

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.220162

北京 2022 年冬奥会和冬残奥会火炬传递机器人

田启岩^{1,2}, 李 硕^{1,2}, 杨丽英^{1,2}, 邵士亮^{1,2}, 张 弼^{1,2}, 高 岳³, 帅 梅⁴

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169;
3. 上海交通大学人工智能研究院人工智能教育部重点实验室, 上海 200240;
4. 北京大艾机器人科技有限公司, 北京 100176)

摘要: 面向北京冬奥会对机器人跨域火炬传递的需求, 研发水陆两栖机器人、水下变结构机器人、空中飞行机器人、地面机器人、冰雪面六足机器人和助力外骨骼机器人等 6 型面向火炬接力的系列机器人, 利用这些机器人可在地面、空中和水下完成火炬传递。最终, 根据北京 2022 年冬奥会火炬接力路线方案的调整, 将水陆两栖机器人、水下变结构机器人和特种火炬应用于北京 2022 年冬奥会火炬传递活动中, 实现了奥运史上首次机器人与机器人之间的水下火炬传递; 助力外骨骼机器人应用于北京 2022 年冬残奥会火炬传递活动中, 残疾人代表使用下肢助力外骨骼进行了火种汇集, 两位残疾人火炬手分别借助上肢和下肢助力外骨骼机器人一起进行了火炬传递, 传递出“科技改变生活”的理念, 体现出“技术温暖人心”的精神。

关键词: 北京冬奥会和冬残奥会; 火炬传递机器人; 跨域协同; 机器人间接传递

中图分类号: TP249

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2022)-05-0513-09

Robots in Torch Relay at the Beijing 2022 Olympic and Paralympic Winter Games

TIAN Qiyang^{1,2}, LI Shuo^{1,2}, YANG Liying^{1,2}, SHAO Shiliang^{1,2}, ZHANG Bi^{1,2}, GAO Yue³,
SHUAI Mei⁴

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;
3. MoE Key Lab of Artificial Intelligence and AI Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
4. Beijing AI-Robotics Technology Co., Ltd, Beijing 100176, China)

Abstract: To meet the requirements of the multi-robot cross-domain torch relay at the Beijing Olympic Winter Games, 6 types of robots are developed for torch relay, including amphibious robot (AR), underwater variable structure robot (VSR), unmanned aerial vehicle (UAV), unmanned ground vehicle (UGV), six-legged robot (SR) and exoskeleton robots (ER). Based on these robots, the torch relay on the ground, in the air and underwater can be realized respectively. According to the adjustment of torch relay route plan at the Beijing 2022 Olympic and Paralympic Winter Games, AR, VSR and specific underwater torch are successfully applied to the underwater torch relay at the Beijing 2022 Olympic Winter Games, realizing the first underwater torch relay between robots in the history of the Olympic Games. ERs are used in torch relay at the Beijing 2022 Paralympic Winter Games. The representative of the disabled used ER at the allspark gathering ceremony, and two disabled torchbearers completed the torch relay using the upper and lower limb ERs respectively. This activity conveys the concept of “technology changes life” and reflects the spirit of “technology warms people’s hearts”.

Keywords: Beijing Olympic and Paralympic Winter Games; robot in torch relay; cross-domain collaboration; torch relay between robots

1 引言 (Introduction)

北京冬奥会、冬残奥会成功举办, 成为新冠疫情发生以来首个如期举办的全球综合性体育盛会, 全面兑现了对国际社会的庄严承诺, 向世界奉献了一届简约、安全、精彩的奥运盛会, 展示了在疫情

下奥林匹克运动的强大生命力, 为人类战胜各种风险挑战提供了信心、希望和力量^[1]。其中一系列新技术的运用, 为北京冬奥会、冬残奥会的成功举办提供了强大助力^[2]。科技助力下的智慧冬奥会, 让世人看到不一样的冬奥会。

