员的护理.为缓解医护人员的压力,引入护理类医疗机器人是必要的,如新冠肺炎患者的初步诊断可通过检测鼻咽和口咽拭子,应用护理类医疗机器人可以加速检测的过程^[12].护理类智能医疗机器人具有视觉、听觉等一般功能,它们的主要任务是通过提供和准备物资、材料和药物来提高运作效率.准备物资包括医疗资源的分配,通过机器学习、计算机视觉技术来读取楼层的当前状态,并对资源分配提出建议,再使用语音识别来接收护士的反馈.这是首次将机器人系统应用于医院,以帮助协调病人护理所需的资源^[39].准备材料是指搜集病人的基本体征数据,如心率和体温等.波兰Bialystok University of Technology开发的机器人,被设计成儿童医院医务人员的辅助机器人和年轻患者的陪护机器人,它配备了许多传感器和诊断功能,温度测量就是其中最重要的一项^[40].如测温机器人的测温捕捉距离 ≤ 30 m,机器人测温机构 360° 自由旋转,可实现 -40° 到 60° 的俯仰,测温时间 ≤ 1 s,误差在 0.1°C 以内.

此外, 护理类智能机器人可以通过自动导航技术将药物、护理餐自主送达病房, 同时它还可以采集患者的体征信息反馈给医生. 在疫情期间, 大量的病人涌入医院, 这无疑给医护人员带来了极大的压力. 采用护理类医护机器人不仅可以缓解医护人员不足的压力, 还能保护医护人员以免被感染.

2.3.3 手术及术后康复机器人

在疫情期间, 采用手术类机器人可以协助或取代医生对患者进行手术. 手术类机器人是汇集多项现代高科技手段于一身的综合体, 这类机器人的稳定性和精确度都高于人工操作. 目前, 手术类医疗机器人发展的智能化程度越来越高, 它从零智能化、半智能化到全智能化大致划分为 6 个层次^[41]. 为安全地解决远程微创手术问题, Butner 等^[42]对商业机器人手术系统涉及的关键技术, 如数据延迟和数据丢包问题等进行了探讨和研究. 由于语音控制的便利性, 它不需要肢体参与就可减少肢体抖动产生的误差. Zinchenko 等^[43]研发了一种内窥镜架的声音控制, 以对微创手术机器人进行控制. 纳米机器人是新兴的机器人领域, 它在微创手术中的应用方面具有巨大的潜力. Li 等^[44]综述了近年来纳米机器人在生物医学领域的研究进展和发展前景, 其中包括在精准手术方面的优势.

康复机器人融合了康复医学、生物力学、机械学及机器人学等诸多学科, 主要应用于术后康复护理和治疗等方面. 已有诸多学者和团队对其进行研究, 如侯增广等^[45]从康复机器人及多种康复训练模式、智能辅助系统与生机电技术、康复与辅助相关的多模态传感与控制方法、外骨骼和可穿戴系统、智能假肢与人机安全性等诸多方面, 对康复类医疗机器人和智能辅助系统进行了详细的介绍. 通过康复类医疗机器人的辅助, 不仅可以弥补人类的生理缺陷, 甚至可以使人类的能力超出正常人的生理水平^[46]. 总之, 手术及术后康复机器人主要服务于病情较为严重的患者.

在疫情期间, 所有医护人员及医生面临着巨大的压力, 诊断类机器人、护理类医疗机器人和手术及术后康复机器人无疑为抗击疫情提供了一份智能化力量.

2.4 排查防控机器人

在面对重大疫情时, 疫情的排查任务也是难点问题之一. 由于重大疫情涉及的地区和人员广泛, 对所有的人员进行排查防控是极具挑战性的任务. 疫情的潜伏期长短和传染性强度也直接关系到排查防控工作的效率. 排查防控面临的主要困难是人员流向难以监控和潜在传染人群难以排查. 采用排查防控机器人, 利用其语音和智能对话的功能可实现排查防控目的, 而且此过程无需人工参与. 同时, 排查防控机器人作为复工复产机器人对社会秩序的恢复也会发挥重大作用.

2.4.1 语音排查机器人

疫情期间, 所有人员均需避免外出以防感染. 语音排查机器人主要是指利用智能语音机器人通过打电话的形式, 对待排查人员进行多轮交互式会话, 收集和确认包括身份、近期活动区域及近期症状等信息, 再自动核对信息并进行比较分类统计, 每天快速反馈统计结果至云端数据库, 以达到排查目的. 此类机器人可以大幅减少排查人员的工作量, 高效地完成语音排查工作.

针对辖区内老旧小区多, 信息化手段推广难、短信表单不能全量触达的问题, 中国移动推出了 5G 智能语音机器人. 该机器人主要是基于智能呼叫的随访系统, 采取人工智能语音识别技术, 排查收集受访者的语音回答, 并翻译成文字录入后台数据库以实现信息即时导出. 此外, 在疫情暴发期间, 已有众多语音排查机器人投入使用, 如普陀公司的“语音机器人”等, 在此不再详细列举. 总之, 语音排查机器人结合 5G 通信技术可实时反馈排查数据, 能及时掌握流动居民的健康信息, 为采取科学的防控管理措施提供了技术保障, 对疫情防控也有重大的意义.

2.4.2 测温巡逻机器人

在疫情期间,所有人员流动性大的场所均应采取科学的防控措施.通过融合多传感器,测温巡逻机器人可服务于社区、商场及车站等公共场所,可代替或协助工作人员对群众进行非接触式的体温测量、筛查体温异常者和未戴口罩者等工作,并且通过现有的安全系统与面部识别软件联网,可以追溯疑似患者的接触情况,向可能有感染风险的其他人发出警报^[12].测温巡逻机器人既可以大幅提升公共场所的流通效率,也可以作为复工复产的助推器.

在抗击疫情的过程中,众多企业投入了对测温巡逻机器人的生产与应用.高新兴5G警用巡逻机器人是国内第一款用于测体温的巡逻机器人,它搭载了5个高清摄像头,可实现全景无死角巡逻,一次性测量10个人的体温,温度误差在0.5摄氏度以内;它可将监测到的体温数据通过5G通信技术实时传输到控制室,在机场、医院、社区等多个场景路段实现排查防控.另外,借助移动式红外测温筛查、循环播报提醒等功能,它可实现远程可视化指挥,在危险、高强度的环境中代替工作人员完成排查、防控任务,从而有效节约了人力资源.在疫情防控期间,“减少人与人的接触”已成为共识,测温巡逻机器人代替工作人员是十分必要的.由于测温巡逻机器人具有语音识别、智能交互、智能测温等强大功能,采用测温巡逻机器人对公共场所进行排查防控意义重大.

