



无人系统技术

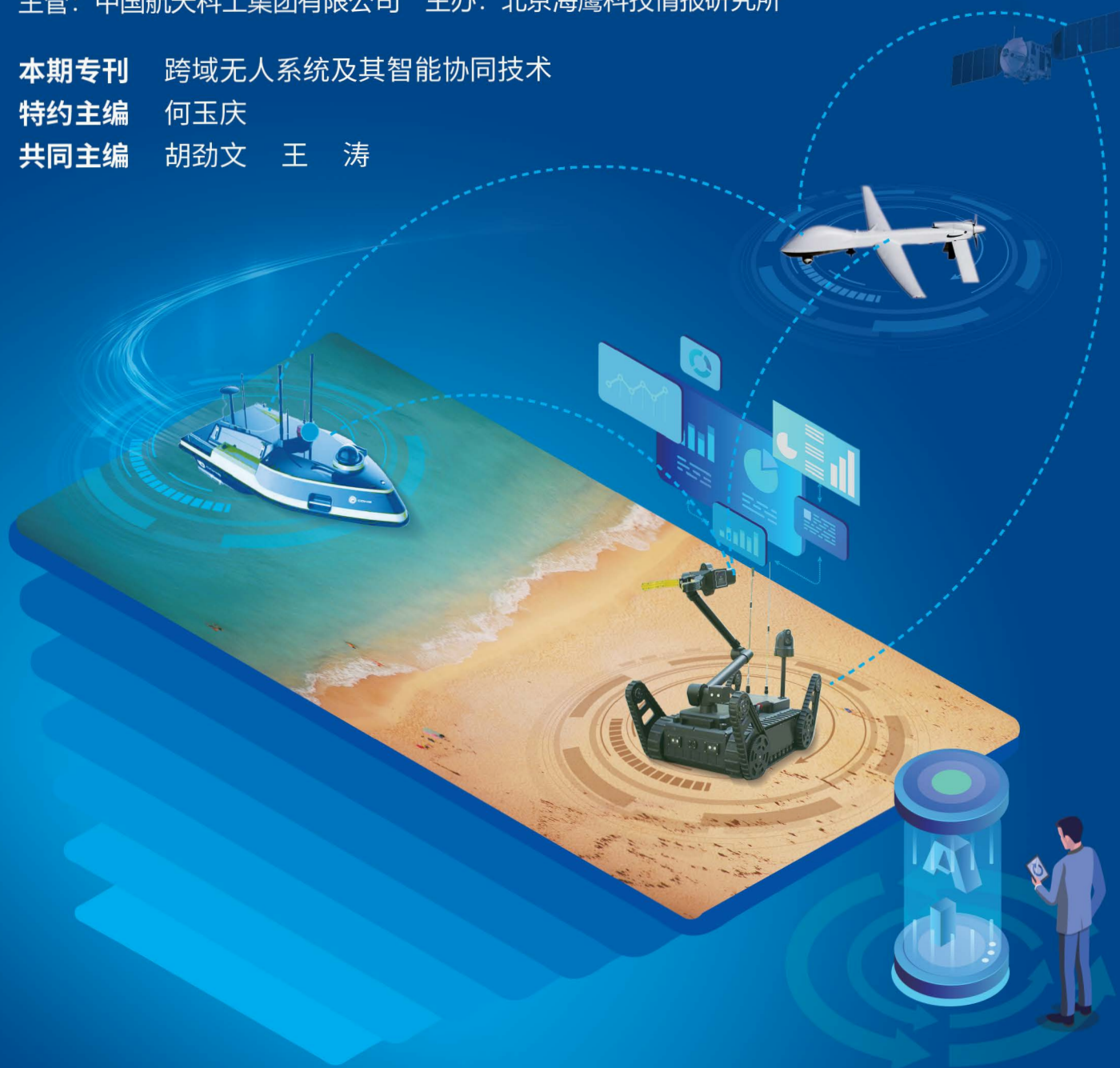
UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY

主管：中国航天科工集团有限公司 主办：北京海鹰科技情报研究所

本期专刊 跨域无人系统及其智能协同技术

特约主编 何玉庆

共同主编 胡劲文 王 涛



中国学术期刊网络出版总库 (CNKI) 收录

万方数据—数字化期刊群收录

超星数字期刊数据库收录

维普网数据库收录

ISSN 2096-5915



9 772096 591212

2021.4
第4卷 NO.