在奥运会中, 火炬接力是不可缺少的重要环

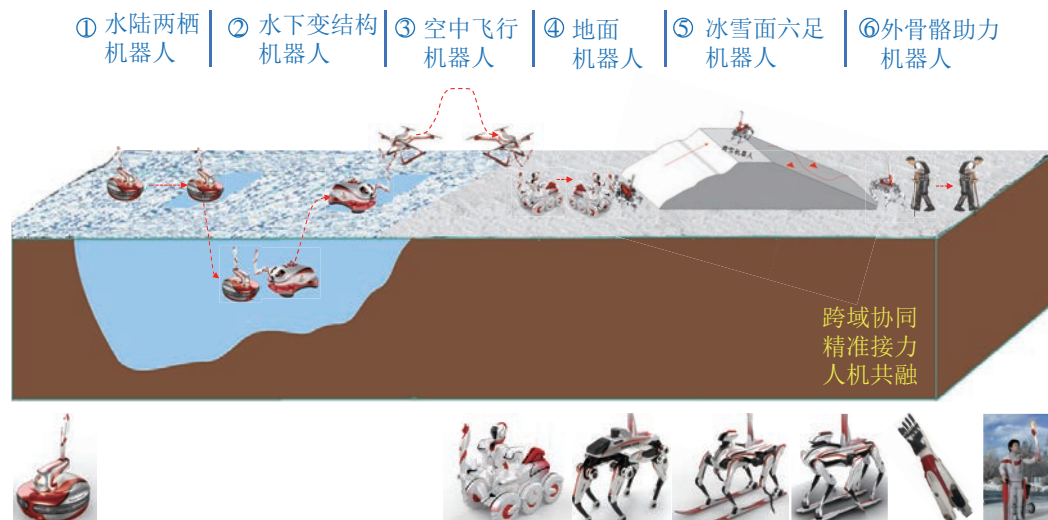


图1 多机器人跨域火炬传递场景

Fig.1 Multi-robot cross-domain torch relay scenario

节，不仅见证了奥林匹克运动的发展，也见证了人类科技、文明与智慧的进步，能够彰显出奥运与科技的结合。2000年悉尼夏季奥运会，奥运圣火首次照亮水下；2008年北京夏季奥运会，奥运圣火在世界之巅珠穆朗玛峰进行传递；2014年索契冬季奥运会，在贝加尔湖完成了人与人之间的水下火炬传递；2018年平昌冬季奥运会，将机器人加入到火炬接力过程，实现了人与机器人之间的火炬传递。

机器人的研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志，以机器人这样一个高技术集成度的领域作为结合点进行火炬接力，将科技元素融入到火炬传递中，能够展现出科技冬奥的内涵。当前，机器人在环境适应、感知认知、人机融合和协同控制等方面的能力不断提升，形成了未来机器人智能化重要的发展方向，即机器人与作业环境、机器人之间以及机器人与机器人之间的共融^[3]。

2 火炬传递机器人 (Robots in torch relay)

围绕北京科技冬奥对机器人跨域火炬传递的需求，研发了水陆两栖机器人、水下变结构机器人、空中飞行机器人、地面机器人、冰雪面六足机器人和助力外骨骼机器人等6型面向火炬接力的系列机器人。在北京冬奥会火炬传递方案确定前，全系统的作业场景为：水陆两栖机器人由冰面入水，将火炬传于水下变结构机器人，经过水下航行、冰洞口上浮将火炬传递到水面之上，空中飞行机器人接棒火炬传于地面机器人，而后冰雪面六足机器人接力进行冰山攀爬和冰雪面滑行，最后由助力外骨骼机器人辅助残疾人火炬手完成火炬传递，如图1所

示。

这些机器人以地面、水下、空中、冰雪面跨域协同的火炬接力方式，展示我国机器人科技水平，为北京冬奥会提供高质量的科技供给，充分展示我国机器人领域的科技水平与技术进步^[4]。各机器人主要技术指标如表1所示。

2.1 水陆两栖机器人

水陆两栖机器人外形采用仿冰壶形状，将冬奥文化与现代科技融合，主要由机器人载体、机械臂系统、火炬系统、全向轮系统、视觉探测系统、导航系统等组成，如图2所示。水陆两栖机器人突破复合式驱动结构设计、冰面/水下运动模式切换等关键技术，实现冰面与水下的跨介质高适应性控制。开发出水陆两栖复合式驱动装置，设计多运动模式控制方法，通过不同运动模式的自动切换，实现冰面与水下的高适应性运动，支持冰面—水下跨介质火炬传递。水陆两栖机器人在冰面上采用滑行

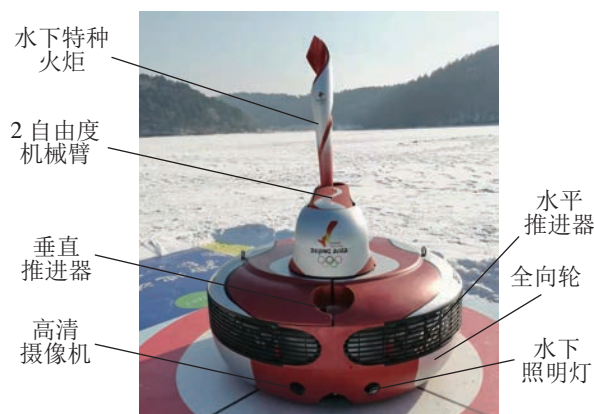


图2 水陆两栖机器人及系统组成

Fig.2 AR and its system composition

表 1 火炬传递机器人主要技术指标

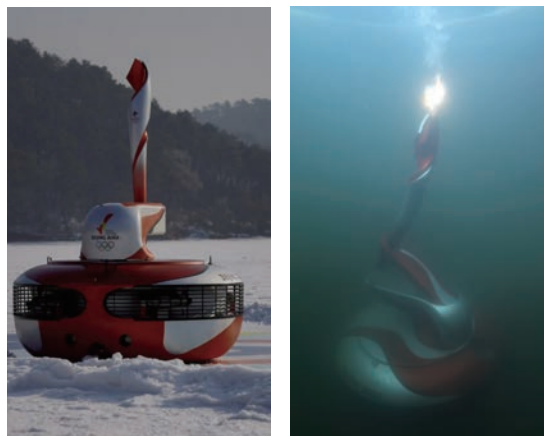
Tab.1 Main technical indicators of the robots in torch relay