2.4.3 远程问诊机器人

在疫情防控期间,由于医护人员的短缺,线上咨询可能面临医生无法及时响应的问题,而线下问诊又会面临长时间排队等待的问题.在这种情况下,远程问诊机器人应运而生.与远程诊疗不同,远程问诊机器人主要是通过线上咨询的方式,以帮助人们自主排查疫情,从而减轻医生线上和线下的压力.远程问诊机器人通过智能语音系统缓解人员咨询压力,一方面可以避免普通流感患者盲目涌向医院,另一方面还能缓解医护人员的压力.

阿里巴巴集团达摩院研发了一款应急防控机器人即远程诊疗机器人,该产品在线上平台推出,以应对新冠肺炎的相关问答.该远程诊疗机器人能回答与疫情相关的问题,如就医信息、附近的定点医院、口罩选用等.语音排查机器人和测温巡逻机器人主要是运用机器人对居民或流动人员进行排查;而远程诊疗机器人主要是面向咨询疫情的相关人员,其意义在于为咨询人员提供一种自我诊断的标准,咨询人员可通过自身情况与智能机器人的标准进行判断,从而开展排查工作.

3 疫情应急防控机器人系统助力“复工复产”

在抗击疫情期间,疫情应急防控机器人系统处于抗疫战场的最前线,并发挥着至关重要的作用.同时,疫情应急防控机器人系统在复工复产过程中也发挥着极其重要的作用.

(1) 物资搬运机器人助力工厂复产.工厂复产一方面可保证抗疫过程的物资供应,另一方面也关系着疫情过后的经济复苏.物资搬运机器人可以大幅度提高生产过程的效率,且能够降低人员之间直接接触;尤其是建设高智能化生产车间,生产全程可由智能搬运机器人完成流水线上所有工作.

(2) 多场景消毒机器人助力企业复工.在抗击疫情过程中,湖南大学机器人视觉感知与控制技术国家工程实验室研制出多场景消毒机器人用于抗击疫情.多场景消毒机器人对于各个场景的消毒起着关键的作用,它通过高效、智能化消毒为企业和公司的复工提供了保障.它可定期、定量对所有场所进行全程自主消毒,以保护所有复工人员的生命安全.

(3) 医护辅助机器人助力医疗体系优化.从自主诊断、医疗护理到手术及术后康复的全过程均由智能机器人完成,这将对整个医疗体系的优化起着推动作用,也是实现智慧医疗的必由之路.

图 4 (网络版彩图) 高端机器人制药柔性生产线系统

Figure 4 (Color online) Advanced robot pharmaceutical flexible production line system

(4) 排查防治机器人助力复工. 排查防治机器人可为全体员工提供健康证明, 进而为后续复工提供健康保障, 这也是保证每个员工自身安全和顺利复工的重要基础.

(5) 以医药生产为代表, 医药机器人制造助力复工. 湖南大学、楚天科技、Bosch 等国内外高端制药装备研发团队, 为满足无菌配药 – 灌装封口 – 质量检测 – 分拣包装的工艺流程需求, 在医药机器人灌装、机器人检测、机器人包装等环节, 研制出多种类型、不同型号的高端机器人制药柔性生产线, 达到了世界最先进无菌化制药水平. 其灌装速度、检测精度等指标突破国际食品及药物管理局 (Food and Drug Administration, FDA) 药品认证标准, 达到了国际领先的水平, 可实现制药过程的无菌对接与智能化生产. 这类机器人生产线对医药产业的复工复产有着重要意义. 高端机器人制药柔性生产线系统如图 4 所示.

4 关键技术研究进展

尽管近年来智能机器人技术得到迅速发展, 但应急防控机器人需要在复杂场景下完成特定的任务 (如消毒机器人需要在公共场所的复杂环境中自主完成消毒任务), 这就要求应急防控机器人具有强自主性、实时通信及高灵活性等特点. 应急防控智能机器人系统关键技术如图 5 所示.

4.1 环境感知

在疫情防控过程中, 疫情应急防控机器人系统要求在多重复杂环境中能自主完成指定任务. 这需要对环境中的障碍物信息进行感知. 环境感知技术既是应急防控智能机器人系统获取环境中物体各类信息的唯一途径, 也是实现机器人自主定位、跟踪导航的前提条件. 同时环境感知技术是智能机器

图5 (网络版彩图) 应急防控智能机器人系统关键技术

Figure 5 (Color online) Key technology of the intelligent robot system for emergency prevention and control

人自主行为理论中的重要研究内容, 为此对环境感知技术研究进展进行分析是必要的. 环境感知主要是通过各类视觉传感器采集数据, 再由计算机提取环境中有效的特征信息并加以处理, 最终通过建立准确的模型来表达所在环境的信息. 通过对有效的环境感知, 机器人可以更好地完成自主定位、运动规划等任务. 机器人环境感知技术包括获取环境信息、处理环境信息. 获取多重环境信息, 主要通过采用不同类型的传感器实现, 目前应用的传感器有摄像机^[47]、超声波^[48]、激光雷达^[49]及多传感器融合^[50]等. 使用不同传感器获取的数据信息也不同, 根据传感器类型的不同, 可将其信息来源大致分为基于摄像头的视觉信息、基于雷达的深度信息、基于全球定位系统(global positioning system, GPS)的位姿信息, 以及基于多传感器融合的多源信息. 此外, 触觉信息也是机器人通过传感器感知的重要信息之一, Seminara等^[51]对机器人触觉感知的研究进展进行了综述. 由于机器人实践功能日渐复杂, 多传感器融合成为环境感知技术的主要方向. 不同传感器数据的处理方式和应用场景也不相同, 如激光雷达采集的点云数据一般用于对物体的三维特征进行识别与分割, 以及重构物体的表面模型; 根据摄像头采集的图像数据, 再通过不同算法对目标物体进行识别与分割. 有诸多学者对点云数据的处理算法展开研究, 其中 Xie等^[52]对点云数据的语义分割进展进行了综述, Che等^[53]对点云数据的目标识别、分割和分类方法进行了探讨. 另外, 对于近年来深受学者追捧的深度学习算法, Shrestha等^[54]对其展开了详细的探究. 在此本文不再赘述算法研究的进展, 而是针对近年来学者在环境感知方面的研究进行总结(如表1所示).

