

复杂开放环境下多工种机器人全闭环集群系统设计与沙漠治理应用

高源

大陆智源科技集团

DOI:10.32629/acair.v4i3.21364

[摘要] 针对沙漠治理中人力需求大、作业效率低及规模化落地难等问题,搭建云—边—端三层联动的多工种机器人全闭环集群系统,实现感知、决策、执行与反馈的无人化闭环。调度方面采用分层拍卖与多智能体强化学习融合策略,协调异构机器人动态配合;定位方面运用多传感器紧耦合因子图方案,应对GPS盲区与沙丘地形导致的位姿漂移;供能方面搭建移动式光伏储能网络并配置动态能量调度机制。该系统为荒漠化治理提供了具备工程可部署性的技术路径。

[关键词] 多机器人集群; 云边端协同; 沙漠治理; 多智能体强化学习; 移动储能

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Design of a fully closed-loop cluster system for multi job robots in complex open environments and its application in desert management

Yuan Gao

Mainland Zhiyuan Technology Group

[Abstract] To address the issues of high labor demand, low operational efficiency, and difficulties in large-scale deployment in desert governance, a three-layer cloud-edge-end collaborative multi-task robot full-closed-loop cluster system is constructed, achieving an unmanned closed loop of perception, decision-making, execution, and feedback. In terms of scheduling, a fusion strategy of hierarchical auction and multi-agent reinforcement learning is adopted to coordinate the dynamic cooperation of heterogeneous robots; in terms of localization, a multi-sensor coupled factor graph scheme is utilized to cope with pose drift caused by GPS blind spots and dune terrain; in terms of power supply, a mobile photovoltaic energy storage network is built and configured a dynamic energy scheduling mechanism. This system provides a technically deployable path for desertification control.

[Key words] multi robot cluster; Cloud edge collaboration; Desert management; Multi agent reinforcement learning; Portable Energy Storage

1 引言

荒漠化治理是全球生态环境领域的重大议题。传统治理以人力栽植、浇灌与管护为主,在高温、风沙及通信缺失的沙漠条件下,作业窗口大幅压缩,质量波动明显,植被保存率偏低,治理成本持续走高,难以承载大规模工程需求。近年来机器人、人工智能与新能源技术快速发展,使无人化装备进入沙漠作业成为可能。但沙漠地形起伏、通信脆弱、能源缺失,任务高度异构,单设备或松散协作均无法胜任全链条治沙工作。为此设计云—边—端三层协同的多工种机器人集群系统,围绕架构设计、调度策略、定位方案及移动供能四个层面展开。

2 系统架构设计

2.1 设计原则与整体架构

系统设计立足四条基本准则:其一,全流程闭环自主运行,即从外界感知、任务裁定、动作执行到成效校验均无需人工持续介入;其二,分层解耦与协同并重,以求在全局最优与局部快速反应之间取得平衡;其三,功能模块标准化复用,通过统一底盘快速衍生不同工种,降低研制与维护开支;其四,强化对极端条件的耐受度,在硬件选型、算法设计、通信配置和能量储备环节均需适配沙漠现实。

依照上述考量,系统被组织为三层结构:顶层为云端全局规

划平台,中间层为边缘区域调度节点,底层为端侧各类作业单元。云一边之间经由卫星链路或4G专网进行数据交换,边一端之间则借助Mesh自组网实现本地互联。整套系统运行的逻辑链条为“全局统筹—分区调度—单机执行—状态回传—在线修正”,具备支撑百台级多品种机器人协同施工的能力。

2.2 云端全局规划层

部署于云服务器的全局规划层,承担区域划分、跨区资源调配、数据汇集与应急指挥四方面职责。

在任务分解上,该层接入卫星遥感与无人机航测得到的沙区地形及植被分布信息,结合既定治理目标(面积、树种、完工时限),将整体工程拆分成若干空间上相对独立、时间上前后衔接的区域性子任务,再分发至相应边缘节点。在资源跨域统筹上,实时跟踪各边缘域内机器人数量、电量、物料存量及任务推进状态,当某域负荷过重或资源不足时,安排邻近域进行支援;其中能量调度子模块根据全域作业进度与储能车位置,滚动生成未来数日的光伏充放计划。在数据映射方面,构建作业区域的数字孪生模型,持续汇集各机器人的实时位姿、设备工况、作业完成度及环境参数,实现远程态势感知,并为后续算法升级积累原始运行记录。在远程维护方面,支持对远端设备的诊断、参数远程修改及异常处置流程下发,针对突发性设备卡阻或极端天气,同步调度救援车与其他作业力量启动应急响应。