顾问

李德毅 封锡盛 李伯虎 徐德民 刘永才 费爱国 樊邦奎 陈杰 魏毅寅 王飞跃

第一届编委会

主任 李风雷

副主任 王长青 宋斌 谷满仓 张涛 符文星

委员 (按姓氏拼音排序)

昂海松 蔡顺才 陈斌 陈家斌 戴江勇 邓宏彬 都基焱 方浩 符小卫 郭继峰
黄强 黄长强 李必军 李东光 李贻斌 林平 刘莉 刘培志 罗均 马洪忠
孟红 孟凡彬 潘泉 齐俊桐 时兆峰 孙富春 田大新 王宏伦 韦锦峰 吴向阳
夏元清 向锦武 徐昕 徐海刚 薛建儒 颜国正 杨宁 杨宏晖 于进勇 于林宇
赵杰 张梅 张宁 张山 张冬青 张卫平 朱枫 朱小燕 Simon X.YANG
Wei REN Yang SHI Yaotao SHEN

Consultant

LI Deyi	FENG Xisheng	LI Bohu	XU Demin	LIU Yongcai
FEI Aiguo	FAN Bangkui	CHEN Jie	WEI Yiyin	WANG Feiyue

The First Editorial Board for Unmanned Systems Technology

Director: LI Fenglei

Vice-director: WANG Changqing SONG Bin GU Mancang ZHANG Tao FU Wenxing

Committee member:

ANG Haisong	CAI Shuncaai	CHEN Bin	CHEN Jiabin	DAI Jiangyong
DENG Hongbin	DU Jiyan	FANG Hao	FU Xiaowei	GUO Jifeng
HUANG Qiang	HUANG Changqiang	LI Bijun	LI Dongguang	LI Yibin
LIN Ping	LIU Li	LIU Peizhi	LUO Jun	MA Hongzhong
MENG Hong	MENG Fanbin	PAN Quan	QI Juntong	SHI Zhaofeng
SUN Fuchun	TIAN Daxin	WANG Honglun	WEI Jinfeng	WU Xiangyang
XIA Yuanqing	XIANG Jinwu	XU Xin	XU Haigang	XUE Jianru
YAN Guozheng	YANG Ning	YANG Honghui	YU Jinyong	YU Linyu
ZHAO Jie	ZHANG Mei	ZHANG Ning	ZHANG Shan	ZHANG Dongqing
ZHANG Weiping	ZHU Feng	ZHU Xiaoyan	Simon X. YANG	Wei REN
Yang SHI	Yantao SHEN			



无人系统技术

第4卷第4期 2021年7月

目次

系统综述

跨域协同：无人系统技术发展和应用新趋势.....	01
何玉庆，秦天一，王楠	
海洋无人系统跨域协同观测技术进展.....	14
王伟平，张尤君，董超，李秋鹏，郑策，陈焱琨，郑兵	

技术研究

基于组织行为学的跨域协同机理研究.....	22
王涛，郭欢祺，余华煌	
基于视觉的无人机大范围室外道路检测及拓扑地图构建.....	30
王玉茜，张雪涛，闫飞，庄严	
基于改进蚁群算法的无人机集群任务分配和路径规划联合优化.....	40
苏梅梅，程咏梅，胡劲文，赵春晖，贾彩娟，徐钊，张剑锋	
基于一致性群组算法的多无人机自主协同任务分配.....	51
马云红，刘云昊，杨誉乔，王鼎涵，张健	
不同通信概率下海洋滑翔机异构编队稳定性分析.....	59
李学成，张润锋，杨绍琼，苗展展	
人在环路的机器人在线可持续示教学习.....	67
胡艳明，华炜	

平台应用

基于IDL通用接口的人机语音交互协同控制系统设计研究.....	77
王开宇，张弘瑞，李聪，王献昌	
空中-水面子母无人平台系统设计与协同控制.....	85
张铭溪，谷丰，何玉庆，狄春雷，褚玲玲，聂虹宇	