4.2 自主定位

在疫情防控过程中, 应急防控机器人系统的实时位置信息也需要时刻追踪, 尤其是在地形复杂的场景下, 以保证防控任务的顺利进行. 自主定位技术是对机器人的位置精确定位的技术, 也是机器人

表 1 环境感知技术研究进展
Table 1 Research progress of environmental perception technology

Reference	Sensor type	Research	Method	Summary
[55]	Depth camera, lidar	Indoor service robot environment perception and 3D target detection	Multi-channel convolutional neural network combining of the neural network and the RGB, depth image and BEV image	Improve the perception ability of the environment perception ability of the robot
[56]	CCD	Cooperative autonomous positioning of air-ground robots in outdoor environments	Cooperative positioning algorithm of aerial robot and ground robot	The accuracy is better than most sensors, and has a good running time
[57]	CCD, infrared sensor	Decision strategy for multi-robot environment perception	Propose a novel collective perception strategy	While ensuring speed and accuracy, it is more robust
[58]	CCD	Humanoid robots' perception of the surrounding environment	Develop an omnidirectional robot vision system with 5 degrees of freedom	It can provide detailed surrounding environment information of the robot to realize full-range real-time perception
[59]	Microwave radar	Perception of mobile robots in outdoor and open environments	Use PELICAN radar to sense the surrounding environment information	Obstacle detection, mapping and general situational awareness can be achieved
[60]	CCD	Mobile robot's environment perception in the process of semantic navigation	A position recognition model, a rotation region recognition model and an edge recognition model based on transfer learning	It has good applicability and robustness, and it can be considered to expand the adaptability of the dynamic pedestrian environment
[61]	Structured light RGB-D sensor, stereo camera	Unstructured terrain modeling problem of leg robot navigation	Propose an improved elevation grid concept	It can improve the perception ability of small-legged robots

实现自主移动导航的基础. 为此, 对自主定位技术研究进展进行综述也有必要.

应急防控机器人的自主定位主要通过多传感器实现, 如超声波、GPS、激光雷达等. 机器人的定位技术包括相对定位和绝对定位. 相对定位是根据机器人前一个状态的方向和相对位置, 推算出其相对于起始位置的方向和距离; 绝对定位通过设置路标、匹配环境地图或 GPS 等方法预先确定好环境模型, 再确定机器人在整体环境中的位置信息. 两种方式各有优缺点, 绝对定位需要整体环境的先验信息并不适用于未知环境, 而相对定位随着位置更新会产生累计误差. 通过传感器获取位姿信息后, 再通过算法对其进行处理以实现精确定位, 如经典的 Kalman 滤波器. 在早期计算能力有限的条件下, Kalman 滤波器假设当前状态只与前一时刻状态有关, 这将极大地减少对计算内存的占用, 由此 Kalman 滤波成为早期移动机器人定位算法的首选. 即便现在, 各种改进的 Kalman 滤波算法在定位算法中依旧发挥着重要作用. 随着科技的发展及计算机处理能力的日渐强大, 移动机器人的定位和建图 (simultaneous localization and mapping, SLAM) 技术应运而生. SLAM 技术是指机器人在移动过程中同时进行定位和建图, 该技术成为近年来备受关注的研究领域之一.

SLAM 技术主要根据移动机器人每个状态间的位姿约束, 构建优化代价函数, 再通过非线性求解方法对代价函数求最优解, 进而优化机器人位姿, 提高定位精度. Saeedi 等^[62] 对多机器人的 SLAM 系统进行了综述, 马艳阳等^[63] 从基本原理、现有算法, 以及开源数据集 3 个方面对基于事件相机传感

表 2 自主定位技术研究进展

Table 2 Research progress of autonomous positioning technology

Reference	Sensor type	Research	Method	Summary
[65]	Ultrasonic sensor	Mobile robot positioning method	The generalized measurement model of the general sensor structure and the simplified measurement model of the sensor structure are established.	High-precision ultrasonic positioning without increasing temperature information
[66]	UWB, INS	In a closed environment, real-time navigation and tracking of mobile robots	An autonomous navigation system for mobile robots based on tightly coupled INS/UWB is proposed and an improved adaptive Kalman filter (IAKF) algorithm is proposed	It can track the position and posture of mobile robots in real time, and the proposed IAKF algorithm has high positioning accuracy
[67]	Multi-sensor fusion	Mobile robot positioning method when there is noise interference	An HCKF algorithm based on multi-sensor information fusion under wireless sensor networks (WSNs)	During noise interference, the positioning accuracy is still high
[68]	Lidar, stereo camera	Initial positioning of mobile robots	Combine the 3D feature map and the information obtained by light detection and ranging (LiDAR) to construct a 3D map of the robot's surrounding environment	It can realize accurate estimation of the position of the robot
[69]	GPS, INS	Mobile robot positioning and navigation in urban environment	Develop an enhanced fault detection and isolation (FDI) algorithm with short-term memory	It can locate mobile robots in harsh environments
[70]	Vision sensor, inertial sensor	Indoor mobile robot positioning	Improve SIFT algorithm and AFEKF algorithm, and use adaptive and fading extended Kalman filter to process visual and IMU data	The positioning accuracy is higher, but the number of experiments is relatively small, and the trajectory is relatively short
[71]	Depth camera	Fast real-time positioning after the mobile robot starts	An improved ORB-SLAM2 algorithm	It can build and load off-line maps, and perform fast relocation and tracking
[72]	Depth camera	Restaurant mobile service robot positioning accuracy	A positioning method and landmark recognition method based on RGB and depth (RGB-D) visual sensors	It verifies the feasibility of the proposed method

器的定位与建图算法进行了详细综述. 丁文东等^[64]对视觉定位、视觉里程计, 以及基于深度学习的视觉定位展开了综述. 在此, 本文只对近年来机器人的定位技术发展进行总结 (如表 2 所示).

4.3 运动规划

在疫情防控的复杂场景中, 疫情应急防控机器人需要无碰撞地抵达目标地点, 因此路径的选取和规划至关重要. 运动规划技术是实现应急防控机器人系统自主避障, 从而到达指定目的地的技术基础, 故对其发展现状展开研究必不可少.