机器人	技术指标	技术参数
水陆两栖机器人	负载作业能力	不小于 3 kg
	地面移动速度	不小于 5 km/h
	水下最大航速	不小于 2 kn
	最大设计水深	不小于 50 m
水下变结构机器人	负载作业能力	不小于 3 kg
	水下最大航速	不小于 2 kn
	最大设计水深	不小于 50 m
空中飞行机器人	飞行高速	不小于 300 m
	续航时间	不小于 20 min
	负载质量	不小于 2 kg
	抗风能力	不小于 5 级
	工作温度	-40~40°C
地面机器人	移动速度	不小于 10 km/h
	爬坡能力	不小于 30°
	垂直越障能力	不小于 0.2 m
冰雪面六足机器人	机械臂负载能力	不小于 2 kg
	滑雪机器人室外运动能力	室外 20° 以内倾斜雪面启动、滑行、转弯与制动
	滑冰机器人冰面滑行能力	户外冰面自主滑行
冰攀爬机器人	滑冰机器人最大滑冰速度	不小于 8 m/s
	冰山攀爬机器人最大冰山爬坡角度	不小于 30°
上肢助力外骨骼机器人	质量	不大于 3 kg
	主动自由度	不小于 10 个
	运动意图识别准确率	不小于 98%
下肢助力外骨骼机器人	主动操控任务完成率	不小于 95%
	质量	不大于 20 kg
	主动自由度	不小于 4 个
水下变结构机器人	运动意图识别准确率	不小于 95%
	主动操控任务完成率	不小于 92%

模式, 通过无线电和无线网桥进行通信, 通过自身搭载的小型化高精度差分 GPS 结合电子罗盘实时调整位置航向; 从冰面入水后, 切换到水中航行模式, 利用预编程方式实现水中下潜和稳定悬停, 采用多普勒计程仪、TCM 电子罗盘与深度计的组合导航单元, 为水陆两栖机器人提供水下的航向角、姿态角、3 维线速度、3 维角速度等信息。

针对冰面灵活滑行运动, 研发了冗余低硬度白橡胶高摩擦全向轮运动系统, 开发了滑行控制算法, 补偿冰面打滑, 实现冰面低温低摩擦环境下的

全向运动, 如图 3(a) 所示; 针对水面下潜与水下定点悬停控制^[5], 研究了浮游基座—机械手协调机制, 开发了两栖机器人动力定位算法, 降低随机运动造成的控制干扰, 实现稳定的水下定点悬停, 支持水下火炬对接传递, 如图 3(b) 所示。



(a) 冰面滑行试验 (b) 水下悬停试验

图 3 水陆两栖机器人冰面滑行与水下悬停试验

Fig.3 Ice gliding and underwater hovering experiment of AR

2.2 水下变结构机器人

水下变结构机器人采用水下可变形设计, 具有高效航行和稳定作业两种工作模式, 如图 4 所示。为保证高效航行模式下的水动力性能, 机械臂手持水下特种火炬置于载体内部, 采用流线形水下低阻外形设计, 推进器的布局设计可确保水下航行的机动性, 并实现悬停作业、姿态控制和上浮下潜; 机器人利用电动缸配合剪叉升降机构实现载体上下分离, 改变自身形态, 增大水下变结构机器人的稳心高度, 切换到稳定作业模式, 具备一体化探测作业能力。水下变结构机器人突破了复杂流场扰动的水下动态对准、水下机器人—机械臂厘米级精准作业等技术, 支持水下火炬对接传递。



图 4 水下变结构机器人作业模式

Fig.4 Operation modes of the underwater VSR

水下变结构机器人主要由水面操控分系统和水下分系统组成, 水下部分主要包括机器人载体、水

下作业单元和水下控制单元,其中载体是指水下变结构机器人的主体结构框架、水下变结构装置、浮力材料单元、动力推进单元和电池能源单元,如图5所示。水下作业单元包括水中中性机械臂、水下气体火炬载荷以及作业用照明灯/摄像机等,水下控制单元包括载体航行与设备控制单元、导航定位单元与通信设备等。



图5 水下变结构机器人系统组成

Fig.5 System composition of the underwater VSR

水下变结构机器人具备水下光通信和有缆光纤通信两种通信模式,支持水下变结构机器人的主从遥控作业。其中,水下光通信在水质衰减系数 $C \leq 0.1 \text{ m}^{-1}$ 的条件下可实现 100 m 的通信距离,随着水质衰减系数的增大,通信距离逐渐减小。水下变结构机器人以导航控制计算机为导航数据处理中心,数据融合光纤陀螺仪测量的姿态、压力计测量的深度压力、多普勒计程仪 DVL 测量的对底速度,获得水下高精度的位置估计。

针对水下变结构机器人动态对准控制,设计基于扰动预测的运动控制方法,克服野外环境复杂流场扰动和大机械手对机器人本体的控制扰动,实现对接过程中的高精度动力定位、高分辨率位置机动和水下机器人—机械臂精准悬停作业;为实现冰下航行与洞口上浮,融合光纤陀螺、深度计和多普勒计程仪,获得冰下高精度位置估计,在最大水深 2.8 m 的莲石湖野外浅水复杂流场环境下,导引水下变结构机器人完成基于动力定位的火炬对接、冰下航行和洞口上浮,如图6所示。