由空中、海洋、陆地无人系统组成的跨域无人系统可通过相互间的互联协作弥补各类型平台之间的本质缺陷，进而显著提升综合应用效能，已经成为未来无人系统技术与应用的显著发展趋势之一，其与自主、智能、集群、人机共融等相关技术的有机融合将可能激发无人系统全新的技术能力和应用模式。在此背景下，本刊特组织推出“跨域无人系统及其智能协同技术”专刊。专刊收录文章10篇，内容涉及无人系统跨域协同技术发展、平台设计、应用趋势，以及跨域无人系统的架构、感知、决策、控制等研究。希望借助本专刊，能够为相关专家学者的研究工作、企业和有关部门决策提供学术和技术参考，推动跨域无人系统技术进一步发展。



Unmanned Systems Technology

Vol.4 No.4 2021

Contents

Systematic Review

- Cross-domain Collaboration: New Trends in the Development and Application of Unmanned Systems Technology..... HE Yuqing, QIN Tianyi, WANG Nan (01)
- Progress of Cross Domain Collaborative Observation Technology for Marine Unmanned System.....WANG Weiping, ZHANG Youjun, DONG Chao, LI Qiupeng, ZHENG Ce, CHEN Yankun, ZHENG Bing (14)

Technical Study

- Research on Cross-Domain Cooperation Mechanism based on the Organizational Behavior Theory..... WANG Tao, GUO Huanqi, YU Huahuang (22)
- Large-scale Outdoor Road Detection and Topological Map Building for Vision-based UAVs..... WANG Yuqian, ZHANG Xuetao, YAN Fei, ZHUANG Yan (30)
- Combined Optimization of Swarm Task Allocation and Path Planning Based on Improved Ant Colony Algorithm.....SU Meimei, CHENG Yongmei, HU Jinwen, ZHAO Chunhui, JIA Caijuan, XU Zhao, ZHANG Jianfeng (40)
- Multi-UAV Autonomous Cooperative Task Assignment Based on Consistent Group Algorithm..... MA Yunhong, LIU Yunhao, YANG Yuqiao, WANG Dinghan, ZHANG Jian (51)
- Stability Analysis of Marine Glider Heterogeneous Formation under Different Communication Probability LI Xuecheng, ZHANG Runfeng, YANG Shaoqiong, MIAO Zhanzhan (59)
- Human-in-the-loop Online Continual Robot Learning from Demonstration HU Yanming, HUA Wei (67)

Platform Application

- Design and Research of Human-machine Speech Interaction Cooperative Control System Based on IDL Universal Interface..... WANG Kaiyu, ZHANG Hongrui, LI Cong, WANG Xianchang (77)
- Air-to-surface Unmanned Platform System Design and Coordinated ControlZHANG Mingxi, GU Feng, HE Yuqing, DI Chunlei, CHU Lingling, NIE Hongyu (85)

[引用格式] 何玉庆, 秦天一, 王楠. 跨域协同: 无人系统技术发展和应用新趋势[J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 1-13.

跨域协同: 无人系统技术发展和应用新趋势

何玉庆^{1,2}, 秦天一^{1,2,3}, 王楠^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110169; 2. 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110169;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 随着无人系统技术的不断发展, 多无人系统之间的跨域协同凭借其诸多优势成为当前无人系统领域研究和应用的热点。首先, 阐述了无人系统跨域协同的概念形成与发展历程, 并对未来发展趋势进行了展望; 其次, 系统梳理了国外多无人系统跨域协同技术的研究情况, 分别从比赛竞技、项目研发和应用三个角度对美国、欧盟等无人系统跨域协同技术开展分析综述; 然后, 介绍了无人系统跨域协同的核心问题和技术体系; 最后, 通过对典型应用案例分析表明跨域协同对实际应用效能有明显提升作用, 相关研究为我国未来无人系统跨域协同相关发展提供参考。

关键词: 无人系统; 跨域协同; 信息融合; 优化决策; 协同控制; 人机融合

中图分类号: TP24 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)04-01-13

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.4.031

Cross-domain Collaboration: New Trends in the Development and Application of Unmanned Systems Technology