运动规划技术是根据感知的环境信息, 依据最低耗损原则规划出最优化的路线, 并控制机器人从起始位置无碰撞地运动到目标位置. 运动规划方法大致可分为: 已知环境信息的全局运动规划算法和未知环境信息的局部运动规划算法. 全局运动规划算法主要是在已知全局环境中障碍物的位置、大小等信息背景下, 规划运动路径. 全局运动规划方法具有求解最优路径的优点, 但其缺点主要是计算量

表 3 运动规划技术研究进展
Table 3 Research progress of motion planning technology

Reference	Year	Research	Method	Summary
[74]	2019	Global motion planning of mobile robot with motion constraints	A new method based on improved particle swarm optimization (MPSO) combined with η 3-splines	Storage requirements are reduced and have been successfully applied to two-layer global smooth motion planning with motion constraints
[75]	2019	Optimal motion planning for finding hidden targets in an unknown environment	A hybrid algorithm based on reinforcement learning divided into two stages	It has higher efficiency in finding optimal motion planning for hidden targets and can adapt to random and dynamic environments
[76]	2019	The collision rate of robots in free space	An improved Q-learning algorithm	It can quickly realize the motion planning of mobile robots and reduce the probability of robots colliding with obstacles
[77]	2019	Path calculation in an unknown environment or moving obstacles	An A* search algorithm based on dynamic simplification and an optimized path calculation method with real-time constraints	The search and calculation time for the optimized A* algorithm can be decreased to 91% of the original calculation time
[78]	2019	Convergence speed in optimal path planning	Put forward the concept of partially guiding Q-learning, and use the flower pollination algorithm (FPA) to improve the Q-learning algorithm	Under the challenge environment with different obstacle layouts, the improved Q-learning algorithm convergence speed is accelerated
[79]	2019	System processing time in motion planning	A method combining membrane calculation with genetic algorithm and artificial potential field method	A multi-processor system can be used to obtain a solution in a short time, with better security and smoothness
[80]	2020	Optimal collision-free path in static environment	An off-line path planning method-boundary node method	It can effectively generate the optimal collision-free path
[81]	2020	Solve collision-free motion planning in a short time	A retreat beetle antenna search algorithm	A collision-free path can be effectively planned in a short time

较大、实时性较差. 局部运动规划算法则有较好的动态避障能力, 但缺点是可能会陷入局部极小值点. 如今混合运动规划算法的应用逐渐得以推广. Zafar 等^[73] 对各种复杂环境下的运动规划策略进行了综述, 并指出了各种策略和方法的优缺点. 本文对运动规划的最新研究进展总结 (如表 3 所示).

4.4 5G 通信技术

在疫情防控过程中, 疫情应急防控机器人既各司其职, 又相辅相成, 其中 5G 通信技术是将整个系统连接起来的纽带. 智能应急防控机器人获取的环境信息、病人的体征信息、目标地点的位置信息等, 均需要通过 5G 通信技术实现机器人终端到云端大数据的传输. 本小节主要针对 5G 通信技术的发展现状进行总结.

5G 通信技术是最新一代蜂窝移动通信技术. 早在 2014 年, 尤肖虎等^[82] 对 5G 通信技术的发展趋势与关键技术展开了详细的综述. 5G 通信技术近两年得到了飞速发展, 也是应急防控机器人系统最主要的通信方式, 它完全可以满足其中数据传递的实时性. 近年来, 人工智能技术的飞速发展也为 5G 通信系统的性能优化提供了可能性^[83]. 此外, 6G 通信技术的研究也正在逐步展开^[84].

传统通信方式一般分为有线通信和无线通信两种,机器人一般采用无线方式进行组网通信.一般说来,智能机器人大多采用短距离通信技术便可实现组网通信.但应急防控机器人系统需要在复杂场景完成指定任务,如公共场所的消毒任务,这要求通信距离较广和通信时间尽可能短,为此采用最前沿的 5G 通信技术至关重要.5G 通信技术问世后,其通信距离和数据速度对比 4G 均有了大幅度提升.5G 通信技术在智能交通^[85]、智能医疗^[86,87],及智能电网^[88]等多个领域均有应用.Saxena 等^[88]提出了一种高效的 5G 小蜂窝规划方法,实践证明该方法能够降低能源生产成本,最高可达 35% 的移动峰值能量负载且具有低延迟、低丢包率.Chen 等^[86]研究了一种诊断和治疗糖尿病的新方法,利用 5G 网络作为通信基础设施,为糖尿病患者提供治疗服务,并持续监测患者的生理状态.在疫情防控的过程中,无论是公共监控区、隔离收治区还是诊疗区,对于数据的传输和存储能力都有较高的要求,故要求通信技术具有高速传输、低时延、高可靠性的特点.5G 作为最前沿的通信技术,在疫情暴发中发挥着重要作用.5G 相较于 4G 通信具有更高的传输速率、更低的时延及移动环境中更强的适应性,各种机器人在疫情的防治、诊疗中的数据均可通过 5G 通信进行实时传输.

4.5 自主控制及专用末端工具

自主控制技术是指在无人干预的情况下,机器人把自主控制系统的感知、决策、协同和行动能力结合起来,在非结构化环境下根据一定的控制策略自我决策,并持续执行一系列控制功能以完成预定目标的能力.自主控制系统也是实现应急防控机器人智能化的基础,它往往需要高层次的感知系统,以实现更为精准和灵活的控制策略,如视觉系统^[89]等.Saadatmand 等^[90]提出了一种基于人工智能的 Q-learning 控制器,以实现机器人的最优控制.Hafez 等^[91]研究了完整性风险作为约束条件时,模型预测控制器在机器人的跟踪中的应用,这对机器人自主控制的安全性有重要的意义.

此外,疫情应急防控机器人系统自主复杂的医护辅助任务,如测温、采集鼻咽和口咽拭子等,离不开诸多专用末端工具的应用.针对急救机器人的用户和系统需求,Park 等^[92]提出了一种适用于各种急救工作的末端工具的设计方案,其中包括了注射用末端工具、氧合末端工具及止血末端工具.随后该团队又提出了一种能使机器人快速、简便地进行急救的注射末端装置的概念,并对注射末端装置进行了详细的设计^[93].疫情应急防控机器人系统需要根据具体的任务,设计专用的末端工具.