2.3 边缘区域调度层

边缘节点通常搭载于随行的通信指挥车辆或临时设立的可移动基站内,起承上启下作用,主要涵盖任务再分配、局域定位增强及通信中断自治三项能力。

任务再分配模块接收云端下发的区域作业包,运行分层拍卖与多智能体强化学习的混合调度器,将具体的种植、转运、补能等动作实时指派给域内各台机器人,并随进度推进和环境变动(如突发起风导致某地块不适合栽植)在线调整分工。局域定位增强模块收集区域内各车端上报的原始感知与定位信息,融合生成覆盖本区域的高精度地形栅格和障碍物分布图,当某台机器人的星基信号丢失时,边缘节点可利用其余车辆的相对测量为其提供辅助修正。断网自治模块在云一边链路中断后自动激活,节点独立执行区域内任务排程、故障排查与能量分配,待通信恢复后再与云端同步,确保现场作业不因回传中断而停滞。

2.4 端侧自主执行层

端侧所有机器人在同一款仿生六轮全地形底盘上扩展而成,通过更换上装功能模块实现工种区分。系统共配备六类终端。

种植机配备钻坑、投苗、注水及覆土联合作业头,可在定位引导下自动完成标准化栽植。转运机设有苗箱与水肥罐,往返于补给点与种植区之间,解决现场物料的短途倒运。运输机属于大载荷平台,用于从后方基地向作业面批量运送成捆苗木、固化剂等大宗物资。储能机内置大容量磷酸铁锂堆与折叠式柔性光伏板,并带有无线电能发射端,可自主移动到指定位置为作业车辆补充电能。通信机装有Mesh中继器和卫星终端,作为可移动的信

号基点,向信号盲区延伸网络覆盖。救援机配备牵引绞盘、千斤顶和简易维修工具,用于困车拖拽、脱困及现场临时处理。所有终端均自带导航、避障与基础决策能力,即便与边缘节点短暂失联,仍可完成当前工单并自主返回安全地域。

2.5 全闭环协同运行机制

系统借助四类闭环实现长时间自主运转。感知层面,端侧采集的数据经边缘融合后汇入云端数字模型,完成从局部观测到全局态势的演变;决策层面,云端、边缘与端侧分别承担长、中、短周期的规划职责,执行结果反向修正上层计划;执行层面,各类机器人的作业进度与质量信息实时回传,系统据此核验并生成后续工单;能量层面,储能节点按调度指令移动补能,云边协同管控光伏发电与耗电之间的平衡。四者相互嵌套,共同维持集群在无人干预下的持续作业。

3 核心关键技术及其应用

3.1 分层拍卖与多智能体强化学习融合调度算法

沙漠作业对调度机制提出严苛要求:工种异构意味着适配关系复杂,环境多变要求策略具备快速响应能力。单用传统优化算法或纯学习算法均难兼顾。为此,构筑三层递进式调度结构。

3.1.1 顶层: 基于MDP的全局任务拆解

将整个治沙活动抽象为马尔可夫决策过程,用五元组 (S, A, P, R, γ) 加以刻画。 S 涵盖已完成面积、待作业量、各型设备可用数量及当前天气与沙面硬度等级; A 代表如何划分区域及分配各区域工期; P 表示按某一方案执行后状态演进规律; R 为兼顾日进度、总耗时及后期管护成本的综合回报; γ 为远期回报的折损系数。采用动态规划在该MDP上求取分解策略,将大工程切分为若干子块,每一子块都附带面积、适宜草种、限定工期及物资配额,供边缘节点执行。

3.1.2 中层: 组合拍卖驱动的任务指派

子块落到边缘域后,需将其中关联性强的多个工序(如栽植、送苗、补电)打包成组合标的,组织域内机器人参与竞价。各机器人在报价时综合考虑自身当前所处位置、剩余电量、所配上装是否匹配该工序需求以及到达目标点所需穿越的地形阻力,形成组合报价。中标规则以社会总福利最大化为导向,采用分支定界法求取次优成交组合。相较于逐一拍卖单个工序,组合方式更能维护工序间的先后依赖与空间邻近关系,防止工序断裂。

3.1.3 底层: MARL驱动的动态响应

中标分配完成后,现场若突遇风沙致使部分路径被掩埋、某台设备出力异常或某块地墒情变化需改变栽植密度,静态分配结果便不再适用。为此,将每台机器人视作一个智能体,采用集中训练、分散执行范式的QMIX算法。各智能体可观测自身坐标、电量、周边障碍及邻近机器的运动趋势,输出动作限于速度微调、局部路径绕行、作业优先次序切换等小幅度调整。集中训练环节利用一个混合网络将各局部值函数合成为全局值函数,奖励信号取自子块完工率与总耗时。

3.1.4 三层衔接与数据回流

顶层产出宏观骨架,中层向骨架内填充具体分工,底层承担扰动消解。同时,底层的车端执行日志会周期性地回送至中层与顶层,供其修正后续子块划分及适配系数取值。如此自上而下逐级传导、自下而上逐级反馈,形成兼具大体规划与局部适应性的调度体系。

3.2多模态紧耦合因子图融合定位技术

采用因子图框架将RTK、激光、视觉与IMU四种信息来源紧耦合到一起。

3.2.1多源信息融合框架

因子图内各类测量被建模为约束节点,通过增量平滑求取最优位姿。主要约束因子有四类:IMU预积分给出的短时运动约束、RTK有效时提供的绝对位置约束、激光点云与局部地图匹配形成的几何约束、视觉特征点重投影带来的像素级约束,另外附加零速修正与地形接触约束以抑制累加漂移。