HE Yuqing^{1,2}, QIN Tianyi^{1,2,3}, WANG Nan^{1,2}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;
2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang 110169, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With the continuous development of unmanned systems technology, cross-domain collaboration among multi-unmanned systems has become a hot research and application topic in the field of unmanned systems by virtue of its many advantages. Firstly, the concept formation and development process of unmanned system cross-domain collaboration are described, and the future development trend is forecasted. Secondly, the research situation of multi-unmanned system cross-domain collaboration technology in foreign countries is systematically reviewed, and the cross-domain collaboration technology of unmanned system in the United States and the European Union is analyzed and summarized from three perspectives, namely, competition, project research and development and application. Then, the core problems and technical system of unmanned system cross-domain collaboration are introduced. Finally, through the analysis of typical application cases, it is shown that cross-domain collaboration can significantly improve the practical application efficiency, and relevant studies can provide reference for the future development of cross-domain collaboration of unmanned systems in China.

Key words: Unmanned System; Cross-domain Collaboration; Information Fusion; Optimization Decision; Collaborative Control; The Man-machine Integration

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-06-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0810100)

1 引言

装备、系统的跨领域应用并不是全新的概念，而是自古存在的现象，其发展大致可分为早期萌芽、应用驱动、理念成熟和无人时代四个阶段。

早期萌芽：在人类文明数千年的发展历史中，几乎同时具备了对地面平台和装备的驾驭记录，并广泛用于人类的日常生活、生产和军事等各个方面。19世纪初，人类发明了现代飞行器后，终于实现了驾驭空中平台和装备翱翔天空的理想。与此同时，跨域协同的概念就开始萌芽：第一次世界大战中，飞行器广泛用于侦察、通信、炮校等辅助性任务，为地面部队提供支援和保障，成为空地跨域协同的较早案例。再往前追溯，人类利用孔明灯、热气球等来为地面人员传输信息和物资等活动也同样表明了人类“将可利用空间从地面二维扩展到空间三维以提供更多便利和启发更多能力”的朴素思想，这虽然谈不上严格意义上的跨域协同，但不可否认地成为现代跨域协同思想的萌芽和雏形。

应用驱动：随着现代化装备技术的高速发展，跨域应用的案例屡见不鲜，典型代表就是马航搜索事件。在马航 MH370 航班搜索事件中，世界各国大量利用太空、空中、水面、水下等装备开展搜索工作，这场历时数年的大搜索创造了多项纪录，其中之一就是利用破纪录数量的跨域平台开展工作。据不完全统计，在灾难后的 9 天内（即截至到 2014 年 3 月 17 日），已经有来自 26 个国家和地区的 40 艘舰船、超过 58 架飞机参与搜索，覆盖范围超过 78 万 $\text{km}^{2[1]}$ 。这一创历史纪录的搜索活动虽以失败告终，但其无疑在人类历史上留下了联合使用陆海空天跨域装备的浓重一笔。

理念成熟：严格来讲，马航搜索并不能称为严格意义上的跨域协作，因为各个国家的各型装备之间的协同方式并不紧密，甚至因各救援力量无法通过互联协作统一行动而难称为协同。但在同一时期，军事领域中的跨域协同概念已经清晰并日趋成熟：2012 年 1 月 17 日，美军正式颁布

《联合作战介入概念》，其中就明确提出了跨域协同的作战思想^[2]。随后，美军颁布的《美国陆军和海军陆战队的跨军种概念：实现并维持进入》《联合作战顶层概念：2020 年联合部队》《海空一体化：军种协作应对反进入和区域拒止挑战》等一系列文件，对跨域协同作战思想进行了扩充^[3]，明确了跨域协同的基本内涵：在不同领域互补性地而不是简单叠加性运用多种能力，使各领域之间互补增效，从而在多领域建立优势，获得完成任务所需要的行动自由。

无人时代：近年来，无人系统技术的快速壮大为跨域协同发展带来了更多活力。这是因为相对于有人装备，无人系统具有两方面无可比拟的优势：一是无人系统多样化发展的特征明显，极大地丰富了协同模式并为功能提升带来了更多可能性；二是无人系统的低成本优势明显，为跨域协同应用从军事走向民用奠定了坚实基础。自此，跨域协同思想具备了蓬勃发展的基本土壤，在过去的十多年间得到快速发展。