5 展望

尽管如今面向重大疫情的应急防控智能机器人系统已初具雏形,但在此系统中依旧存在一些问题亟需解决.该系统主要包括医用物资搬运机器人、多场景消毒机器人、医护辅助机器人、排查防控机器人 4 类,其中涉及的关键技术又包括环境感知、自主定位、运动规划和 5G 通信技术.在实际的应急防控过程中,该系统应用的场景地形复杂多变、突发情况多,这对应急防控智能机器人系统的灵活性、待机时间及自主性均有较高的要求.应急防控机器人系统整体存在结构创新不足、智能化程度不高及续航能力不强等问题.为此,通过研读与机器人发展方向相关的文献^[94,95],以及对《机器人产业发展规划(2016~2020 年)》的分析,并结合本团队研发应急防控机器人的经历,本文对应急防控智能机器人系统的前景进行如下方面的展望(如图 6 所示):

(1) 研发新型智能机器人结构包括多传感器的深度融合及设计更高级的仿生结构.应急防控智能机器人要实现各种陌生环境中指定任务的自主完成,其结构的合理性和科学性至关重要.应急防控机器人可以通过多传感器获取更多的外部环境信息、体征信息以及位姿信息等,多传感器的深度融合是机器人长期自主环境适应和获取更强大的环境表征能力的基础.同时,多传感器的深度融合是智能化

图 6 (网络版彩图) 应急防控智能机器人系统展望

Figure 6 (Color online) Prospects of intelligent robot systems for emergency prevention and control

时代的大势所趋, 它可以使智能应急防控机器人具有更强的人机交互能力、更协调的动作行为, 以及更舒适的用户体验. 并且, 未来的人机交互将趋同于“感知”, 计算机的主要交互行为将变成感知行为、感知自然现象、感知人的现象、感知人类行为, 从而实现为人类服务^[96]. 设计更高级的仿生结构对优化应急防控机器人的性能有重大意义, 高级的仿生结构不仅可以节能、高效自主地完成指定任务, 如仿生机械手等, 同时, 高级仿生结构与多传感器的深度融合密不可分, 越高级的仿生结构其传感器数量也越庞大. 研发新型结构是实现多功能、智能化的疫情应急防控机器人系统未来的重要课题.

(2) 探究新型材料、研制新型电源装置. 实现应急防控机器人高效节能、多功能、柔顺且自主的功能, 探究新型材料和制造策略是至关重要的. 传统的材料已无法满足制造具有高级仿生结构的应急防控机器人的需求, 如齿轮、电机等无法完全满足机器人的柔性抓取策略, 并且考虑废弃应急防控机器人的材料回收利用, 探究新型的绿色材料在后续发展历程中至关重要. 此外, 任何电子产品均离不开电源装置的作用, 应急防控机器人需要高度集成各种传感器和电机等元件, 研制新型电源装置是维持其稳定、持续工作的保证. 应用在户外工作的应急防控智能机器人, 如消毒机器人等, 性能强大的电源装置直接决定其工作效率. 探究新型材料、研制新型电源装置也是后续应急防控机器人研究的重要方向.

(3) 云端智能应急防控机器人. 随着计算机处理能力的大幅增强以及 5G 通信技术的发展, 如今信息传递的实时性得到大幅提升, 云端智能应急防控机器人通过云端来处理复杂的多重融合信息, 再利用 5G 通信技术实现数据的实时传输. 云端智能应急防控机器人是数据实时传输与高性能数据处理能力的结合体, 同时云端的大数据可为应急防控机器人学习提供基础, 进而得到更智能的模型.

(4) 深度结合人工智能的应急防控机器人. 尽管多传感器的融合信息可以提供多重环境信息, 但它对于融合信息的处理具有难度, 如点云数据与图像数据的融合. 深度学习算法中的“多模型”、“多模态”和“多任务”可以为融合信息的处理提供一种方案. 另外, 数据集的大小直接关系着深度学习算法性能的优劣, 虽然生成式对抗网络可以针对数据集过少问题提供解决方案, 但随着人工智能进一步推进, 相信无需标签数据的无监督学习会是人工智能算法发展的重要方向. 深度结合人工智能的应急防控机器人可以通过无监督学习进行更高层次的学习, 进而达到更高的智能化程度.

6 总结

在计算机科学和5G通信技术飞速发展的背景下,机器人技术的研究和应用从传统的工业领域快速扩展到各个领域.当我们遭遇一场传染病带来的灾难时,面临的物资匮乏、消毒任务艰巨、医护人员短缺、排查防治困难等问题,智能机器人无疑可以为防控疫情贡献出一份力量.

本文提出了以医用物资搬运机器人、多场景消毒机器人、医护辅助机器人、排查防控机器人、复工复产机器人等多类机器人为主体的疫情应急防控智能机器人系统,并且对该系统的机器人发展及其应用进行了介绍;同时对该系统的关键技术包括环境感知、自主定位、运动规划和5G通信技术的进展进行了综述;最后对该系统的发展方向进行了合理的展望.相信通过后续对疫情应急防控机器人系统的深入研发,最终可形成一个疫情智慧防控网络.该网络可实现对疑似病例的排查、诊断、治疗、康复一体化操作,在此过程中的消毒、患者信息采集、患者信息传输均可通过智能机器人完成,机器人的防控全程可被实时跟踪监控,从而在真正意义上实现智慧防控疫情.