2.3 空中飞行机器人

空中飞行机器人同时具备“手”“眼”功能,针对旋翼近地效应、飞行机器人和机械臂间的耦合作用等难点,突破近地面/水面环境主动作业控制等技术,具备野外环境自主识别定位火炬并完成精准火炬接力的能力。

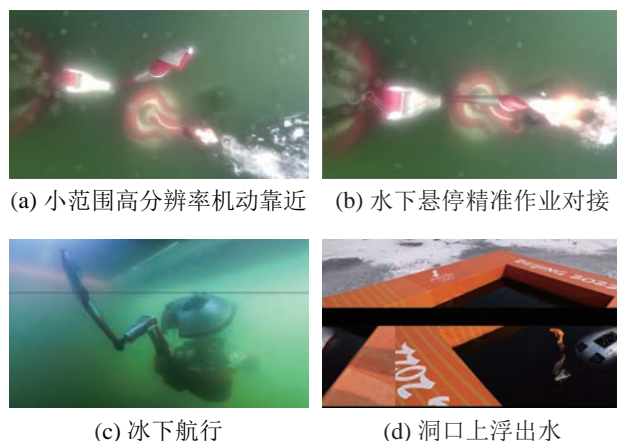


图6 水下变结构机器人外场试验

Fig.6 Field test of the underwater VSR

空中飞行机器人主要由飞行平台本体飞行控制系统、轻质机械臂系统和目标识别定位系统组成,如图7所示。其中,带有超稳定鲁棒控制器的飞行平台能够在近地扰流和机械臂扰动下完成精准稳定的悬停^[6],近红外视觉系统能够准确捕捉到冰面火炬并识别燃烧状态,搭载的多自由度机械臂通过“机臂协同”和“手眼协同”完成高精度伺服作业^[7],舱内的主动热平衡系统保证了空中飞行机器人在超低温环境下保持舱内器件工作温度恒定。



图7 空中飞行机器人及系统组成

Fig.7 UAV and its system composition

空中飞行机器人集成了无线通信设备,向外传递飞行控制系统内部信息,同时接收上层遥控指令信号。此外,空中飞行机器人集成了导航所需要的传感器(如磁罗盘、加速度计、陀螺仪等)和芯片,通过导航算法在线估计空中飞行机器人的位置、高度、速度、姿态等信息,并把这些信息提供给控制算法模块,用于空中飞行机器人的姿态控制和航迹跟踪飞行控制。

此外,空中飞行机器人在外形上融合了诸多冬奥元素:整机构形的设计理念源自冬奥会跳台滑雪“空中飞行”的动作造型,机身构形源自国家速滑

馆“冰丝带”,起落架构形源自滑雪项目的双板滑雪板,兼具科技时尚感。

2.4 地面机器人

地面机器人结合了轮式移动平台和仿人双臂结构,主要由移动平台、双臂主从作业系统、监控平台、通讯系统、环境感知与定位系统等部分组成,见图8,可实现自主导航定位、机械臂火炬开关开启与接力。突破了环境感知与自主导航、双机械臂精细作业等技术,具有多模态传感信息融合和环境感知、地形高通过性与复杂任务精细作业能力。



图8 地面机器人及系统组成
Fig.8 UGV and its system composition

地面机器人的下半身采用了六轮全地形移动平台,可以自适应多种野外地形环境,包括沙地、草地、雪地、斜坡、台阶、沟壑等复杂地形。为了更好地契合奥运人文理念,地面机器人的上半身采用了仿人型结构,躯干部分有2个自由度,每个手臂有分别有7个自由度,可以做出和人一样的肢体动作,机械臂由一体化关节构成,双机械臂具有协同作业功能^[8];机械臂末端配有标准作业工具,可夹持火炬等。地面机器人的头部具有俯仰和回转2个自由度,可快速灵活转动。同时,头部还配有双目立体视觉传感器,操作者可以在远程实时获取现场的沉浸感立体画面。地面机器人内部集成了无线通信设备,机载端通信设备与地面机器人图像采集摄像头连接,接收摄像头视频数据并通过无线方式实现与控制地面站的通信。此外,还配备了机器视觉、惯性导航、激光雷达等传感器,通过多模态融合环境感知可以在线创建机器人行驶区域的环境地图,并基于全局和局部地图信息,实现机器人动态路径自主规划^[9]。

2.5 冰雪面六足机器人

冰雪面六足机器人包括滑雪、滑冰和冰山攀爬共3款六足机器人。突破了冰雪环境高适应性运动

与控制技术,实时辨识机器人足—地接触刚度,优化了整机稳定性,开发了抗干扰全身力控制算法,克服冰雪环境摩擦力小、运动及地形变化产生冲击力/力矩等问题,保持运动的稳定平衡。其中,滑雪机器人具备快速前进、转弯和制动功能,滑冰机器人具备控制冰刀实现加减速、转弯和制动的功能,冰山攀爬机器人具备稳定和防滑功能。