综上所述，本文的无人系统跨域协同是指陆、海、空、天等可在不同空间域内运行的、具有显著功能差异性的多台套无人系统组成有机整体，其相互间可通过信息共享与融合、行为交互与协调、任务协同与合作实现功能互补、能效倍增，从而提升面对复杂环境和使命的应对能力。跨域协同与传统的多机协同和当前的集群协同等概念也存在明显的差异，是无人系统应用和技术发展的新趋势。应用层面，海、陆、空、天无人系统之间的跨域互联与协同合作有利于充分发挥异构平台的功能冗余性和能力互补性，实现各要素单元的一体化运用，从而达到效果互用、效能增强的综合目的，同时跨域协同也有利于推动无人系统应用新模态的涌现，从而进一步推动无人系统在各领域发挥全新作用；技术层面，协同是无人系统自主性技术的高级阶段，万物互联是可改变世界的潜力技术，加之被寄予厚望的集群技术，共同构成了跨域协同的技术内涵，其与人工智能、信息技术等学科的交叉融合，有望显著推动无人系统整体技术的发展与提升。

2 国外技术发展介绍

2.1 国外无人系统发展规划中的跨域协同

近年来, 国内外针对无人系统跨域协同的重视程度日益增加, 欧美的各种发展规划中对该方向给予了诸多关注。

早在 2006 年, 欧盟提出了机器人技术路线图, 在对面向安全与监控的机器人发展章节中明确提出了远期发展目标(到 2020+) [4]: 不同种类的机器人通过合作完成高度复杂的任务。这是较早正式规划中提出要发展跨域协同记载。

美国方面, 随着美军“跨域战”“多域战”“全域战”等概念的不断发 展, 其在无人系统技术路线图中也开始关注跨域协同技术与应用。自 2007 年美国国防部发布《无人系统综合路线图》起(图 1), 其在持续不断地大力推进无人系统体系化和智能化, 并强调海陆空无人系统自主协作技术。图 1 中, 封面从最早的陆海空割裂图片(2007)到共处同一画面(2009、2011)、再到协同案例(2013)、组网协同(2017), 表征了美军对跨域协同在不同时期的理解和重视程度。

◆ 2007 年, 提出互操作性要求的五大需求,

其中之一是跨域协同的互操作性。在不同模式的系统中: 陆军未来战斗系统(Future Combat System, FCS)的地面车辆及空中无人机协同工作的计划能力是这个级别未来互操作性的一个例子。

◆ 2009 年, 明确提出了无人系统可以为跨域战提供灵活选择, 这其中除了“有人-无人协同”以外的另一个重要方向就是无人系统间及其与有人系统间的跨域协同。这将为联合部队指挥官(Joint Force Commander, JFC)提供决定性能力。

◆ 2011 年, 互操作被列为美军面临的七大挑战之一, 并将跨域系统的互操作性列为互操作性的首要需求。

◆ 2013 年, 美国国防部发布的无人系统路线图和美国机器人技术发展路线图分别给出了多个跨域协同的应用想定, 涉及军事封锁/侦察、近海管道威胁、国土关键基础设施保护和检查等案例, 全面深入介绍了未来跨域协同技术可能带来的应用模式的变革性影响。

◆ 2017 年及随后几年的规划中, 利用无人系统和有人系统组成跨域体系成为全面趋势, 强调所有无人系统的软硬件架构的统一, 从而为体系化运用奠定技术基础。



图 1 美国国防部无人系统发展路线图封面(2007—2017)

Fig. 1 Cover of DARPA unmanned systems roadmap (2007—2017)

2.2 国外无人系统跨域协同进展综述

国外为了推动跨域协同技术的进步和发展, 开展了诸多工作, 本节将从比赛竞技、探索研究和应用驱动三个角度对相关工作进行简单综述。

2.2.1 比赛竞技型项目

比赛竞技是促进无人系统技术发展的有效手

段之一, 近年来世界各国对无人系统竞技类比赛投入了极大的关注, 跨域协同类比赛由于相对投入较大, 因此尚不多见, 但也已出现一些在常规项目中采用跨域协同技术参赛或者专门针对跨域协同而设置的比赛科目, 这些竞赛无疑对跨域协同技术的发展起到了较好的推动作用(表 1)。