参考文献

- 1 Choi J, Cho Y, Shim E, et al. Web-based infectious disease surveillance systems and public health perspectives: a systematic review. *BMC Public Health*, 2016, 16: 1238
- 2 Ladner J T, Grubaugh N D, Pybus O G, et al. Precision epidemiology for infectious disease control. *Nat Med*, 2019, 25: 206–211
- 3 Jain S, Finelli L, Shaw M, et al. Emergence of a novel swine-origin influenza A (H1N1) virus in humans. *N Engl J Med*, 2009, 360: 2605–2615
- 4 Baize S, Pannetier D, Oestereich L, et al. Emergence of Zaire Ebola virus disease in Guinea. *N Engl J Med*, 2014, 371: 1418–1425
- 5 Holmes E C, Dudas G, Rambaut A, et al. The evolution of Ebola virus: insights from the 2013–2016 epidemic. *Nature*, 2016, 538: 193–200
- 6 Hinman A R. Global progress in infectious disease control. *Vaccine*, 1998, 16: 1116–1121
- 7 Wu J T, Leung K, Leung G M. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study. *Lancet*, 2020, 395: 689–697
- 8 Wang M L, Cao R Y, Zhang L K, et al. Remdesivir and chloroquine effectively inhibit the recently emerged novel coronavirus (2019-nCoV) in vitro. *Cell Res*, 2020, 30: 269–271
- 9 Chung M, Bernheim A, Mei X, et al. CT imaging features of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV). *Radiology*, 2020, 295: 202–207
- 10 Belpaeme T, Kennedy J, Ramachandran A, et al. Social robots for education: a review. *Sci Robot*, 2018, 3: 5954
- 11 Gao Y, Chien S. Review on space robotics: toward top-level science through space exploration. *Sci Robot*, 2017, 2: 5074
- 12 Yang G Z, Nelson B J, Murphy R R, et al. Combating COVID-19—the role of robotics in managing public health and infectious diseases. *Sci Robot*, 2020, 5: 5589
- 13 Snyder T J, Kazerooni H. A novel material handling system. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996. 2: 1147–1152
- 14 Sakai S, Iida M, Umeda M. Heavy material handling manipulator for agricultural robot. In: *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2002. 1: 1062–1068
- 15 Gambao E, Hernando M, Surdilovic D. A new generation of collaborative robots for material handling. In: *Proceedings of International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2012
- 16 Wan J F, Tang S L, Hua Q S, et al. Context-aware cloud robotics for material handling in cognitive industrial Internet of things. *IEEE Int Things J*, 2018, 5: 2272–2281
- 17 Azizi A, Yazdi P G, Humairi A A, et al. Design and fabrication of intelligent material handling system in modern manufacturing with industry 4.0 approaches. *Int Robot Autom J*, 2015, 4: 186–195

- 18 Papazov C, Haddadin S, Parusel S, et al. Rigid 3D geometry matching for grasping of known objects in cluttered scenes. *Int J Robot Res*, 2012, 31: 538–553
- 19 Shi Y, Fang J, Weng Z Y. Research on kinematic parameter calibration of handling robot. In: *Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, 2017. 224–228
- 20 Liu Z Y, Zhao B, Zhu H B. Research of sorting technology based on industrial robot of machine vision. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Computational Intelligence and Design*, 2012. 1: 57–61
- 21 Wang J W, Zhang X W, Dou H Z, et al. Study on the target recognition and location technology of industrial sorting robot based on machine vision. *J Robot Netw Artif Life*, 2014, 1: 108–110
- 22 Gürel S, Gultekin H, Akhlaghi V E. Energy conscious scheduling of a material handling robot in a manufacturing cell. *Robot Comput-Integr Manuf*, 2019, 58: 97–108
- 23 Takahashi M, Suzuki T, Shitamoto H, et al. Developing a mobile robot for transport applications in the hospital domain. *Robot Auton Syst*, 2010, 58: 889–899
- 24 Jeon S, Lee J, Kim J. Multi-robot task allocation for real-time hospital logistics. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2017. 2465–2470
- 25 Huang G S, Lu Y J. To build a smart unmanned restaurant with multi-mobile robots. In: *Proceedings of International Automatic Control Conference (CACS)*, 2017
- 26 Antony A, Sivraj P. Food delivery automation in restaurants using collaborative robotics. In: *Proceedings of International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 2018. 111–117
- 27 Yuan Z H, Yuan J J, Yang B J, et al. Design and implementation of an unmanned express delivery vehicle. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*, 2019. 336–341
- 28 Shatalov M, Lunev A, Hu X B, et al. Efficient UV emitters for sensing and disinfection. In: *Proceedings of Conference on Lasers and Electro Optics*, 2012
- 29 Mathebula T, Leuschner F W, Chowdhury S P. The use of UVC-LEDs for the disinfection of mycobacterium tuberculosis. In: *Proceedings of IEEE PES/IAS PowerAfrica*, 2018. 739–744
- 30 Chanprakon P, Saeoung T, Treebupachatsakul T, et al. An ultra-violet sterilization robot for disinfection. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, 2019
- 31 Passaretti C L, Otter J A, Reich N G, et al. An evaluation of environmental decontamination with hydrogen peroxide vapor for reducing the risk of patient acquisition of multidrug-resistant organisms. *Clin Infect Dis*, 2013, 56: 27–35
- 32 Okkesim S, Manav T. Evaluation of hydrogen peroxide vaporizing technique for environmental disinfection. In: *Proceedings of Medical Technologies National Conference (TIPTTEKNO)*, 2015
- 33 Chen P, Mitsutake S, Isoda T, et al. Omni-directional robot and adaptive control method for off-road running. *IEEE Trans Robot Autom*, 2002, 18: 251–256
- 34 Sheng W H, Chen H J, Xi N. Navigating a miniature crawler robot for engineered structure inspection. *IEEE Trans Autom Sci Eng*, 2008, 5: 368–373
- 35 Salcudean S E, Bell G, Bachmann S, et al. Robot-assisted diagnostic ultrasound-design and feasibility experiments. In: *Proceedings of International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 1999. 1062–1071
- 36 Koizumi N, Tsukihara H, Takamoto S, et al. Robot vision technology for technologizing and digitalization of medical diagnostic and therapeutic skills. *Int J Autom Technol*, 2009, 3: 541–550
- 37 Kobayashi T, Miyazaki T, Arai K. Dementia diagnosis system using social media agency robot. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network (ICMU)*, 2018
- 38 Kokot M, Petric F, Cepanec M, et al. Classification of child vocal behavior for a robot-assisted autism diagnostic protocol. In: *Proceedings of the 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2018
- 39 Gombolay M, Yang X J, Hayes B, et al. Robotic assistance in the coordination of patient care. *Int J Robot Res*, 2018, 37: 1300–1316
- 40 Zukowski M, Matus K, Pawluczuk E, et al. Patients temperature measurement system for medical robotic assistant. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Chemistry, Chemical Process and Engineering*, 2018. 2029: 020084
- 41 Yang G Z, Cambias J, Cleary K, et al. Medical robotics-regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy. *Sci Robot*, 2017, 2: 8638