冰雪面六足机器人搭载多种传感器及辅助作业装置,包括激光雷达、深度相机、6维力传感器等。通过集成力传感器,提供高精度的力感知功能和反向驱动能力,是实现冰雪面六足机器人快速稳定控制的前提。其智能感知系统集成了视觉系统传感器(或陀螺仪)以及激光雷达,采用融合优化算法实现精确定位与地图构建,利用全局定位结合IMU(惯性测量单元)感知信息获取机器人在全局地图中的位姿,从而构建统一地图,实现机器人在非结构环境下的精确导航定位与姿态辨识建模。冰雪面六足机器人针对不同的使用场景采用不同的通信方式:较短距离(50 m内)的操作使用WiFi,在空旷无遮挡的中距离(视距无遮挡在2 km内)使用无线电,在远距离环境使用4G/5G通讯。

滑雪六足机器人采用左3—右3的布置方式,六足机器人可以在身体不停顿的情况下使用3-3步伐行走,能够实现行走稳定性与快速滑雪的统一。滑雪板通过运动关节连接在滑雪板的前、后两端。机器人采用犁式滑雪法,通过调整支撑腿姿态实现滑雪板立刃,通过调整重心左右位置实现转向控制,通过调整滑雪板夹角实现速度控制。中间腿单独安装滑雪杆,在行走时起支撑作用,在弯道滑雪时起辅助平衡作用,可实现倾斜冰雪路面的启动、滑行、转弯和制动。

滑雪六足机器人前后4条腿用于身体支撑,并连接于滑雪板上;中间2条腿用于蹬地,小腿设计为雪杖结构,如图9所示。滑雪六足机器人机体内装有计算机、控制器、IMU传感器和锂电池;滑雪六足机器人身体前端安装了视觉相机和雷达,用于识别旗门位置和自身位置并完成状态估计;机器人身体上部装有火炬固定器。

滑冰六足机器人6个腿部机构呈平行对称分布,其前后4条腿用于构成冰刀支撑面后,中间2条腿还能辅助机器人运动和保持平衡,使得机器人具有良好的运动能力,如图10所示。滑冰六足机器人每个腿部机构具有3个自由度,支撑冰刀在2个腿部机构的协助下实现空间3自由度的任意运动,再辅以中间腿部机构,六足机器人在滑冰应用上具有更好的表现能力,能实现滑冰六足机器人在

冰面上的启动、滑行、停止和转向等功能。



图 9 滑雪六足机器人
Fig.9 Six-legged skiing robot

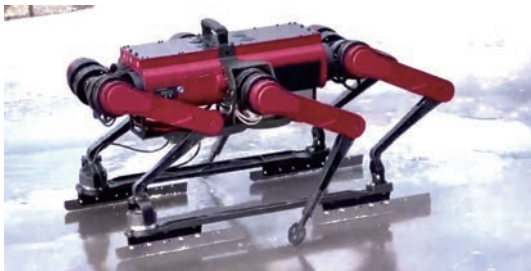


图 10 滑冰六足机器人
Fig.10 Six-legged skating robot

滑冰六足机器人平台上搭载了多种传感器及辅助作业装置,包括激光雷达、深度相机、6 维力传感器、火炬系统等。



图 11 冰山攀爬六足机器人
Fig.11 Six-legged iceberg climbing robot

冰山攀爬六足机器人大小腿采用并联四杆机构,与侧摆电机串联,形成单腿混联机构,单腿机构可实现前后翻以适应更复杂的地形,如图 11 所示。关节驱动装置采用自主研发的集成驱动单元,集成了电机、减速器、扭矩传感器、编码器,基于此可以实现高频响应动态主动柔顺控制。控制系统集成在身体内,冰山攀爬六足机器人身体上方安装有 GPS 导航系统及视觉传感系统。

冰山具有坡度大、摩擦小的特点,为实现冰山攀爬,六足机器人需要实时融合视觉、位姿和力等多种信息感知装置,克服攀爬过程中因坡度增大产生的重心后移,因地面起伏、加减速产生的冲击

力/力矩,维持六足机器人攀爬时的稳定平衡。根据坡度大小、稳定性要求对机器人站姿、步长、步频等步态参数进行匹配,基于步态参数实时生成行走步态轨迹,实时辨识地面冲击扰动并据此实时调整行走步态轨迹^[10]。

2.6 助力外骨骼机器人

助力外骨骼机器人包括上肢助力外骨骼和下肢助力外骨骼共 2 款机器人。

上肢助力外骨骼机器人主要由肘部转动关节、电源、主控单元、灵巧手 4 部分组成。上肢助力外骨骼机器人使用时只需在粘贴肌电电极后穿戴好即可,如图 12 所示。其中,肘部转动关节由无刷直流电机以及减速齿轮组构成,为提高电机的输出扭矩,电机与实际关节输出装置间使用 5 级减速齿轮组进行减速;机器人内置高密度肌电传感器采集受试者肌电信息;主控单元使用专属的主控板作为信息处理的上位机,用于完成信息的接收和处理。



图 12 上肢助力外骨骼机器人
Fig.12 The upper limb ER

上肢助力外骨骼机器人突破了人机神经接口技术,创新研制了贴合皮肤的多模态信息采集系统,能够准确解析受试者意念,实现残肢与上肢助力外骨骼机器人间的自然操控^[11];突破了残肢功能再造技术,实现了外骨骼拟人化设计,确保手臂具备精细操作和负重操作能力。