表1 国外知名跨域协同相关竞技赛

Table 1 Well-known foreign cross-domain cooperative competitions

时间	赛事名称	比赛宗旨与内容	获胜方及方案
2015年9月	欧盟 euRathlon-2015 挑战赛	模拟2011年日本福岛事故引发的灾难响应场景, 测试并推动无人系统智能和自主性; 要求陆海空无人系统能够共同行动, 完成: 收集环境数据并构建地图、寻找并发现失踪人员、识别出关键危险(泄漏)	来自10个国家的16个独立参赛队组合成6个最终参赛队, 共有134个参赛队员、超过40台套无人系统; CMS公司、INESC TEC实验室、FP7-ICARUS项目团队组成的陆-海-空跨域协同联队获得冠军
2019年8月	DARPA 地下挑战赛 第一阶段隧道巡回赛	促进战术通信、地图绘制以及与搜索有关的无人系统技术在地下环境中的应用, 并对相关系统和功能进行测试; 要求无人系统能帮助人类在未知、危险的地下环境实现定位、导航、绘图以及搜寻; 具体要求是: 60 min内完成搜索, 能够正确识别5 m精度内的20个人造物品获得积分	来自8个国家和地区的11支队伍参赛; 队伍分为两种: DARPA资助团队和自筹资金团队, 只有自筹资金团队且获得前五者有资格获得赛事奖励; DARPA资助的Explorer(卡内基梅隆大学)队伍获胜, 该团队采用大型四轮无人车+无人机组成跨域协同系统
2020年2月	DARPA 地下挑战赛 第二阶段城市巡回赛	模拟在城市地下结构中执行搜救任务; 城市地下结构含有不同的层次, 包括楼梯、通道、房间、类似地铁站台的垂直变化结构、瓦斯管道、通风口等特定环境; 比赛包括两条路线, 每条路线放置20个物件, 每个参赛团队需在每条赛道上完成两次60 min的赛程	分为实体机器人和模拟系统两类比赛, 11个国家的17个团队参赛; NASA喷气式推进实验室、麻省理工学院、加州理工学院和波士顿动力公司组成的CoSTAR团队获得实体比赛冠军; 密歇根理工大学的BARCS团队获得模拟系统比赛冠军
2020年11月	DARPA 地下挑战赛 第三阶段洞穴巡回赛虚拟赛	比赛采用虚拟洞穴环境, 包括基于云端SubT模拟器的73个洞穴要素, 构建成8个长度为1.5~5.2 km的路线, 并具有自然地形、动态岩石坠落、低能见度等功能; 比赛引入数字孪生比赛机器人、空中和地面机器人组合平台、可以被机器人丢弃从而用作通信中继的“面包屑”节点等总计17个不同仿真平台和58个仿真设备; 要在8个洞穴路线上航行三次, 并以优于5 m的精度定位到隐藏在虚拟洞穴环境中的20个虚拟物件(背包、手机、头盔、绳子、模拟幸存者的人体模型等)	共有16个团队参赛; 加州州立大学、红杉中学等组成的协调机器人团队赢得冠军

(1) 欧盟: euRathlon 挑战赛

euRathlon 是欧盟 FP7 支持下的一个竞赛, 其目标是通过竞赛加速实现适应真实世界的智能机器人, 该项赛事以类似福岛核事故灾难响应为主要背景开展。2015年, euRathlon 竞赛科目正式引入跨域协同概念, 要求陆海空平台协同行动, 收集环境数据、识别关键危险并承担任务, 以确保核电站安全(图2)^[5]。

(2) 美国: 地下挑战赛(Subterranean Challenge)

2019年起, 美国国防部预先研究计划局(DARPA)发起最新的“地下挑战赛”, 旨在促进机器人与无人系统技术在地下环境中的应用^[6-7]。比赛要求参赛者研制出可帮助人类在未知且危险的地下环境实现定位导航、绘图以及搜寻的空地机器人系统。比赛分为隧道巡回赛、城市巡回赛、洞穴巡回赛和总决赛四个阶段, 2019年8