- 42 Butner S E, Ghodoussi M. Transforming a surgical robot for human telesurgery. *IEEE Trans Robot Autom*, 2003, 19: 818–824
- 43 Zinchenko K, Wu C Y, Song K T. A study on speech recognition control for a surgical robot. *IEEE Trans Ind Inf*, 2017, 13: 607–615
- 44 Li J, de Ávila B E F, Gao W, et al. Micro/nanorobots for biomedicine: delivery, surgery, sensing, and detoxification. *Sci Robot*, 2017, 2: 6431
- 45 Hou Z G, Zhao X G, Cheng L, et al. Recent advances in rehabilitation robots and intelligent assistance systems. *Acta Autom Sin*, 2016, 42: 1765–1779 [侯增广, 赵新刚, 程龙, 等. 康复机器人与智能辅助系统的研究进展. *自动化学报*, 2016, 42: 1765–1779]
- 46 Yang G Z, Riener R, Dario P. To integrate and to empower: robots for rehabilitation and assistance. *Sci Robot*, 2017, 2: 5593
- 47 Kruse E, Wahl F M. Camera-based monitoring system for mobile robot guidance. In: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1998. 2: 1248–1253
- 48 Chang C C, Song K T. Ultrasonic sensor data integration and its application to environment perception. *J Robot Syst*, 1996, 13: 663–677
- 49 Hinkel R, Knieriemen T. Environment perception with a laser radar in a fast moving robot. *IFAC Proc Volumes*, 1988, 21: 271–277
- 50 Wu Y G, Yang J Y, Liu K. Obstacle detection and environment modeling based on multisensor fusion for robot navigation. *Artif Intell Eng*, 1996, 10: 323–333
- 51 Seminara L, Gastaldo P, Watt S J, et al. Active haptic perception in robots: a review. *Front Neurorobot*, 2019, 13: 53
- 52 Xie Y X, Tian J J, Zhu X X. A review of point cloud semantic segmentation. 2019. ArXiv:1908.08854
- 53 Che E, Jung J, Olsen M. Object recognition, segmentation, and classification of mobile laser scanning point clouds: a state of the art review. *Sensors*, 2019, 19: 810
- 54 Shrestha A, Mahmood A. Review of deep learning algorithms and architectures. *IEEE Access*, 2019, 7: 53040–53065
- 55 Wang L, Li R F, Shi H Z, et al. Multi-channel convolutional neural network based 3D object detection for indoor robot environmental perception. *Sensors*, 2019, 19: 893
- 56 Zhang J H, Liu R Y, Yin K J, et al. Intelligent collaborative localization among air-ground robots for industrial environment perception. *IEEE Trans Ind Electron*, 2019, 66: 9673–9681
- 57 Valentini G, Brambilla D, Hamann H, et al. Collective perception of environmental features in a robot swarm. In: *Proceedings of International Conference on Swarm Intelligence*, 2016. 65–76
- 58 Shi Q, Li C, Wang C B, et al. Design and implementation of an omnidirectional vision system for robot perception. *Mechatronics*, 2017, 41: 58–66
- 59 Rouveure R, Faure P, Monod M O. Description and experimental results of a panoramic K-band radar dedicated to perception in mobile robotics applications. *J Field Robot*, 2018, 35: 678–704
- 60 Wang L, Zhao L J, Huo G L, et al. Visual semantic navigation based on deep learning for indoor mobile robots. *Complexity*, 2018, 2018: 1–12
- 61 Belter D, Labecki P, Fankhauser P, et al. RGB-D terrain perception and dense mapping for legged robots. *Int J Appl Math Comput Sci*, 2016, 26: 81–97
- 62 Saeedi S, Trentini M, Seto M, et al. Multiple-robot simultaneous localization and mapping: a review. *J Field Robot*, 2016, 33: 3–46
- 63 Ma Y Y, Ye Z H, Liu K H, et al. Event-based visual localization and mapping algorithms: a survey. *Acta Autom Sin*, 2020, 46: 1–11 [马艳阳, 叶梓豪, 刘坤华, 等. 基于事件相机的定位与建图算法: 综述. *自动化学报*, 2020, 46: 1–11]
- 64 Ding W D, Xu D, Liu X L, et al. Review on visual odometry for mobile robots. *Acta Autom Sin*, 2018, 44: 385–400 [丁文东, 徐德, 刘希龙, 等. 移动机器人视觉里程计综述. *自动化学报*, 2018, 44: 385–400]
- 65 Shen M Q, Wang Y Y, Jiang Y D, et al. A new positioning method based on multiple ultrasonic sensors for autonomous mobile robot. *Sensors*, 2020, 20: 17
- 66 Fan Q G, Sun B W, Sun Y, et al. Data fusion for indoor mobile robot positioning based on tightly coupled INS/UWB. *J Nav*, 2017, 70: 1079–1097
- 67 Liu Z X, Xie C X, Xie M, et al. Mobile robot positioning method based on multi-sensor information fusion laser