下肢助力外骨骼机器人是一种新型的基于工业控制技术的智能化康复设备,以多关节、多自由度、多速度的模式为下肢功能障碍患者提供主被动结合的康复训练,可高效促进下肢运动功能障碍患者康复^[12]。面向北京冬残奥会火种汇集和火炬传递的不同残疾人火炬手,分别采用 2 款不同的下肢助力外骨骼机器人,如图 13 所示。

图 13(a) 所示机器人主要针对参与火种汇集的运动能力不足的火炬手,下肢助力外骨骼机器人能够实时判断运动意图,根据地面特征和周边地形环境变化,提供匹配其自身能力的运动助力,帮助火

炬手激活肌肉力量和掌控步态姿势, 实现优雅自然的快速行走运动, 完成火种汇集活动。图 13(b) 所示机器人针对参与火炬传递的高位截瘫的残疾人火炬手, 量身定制双下肢式助力外骨骼机器人, 帮助火炬手借助双拐保持平衡, 从轮椅上站起来传递冬残奥会火炬。



(a) AI 下肢外骨骼机器人 (b) 智能下肢外骨骼机器人

图 13 下肢助力外骨骼机器人

Fig.13 The lower limb ER

3 北京冬奥会机器人火炬传递 (Torch relay between robots at Beijing the Winter Olympic Games)

基于以上面向火炬接力的系列机器人, 分别实现了地面、空中和水下的火炬传递。

面向地面火炬传递, 地面机器人通过激光雷达与 GPS 的定位获取与轨迹跟踪、地面机器人的头部视觉感知与机身位置调整、拟人多自由度机械臂的精准控制, 实现地面与水陆两栖机器人的地面火炬接力, 如图 14 所示。



图 14 机器人间地面火炬传递

Fig.14 The ground torch relay between robots

面向空中火炬传递, 空中飞行机器人针对悬停地效对旋翼升力产生的影响和机械臂与机器人耦合带来的扰动, 开发基于加速度反馈增强的飞控算法, 实现对接过程的稳定飞行和定位; 针对目标火炬位姿变化, 完成具备视觉伺服和强约束空间的机

械臂自适应规划与作业, 实现目标定位定姿与自主跟踪, 通过基于视觉引导的机械臂自主作业完成空中火炬传递; 在野外环境完成了空中飞行机器人起飞—目标粗定位—目标精准定位定姿—火炬对接—返航全自主对接流程, 实现了与水陆两栖机器人的空中火炬传递, 如图 15 所示。



图 15 机器人间空中火炬传递

Fig.15 The air torch relay between robots

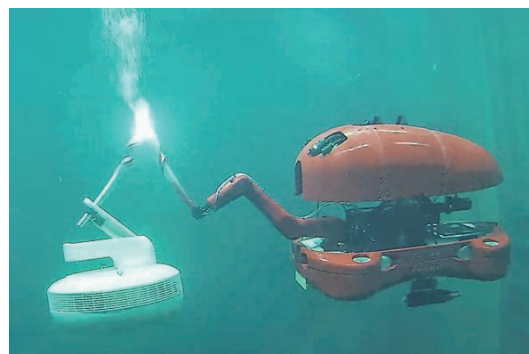


图 16 机器人间水下火炬传递

Fig.16 The underwater torch relay between robots

面向水下火炬传递, 设计了水陆两栖机器人与水下变结构机器人协同控制方法, 设计水陆两栖机器人动力定位算法, 降低其随机运动造成的控制干扰; 突破水下变结构机器人浮游基座—机械手协调控制技术, 以水陆两栖机器人水下定点悬停动力定位、水下变结构机器人主动动态对接、机械手主从遥控操作的方式, 保证水下火炬传递过程机器人运动控制的协同一致性, 完成了水陆两栖机器人与水下变结构机器人的水下火炬传递, 如图 16 所示。面向水下火炬传递, 设计了水陆两栖机器人与水下变结构机器人协同控制方法。首先, 水陆两栖机器人携带火种在冰洞口进行原地动力定位, 为变结构机器人提供火炬对接的动态稳定目标; 然后, 水下变结构机器人采用视线引导策略自动规划机器人和机械臂末端的目标位姿和速度; 最后, 水下变结构机器人以目标规划结果为控制输入, 在线辨识水流扰动, 提前补偿机械臂运动对浮游体的力矩干扰, 实现火炬自动对接的高精度协同控制。

在火炬传递过程中,变结构机器人根据两栖机器人的火炬姿态实时动态调整变结构机器人的位姿,图17是水下火炬传递过程中机器人纵倾角、横滚角的动态跟踪控制曲线,纵倾角动态跟踪误差的标准差优于 0.3° ,横滚角动态跟踪误差标准差优于 0.2° 。