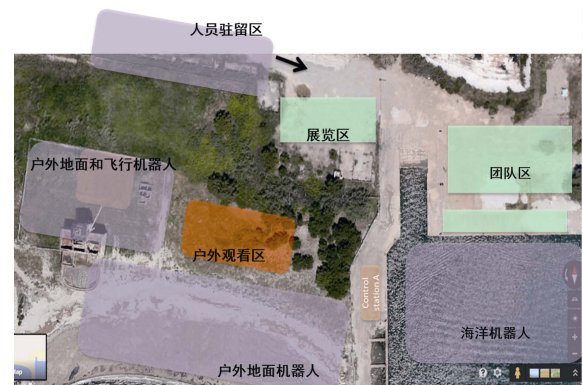


图2 欧盟组织的 euRathlon-2015 挑战赛比赛场地
Fig. 2 euRathlon-2015 grand challenge competition site

月的第一阶段比赛中, 要求参赛队伍在60 min内对隧道内环境建模并对40个模拟生还者及制定物品定位, 共有来自8个国家的11支团队参赛, 最终卡耐基梅隆大学与俄勒冈州立大学联合组队, 赢得比赛冠军; 2020年2月, 第二阶段比赛在城市地下机构中进行, 来自11个国家的17个

团队参赛, 最终美国国家航空航天局 (NASA) 喷气式推进实验室、麻省理工学院加州理工学院和波士顿动力公司组成的 CoSTAR 团队获得实体比赛冠军^[8], 密歇根理工大学的 BARCS 团队获得模拟比赛冠军; 2020 年 11 月, 第三阶段比赛在虚拟洞穴环境中完成, 参赛团队需以不超过 5 m 的精度定位找到隐藏在虚拟洞穴环境中的 20 个虚

拟物件以及模拟矿难幸存者人体模型, 最终加州大学、红杉中学等组成的协同机器人团队夺冠。

2.2.2 探索研究型项目

自 21 世纪初, 国外对跨域协同技术的关注不断高涨, 各部门所资助的与此相关的项目不胜枚举, 本小节列出部分具有代表性的探索研究型项目, 供读者参考 (表 2)。

表 2 国外探索研究型跨域协同项目
Table 2 Foreign exploratory and research-type cross-domain collaborative projects

时间	项目	项目目标与主要内容	功能演示
2002 年	DARPA PerceptOR 项目 美国卡耐基-梅隆大学 ^[9]	美国陆军 FCS 规划中的一部分, 用于提升地面平台的感知能力	利用空地无人系统互补的感知能力提升整个系统的感知能力
2004 年	DARPA MARS2020 项目 宾夕法尼亚大学、佐治亚理工大学、南加利福尼亚大学等	探索跨域协作搜索技术	2004 年 12 月 1 日在美军 Fort Benning 基地开展演示, 2 台固定翼无人机和 8 台地面无人系统组成跨域协作系统, 另有 3 名监控人员负责过程监控和目标确认
2007—2015 年	法国 Action 项目	开发和实现异构无人系统通用软件架构, 使它们能够在危险、部分未知和动态环境中合作完成任务; 研究通信约束下目标和友方定位性能提升方法, 重点研究异构跨域平台间的数据融合和决策功能, 包括任务规划和监督 ^[10]	2012—2015 年进行了六次日益复杂的空中-地面和空中-海洋科学演示; 多次演示: 无人机和无人车: 对已知环境进行监控和入侵者跟踪的使命; 一架旋翼无人机、两台无人车: 在某停车场进行模拟和真实混合演示; 一架无人机、一台无人艇、一台无人潜器: 在卡斯蒂隆湖区演示沉没化学船只搜索; 两架无人机、两架无人车: 完成空-地环境数据融合、人在回路监督控制和协同规划等; 两架无人机、六台无人车、四个虚拟平台 (包括一架无人机、三台无人车): 验证 12 台套系统嵌入的决策架构
2015 年	芬兰 O3-SAM 项目 芬兰坦佩雷理工大学	自研的跨域协作系统	室外多机器人跨域演示试验

(1) 美国: MARS2020 项目

早在 21 世纪初, DARPA 资助了 MARS2020 项目。该项目由美国宾夕法尼亚大学、佐治亚理工大学、南加利福尼亚大学等机构联合开展, 目的是探索跨域协作搜索技术。2004 年 12 月 1 日在美军 Fort Benning 基地开展了联合演示, 演示中 2 台固定翼无人机和 8 台地面无人系统组成跨域协作系统, 另有 3 名监控人员负责演示过程监控和目标确认。演示分两个阶段进行: ①无人机对整个区域进行搜索, 发现疑似目标后, 给地面站发送信息及粗略定位信息; ②地面站接到疑似目标信息后, 部署不同的地面无人系统进行精细搜索和定位。此类演示是迄今为止跨域协作最为