- SLAM. *Cluster Comput*, 2019, 22: 5055–5061
- 68 Park J, Kim J Y, Kim B, et al. Global map generation using LiDAR and stereo camera for initial positioning of mobile robot. In: *Proceedings of International Conference on Information and Communication Technology Robotics (ICT-ROBOT)*, 2018
- 69 An J, Lee J. Robust positioning and navigation of a mobile robot in an urban environment using a motion estimator. *Robotica*, 2019, 37: 1320–1331
- 70 Gao M J, Yu M, Guo H, et al. Mobile robot indoor positioning based on a combination of visual and inertial sensors. *Sensors*, 2019, 19: 1773
- 71 Yang G C, Chen Z J, Li Y, et al. Rapid relocation method for mobile robot based on improved ORB-SLAM2 algorithm. *Remote Sens*, 2019, 11: 149
- 72 Wang Y, Li Z J, Su C Y. RGB-D sensor-based visual SLAM for localization and navigation of indoor mobile robot. In: *Proceedings of International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*, 2016. 82–87
- 73 Zafar M N, Mohanta J C. Methodology for path planning and optimization of mobile robots: a review. *Procedia Comput Sci*, 2018, 133: 141–152
- 74 Song B Y, Wang Z D, Zou L, et al. A new approach to smooth global path planning of mobile robots with kinematic constraints. *Int J Mach Learn Cyber*, 2019, 10: 107–119
- 75 Sombolestan S M, Rasooli A, Khodaygan S. Optimal path-planning for mobile robots to find a hidden target in an unknown environment based on machine learning. *J Ambient Intell Human Comput*, 2019, 10: 1841–1850
- 76 Jiang J X, Xin J B. Path planning of a mobile robot in a free-space environment using Q-learning. *Prog Artif Intell*, 2019, 8: 133–142
- 77 Lima J, Costa P, Costa P, et al. A* search algorithm optimization path planning in mobile robots scenarios. *AIP Conf Proc*, 2019, 2116: 220005
- 78 Low E S, Ong P, Cheah K C. Solving the optimal path planning of a mobile robot using improved Q-learning. *Robot Auton Syst*, 2019, 115: 143–161
- 79 Orozco-Rosas U, Montiel O, Sepúlveda R. Mobile robot path planning using membrane evolutionary artificial potential field. *Appl Soft Comput*, 2019, 77: 236–251
- 80 Saeed R A, Recupero D R, Remagnino P. A boundary node method for path planning of mobile robots. *Robot Auton Syst*, 2020, 123: 103320
- 81 Wu Q, Lin H, Jin Y Z, et al. A new fallback beetle antennae search algorithm for path planning of mobile robots with collision-free capability. *Soft Comput*, 2020, 24: 2369–2380
- 82 You X H, Pan Z W, Gao X Q, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques. *Sci Sin Inform*, 2014, 44: 551–563 [尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44: 551–563]
- 83 You X H, Zhang C, Tan X S, et al. AI for 5G: research directions and paradigms. *Sci Sin Inform*, 2018, 48: 1589–1602 [尤肖虎, 张川, 谈晓思, 等. 基于 AI 的 5G 技术 —— 研究方向与范例. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48: 1589–1602]
- 84 Zhao Y J, Yu G H, Xu H Q. 6G mobile communication networks: vision, challenges, and key technologies. *Sci Sin Inform*, 2019, 49: 963–987 [赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49: 963–987]
- 85 Hetzer D, Muehleisen M, Kousaridas A, et al. 5G connected and automated driving: use cases and technologies in cross-border environments. In: *Proceedings of European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 2019. 78–82
- 86 Chen M, Yang J, Zhou J H, et al. 5G-smart diabetes: toward personalized diabetes diagnosis with healthcare big data clouds. *IEEE Commun Mag*, 2018, 56: 16–23
- 87 Ahad A, Tahir M, Yau K L A. 5G-based smart healthcare network: architecture, taxonomy, challenges and future research directions. *IEEE Access*, 2019, 7: 100747
- 88 Saxena N, Roy A, Kim H S. Efficient 5G small cell planning with eMBMS for optimal demand response in smart grids. *IEEE Trans Ind Inf*, 2017, 13: 1471–1481
- 89 Annusewicz A. The use of vision systems in the autonomous control of mobile robots equipped with a manipulator. *Transpation Res Procedia*, 2019, 40: 132–135
- 90 Saadatmand S, Azizi S, Kavousi M, et al. Autonomous control of a line follower robot using a Q-learning controller.

- In: Proceedings of the 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), 2020. 556–561
- 91 Hafez O A, Arana G D, Spenko M. Integrity risk-based model predictive control for mobile robots. In: Proceedings of International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2019. 5793–5799
 - 92 Park T, Jeong C, Lee J, et al. Design of special end effectors for first aid robot. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR), 2017. 179–180
 - 93 Park T, Jeong C, Lee I, et al. Design of a coupling/decoupling mechanism of end effector for a first aid robot's injection function. *Int J Control Autom Syst*, 2019, 17: 2574–2585
 - 94 Yang G Z, Bellingham J, Dupont P E, et al. The grand challenges of science robotics. *Sci Robot*, 2018, 3: 7650
 - 95 Cao F K, Zhuang Y, Yan F, et al. Long-term autonomous environment adaptation of mobile robots: state-of-the-art methods and prospects. *Acta Autom Sin*, 2020, 46: 205–221 [曹风魁, 庄严, 闫飞, 等. 移动机器人长期自主环境适应研究进展和展望. *自动化学报*, 2020, 46: 205–221]
 - 96 Fan J J, Tian F, Du Y, et al. Thoughts on human-computer interaction in the age of artificial intelligence. *Sci Sin Inform*, 2018, 48: 361–375 [范俊君, 田丰, 杜一, 等. 智能时代人机交互的一些思考. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48: 361–375]

Research on intelligent robot systems for emergency prevention and control of major pandemics

Hui ZHANG^{1,2*}, Yaonan WANG^{1,2*}, Junfei YI², Hang ZHONG², Li LIU²,
Zhiqiang MIAO² & Yiming JIANG²

1. School of Robotics, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. National Engineering Laboratory for Robot Visual Perception and Control Technology, Hunan University, Changsha 410082, China

* Corresponding author. E-mail: zhanghuihy@126.com, yaonan@hnu.edu.cn

Abstract In recent years, SARS virus, MERS coronavirus, and other global pandemics have occurred frequently. The outbreak of COVID-19 has caused more than 3.7 million infected people and 260000 deaths over 210 countries around the world from December 2019 to May 7, 2020, which has seriously affected the safety of people, the stability of social order, and the development of the economy. Therefore, it is urgent to explore and implement new prevention and control programs for such major pandemics. With the development of robots and artificial intelligence technologies, various intelligent robots for emergency prevention and control in complex conditions have emerged, and they have played paramount roles in disease prevention and control, diagnosis, treatment, and nursing. Based on the problems of insufficient supply of materials and heavy disinfection tasks during the prevention and control of major outbreaks, we study the systematic procedures and applications of medical material handling robots, multi-scene disinfection robots, medical assistant robots, prevention and control robots, and production resumption robots. Moreover, we comparatively analyze the current situation of key technologies of pandemic emergency prevention and control robots, such as environmental perception, autonomous navigation, motion planning, and 5G communication technology. In conclusion, we put forward a technical prospect of intelligent robot systems for emergency prevention and control of major pandemics.

Keywords emergency prevention and control, outbreak robot, environment awareness, autonomous navigation, motion planning, 5G communication technology

Hui ZHANG was born in 1983. He received his Ph.D. degree in pattern recognition and intelligent system from Hunan University. He is a professor at the School of Robotics, Hunan University, Changsha, China. His research interests include machine vision, robot control, deep learning, and defect detection.

Yaonan WANG was born in 1957. He received his Ph.D. degree in pattern recognition and intelligent system from Hunan University. He is a professor at the School of Robotics, Hunan University, Changsha, China. He is a member of the Chinese Academy of Engineering. His research interests include robotics and image processing.

Junfei YI was born in 1997. He received his B.Sc. degree from Xi'an University of Posts and Telecommunications, in 2018. Currently, he is a graduate student. His research interests include robot perception technology and visual image processing technology.

Hang ZHONG was born in 1990. He received his M.S., B.S., and Ph.D. degrees in automation from College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, China. Currently, he is a postdoctoral researcher at Hunan University. His current research interests include robotics modeling and control, visual servo control, and path planning of aerial robots.