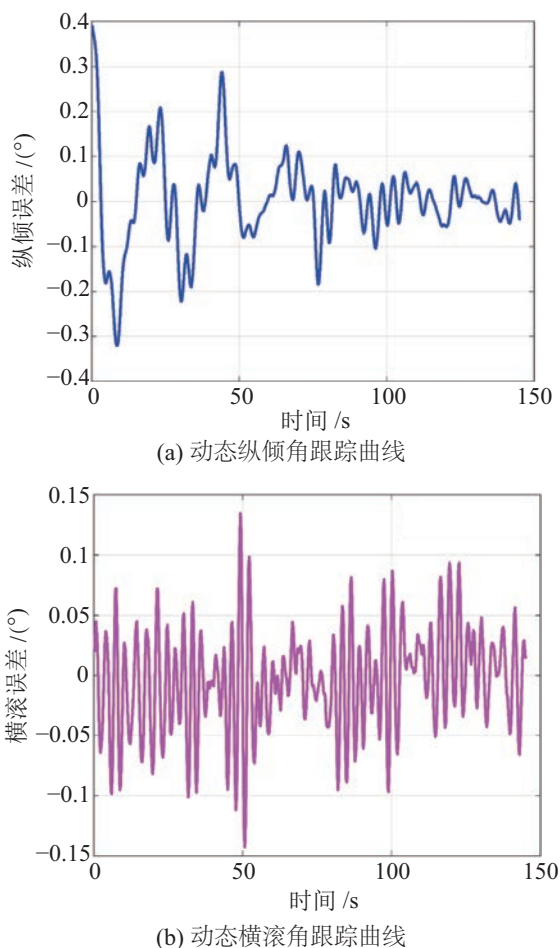


图17 水下火炬传递控制曲线

Fig.17 Control curve for underwater torch relay

最终,根据北京2022年冬奥会火炬接力路线方案的调整,水陆两栖机器人、水下变结构机器人和水下特种火炬应用于北京2022年冬奥会火炬传递活动中,如图18所示。

2022年2月2日,在北京冬奥公园莲石湖段举行的北京冬奥会火炬传递活动中,水陆两栖机器人和水下变结构机器人圆满完成了水下火炬传递,实现了奥运史上首次机器人与机器人之间的水下火炬传递,创造了历史性的时刻;突破冰水跨介质高适应性运动控制、复杂流场扰动的水下动态对准、水下机械臂厘米级精准作业、水下火炬跨介质可靠燃烧等技术,彰显了奥运和科技的结合,展示了我国机器人领域的科技进步。

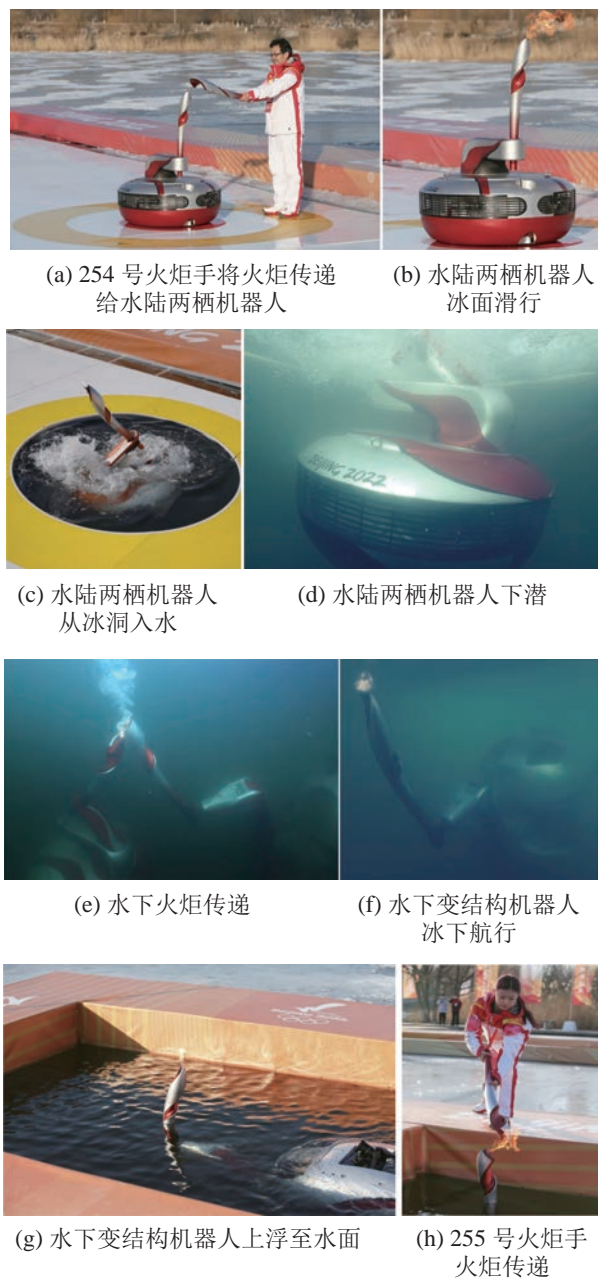


图18 北京2022年冬奥会机器人水下火炬传递

Fig.18 Underwater torch relay between robots at the Beijing 2022 Olympic Winter Games

助力外骨骼机器人应用于北京2022年冬残奥会火炬传递活动中。2022年3月2日,在冬残奥会火炬传递火种汇集仪式中,残疾人代表使用下肢助力外骨骼进行了火种汇集,如图19所示。