系统以惯性测量单元(IMU)的高频积分结果作为位姿递推基准,当RTK完成信号锁定时,插入位置因子对累积误差进行校准;GPS信号丢失后,立即切换至激光匹配与视觉跟踪模块提供相对位姿约束;即使进入纹理极度匮乏的开阔沙地环境,仍可依托IMU的短时精度保证位姿输出的连续性。

3.2.2沙漠特定场景的感知增强

针对点云处理环节,考虑到沙尘环境会生成大量离散噪声点,采用空间密度聚类与距离阈值进行两级滤波,同时结合沙尘颗粒后向散射特性滤除无效回波;在此基础上提取沙丘脊线、坡度突变点等具有持久性的几何特征,作为点云匹配的参考基准。针对视觉处理环节,为应对强光过曝与沙面弱纹理问题,引入自适应增益控制与局部对比度拉伸算法,尽可能保留沙纹、枯草与残留灌木等稳定自然特征标记;同时嵌入轻量级语义分割网络,剔除由沙尘流动与光影瞬变引发的动态误匹配点。

3.2.3精度保持与失效防护

RTK锁定条件下,定位绝对精度可满足栽植作业的厘米级要求。全信号失锁场景下,纯惯性导航与激光/视觉相对约束相耦合,能够在数分钟内将定位漂移量控制在容许范围内。当因子图协方差持续扩张,且系统判定定位质量低于预设阈值时,立即控制作业车辆减速,并引导车辆沿最近路径返回至已知信号覆盖区域,或原地等候通信车投射中继信号,避免车辆盲目移动引发陷车或偏航风险。

3.3移动式光伏储能网络与动态能量调度

沙漠腹地既无固定充电设施,也无可用市电接入节点。本文引入由多台储能机器人构成的移动式能量网络,并配置时变调度策略,支撑作业集群实现长周期自主运行。

3.3.1移动储能系统硬件配置

储能机器人集成大容量磷酸铁锂电池组与可折叠光伏板,同时配备无线充电输出端。强日照时段展开光伏板吸收太阳能

并存储至电池,夜间与阴雨天则调用储备电量为附近作业车辆补充电能。多台储能车在空间上分散部署,互为热备份,且可随作业面推进整体前移,形成与工程进度同步推进的浮动式补给站点。

3.3.2时间窗约束下的动态充电路径规划

将能量调度处理为带时间窗的动态车辆路径问题,优化目标依次为:最小化各作业车等待充电的总时长、最小化储能车自身的行驶功耗、最大化光伏发电的现场消纳比例。储能车结合自身位置与剩余电量,在满足时间窗的前提下安排巡回次序;对高优先级工序的车辆(如正在进行栽植的种植机),在调度中给予更高的服务权重。路径开销计算中,根据沙丘坡角和表层松软程度拟合出等效阻力系数,用以修正各段路程的耗电预估值。调度方案定期滚动刷新,以跟随现场负荷的动态变化。

3.3.3光储配合与错峰操作策略

午间阳光最强时,优先安排储能车自身就地充满,同时让作业车集中赶工而不中断;午后光照衰减,储能车开始按优先级巡游补电;夜间则依据次日的任务量和光照预报,预先将储能车布置于次日作业密集区域的周边点位。整套体系不依赖任何外部电网,所有能量来源均为太阳能,从根本上摆脱了对固定能源基础设施的依赖。

4 结论与展望

面向沙漠治理中人员依赖度高、作业贯通难与规模扩展受限等问题,完成了一套云一边一端三层联动的多工种机器人闭环集群系统方案设计。该方案可用于北方防沙带、边境沙区等传统力量难以覆盖的地带,帮助缩短治理周期,减少反复补植的耗费。未来拟聚焦不同沙化类型的底盘与机构适配、基于环境大数据的策略进化、治沙碳汇效益评估及治沙与沙产业融合等方向,推动技术路线从工程验证走向规模化推广。

【参考文献】

- [1]连俊文,刘晓东,赵旭,等.沙地智能植树机器人设计与试验研究[J].林业机械与木工设备,2025,53(11):31-36.
- [2]杨方驰,郑伟宏,葛笑驰,等.一种沙漠植树机器人的设计[J].新疆农机化,2024,(3):20-22.
- [3]张振国,毛建旭,谭浩然,等.重大装备制造多机器人任务分配与运动规划技术研究综述[J].自动化学报,2024,50(1):21-41.
- [4]路春晓,钟煥,刘威,等.复杂地形环境下的多传感器融合SLAM技术[J].机器人,2024,46(4):425-435.
- [5]马艾强,姚顽强.煤矿井下移动机器人多传感器自适应融合SLAM方法[J].工矿自动化,2024,50(5):107-117.

作者简介:

高源(1979—),男,山东济南人,本科,研究方向:全地形机器人,具身智能。