2022年3月4日,在北京冬奥组委会驻地举行的北京冬残奥会火炬传递活动中,两位残疾人火炬手分别借助上肢和下肢助力外骨骼机器人一起进行了火炬传递,如图20所示。助力外骨骼机器人的应用可辅助上肢功能障碍者重新实现抓、握、按等操作,辅助高位截瘫下肢功能障碍者重新站立行走,突破人机神经接口与残肢功能再造、智能仿生

步行与人机融合多模控制等技术, 传递出“科技改变生活”的理念, 体现出“技术温暖人心”的精神, 带动上肢和下肢助力机器人的普及与应用。



图19 下肢助力外骨骼机器人应用于北京2022冬残奥会火炬汇集

Fig.19 The lower limb ER applied to the allspark gathering ceremony at the Beijing 2022 Paralympic Winter Games



图20 助力外骨骼机器人应用于冬残奥会火炬传递

Fig.20 The ERs applied to torch relay at the Beijing 2022 Winter Paralympic Games

4 结论 (Conclusion)

北京2022年冬奥会和冬残奥会机器人火炬传递的圆满完成推动了地面、冰雪、两栖、水下、空中、医疗等多领域机器人的科技进步, 将有力促进各领域机器人的市场开发和产业化发展。水陆两栖机器人未来在近岸生态监测、灾害防护以及极地科学考察中具有很好的应用前景; 水下变结构作业机器人代表了水下机器人探测作业一体化的发展方向; 空中飞行机器人以其户外环境主动作业能力, 在当前消费级、探测型无人机快速发展的背景下, 将有力推动作业型无人机产业的发展; 地面机器人在无人巡检、防爆处置等环境将获得应用; 六足机器人在军事侦察、洞穴探险等领域有广泛需求; 助力外骨骼机器人可广泛用于上肢残缺和腿脚不便的残障人士, 带动助力机器人的普及, 圆了残障人士独立自主生活的梦想。

参考文献 (References)

- [1] 蒋效愚. 从“双奥之城”看中国对奥运的五大贡献[N/OL]. 北京日报, 2022-04-29 [2022-05-01]. <https://www.beijing2022.cn/wog.htm?cmsid=EYS2022042900385100>.
- [2] 北京市科委. 科技冬奥有关情况专场发布会解码科技冬奥[EB/OL]. (2022-02-21) [2022-05-01]. http://www.most.gov.cn/dfkj/bj/zxdt/202202/t20220221_179450.html.
- [3] 孙长银, 吴国政, 王志衡, 等. 自动化学科面临的挑战[J]. 自动化学报, 2021, 47(2): 464-474.
Sun C Y, Wu G Z, Wang Z H, et al. On challenges in automation science and technology[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(2): 464-474.
- [4] Gao F, Li S, Gao Y, et al. Robots at the Beijing 2022 Winter Olympics[J]. Science Robotics, 2022, 7(65). DOI: 10.1126/scirobotics.abq0785.
- [5] 陆洋, 唐元贵, 王健, 等. 全海深 ARV 浮力配平计算方法[J]. 机器人, 2021, 43(1): 74-80.
Lu Y, Tang Y G, Wang J, et al. A calculation method of ARV buoyancy trim at full-ocean depth[J]. Robot, 2021, 43(1): 74-80.
- [6] 代波, 何玉庆, 谷丰, 等. 基于加速度反馈增强的旋翼无人机抗风扰控制[J]. 机器人, 2020, 42(1): 79-88.
Dai B, He Y Q, Gu F, et al. Acceleration feedback enhanced controller for wind disturbance rejection of rotor unmanned aerial vehicle[J]. Robot, 2020, 42(1): 79-88.
- [7] Zhang G Y, He Y Q, Dai B, et al. Robust control of an aerial manipulator based on a variable inertia parameters model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(11): 9515-9525.
- [8] Su Y, Wang T, Shao S L, et al. GR-LOAM: LiDAR-based sensor fusion SLAM for ground robots on complex terrain[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2021, 140(5): 103-759.
- [9] 李洋, 徐达. 基于引力自适应步长 RRT 的双臂机器人协同路径规划[J]. 机器人, 2020, 42(5): 606-616.
Li Y, Xu D. Cooperative path planning of dual-arm robot based on attractive force self-adaptive step size RRT[J]. Robot, 2020, 42(5): 606-616.
- [10] Zhao Y, Gao Y, Sun Q. A real-time low-computation cost human-following framework in outdoor environment for legged robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2021, 146. DOI: 10.1016/j.robot.2021.103899.
- [11] 李自由, 赵新刚, 张弼, 等. 基于表面肌电的意图识别方法在非理想条件下的研究进展[J]. 自动化学报, 2021, 47(5): 955-969.
Li Z Y, Zhao X G, Zhang B, et al. Review of sEMG-based motion intent recognition methods in non-ideal conditions[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(5): 955-969.
- [12] 王战斌, 陈思婧, 杨青, 等. 下肢外骨骼机器人临床康复应用进展[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(6): 761-765.
Wang Z B, Chen S J, Yang Q, et al. Recent advances in clinical rehabilitation of lower-limb exoskeleton robot[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2021, 36(6): 761-765.

作者简介:

田启岩 (1989-), 男, 博士, 副研究员。研究领域: 水下机器人, 水下作业。

李 硕 (1970-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师。研究领域: 水下自主遥控机器人, 极地机器人。