常见的一种合作方式 (图 3)^[11]。图 3(a) 为固定翼无人机, 携带视觉系统对地面目标进行观测; 图 3(b) 为地面无人系统, 携带立体视觉传感器实现对地面目标的观测; 图 3(c) 为地面无人系统和无人机对地面目标观测的误差分析。

(2) 法国: Action 项目

2007 年, 法国国防部资助了跨域协作的 Action 项目^[12]。该项目以边界巡逻与监控为背景, 针对跨域协作中的“数据融合”和“态势评估与决策”两个科学问题, 旨在研究不同无人系统 (空中、地面、水面、水下) 之间的跨域协作方法及其实现技术。项目目标是开发和实现适应异构平台协同的软件架构, 使它们能够在危险、未知、

动态环境中合作完成任务，具体包含四个主题：双机协同、三机信息共享、跨域协同、集群管理。2012—2015 年，该项目共进行包括“空中、地面协同设施监视”“空中、水下、水面协同水污染监测”等科目在内的 6 次技术验证演示，验证了协

同感知与协同决策等关键技术（图 4）^[13]。图 4 中，(a)为演示中的两个地面无人系统；(b)为地面无人系统跟踪；(c)为无人机跟踪目标；(d)为用于巡逻 12 个机器人的路线图；(e)为任务跟踪接口；(f)为界面跟踪每辆车的操作（运动、感知、通信）。



图 3 MARS2020 项目中的空-地无人平台及定位算法

Fig. 3 MARS 2020 project: Air-ground unmanned platform and positioning algorithm

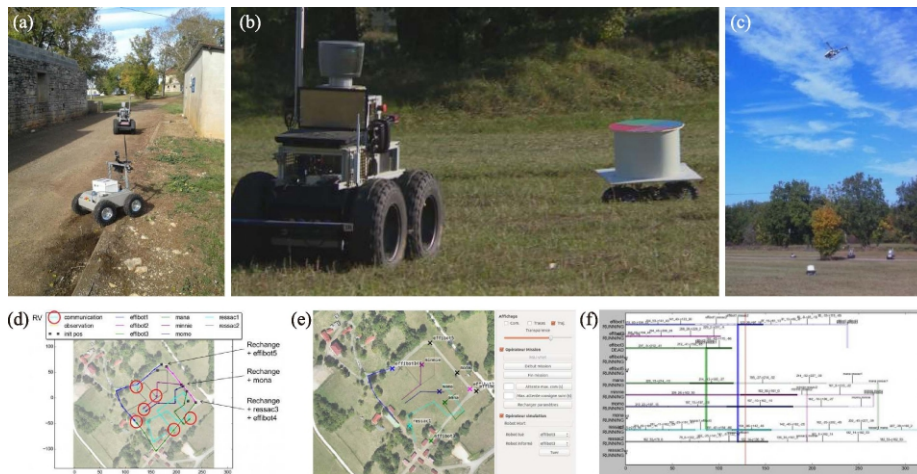


图 4 法国 Action 项目的演示平台及技术

Fig. 4 Action project: Platform and technologies

(3) 德国：空地协作无人系统

2012 年，德国锡根大学、汉诺威-莱布尼茨大学和弗劳恩霍夫 CIPE 研究所联合研制了空中-地面机器人协作系统^[14-15]，来验证其开发的可用于跨域协同的编程与操控语言，从而使得只需一个操控人员通过简单的操控指令即可对整个跨域协作系统进行控制。在其共同开展的技术验证中，6 台套不同的自主系统开展了协同演示，文献[14]中，开发者认为实现多平台跨域协同是可行的，且同类型的协同系统非常适用于侦察和监视等领域。

2.2.3 应用驱动型项目

除了探索研究型项目，更多跨域协同类项目直接面向具体应用使命，此类项目具有较强的针

对性，所取得的可视化效果也往往更加突出，本小节将借助几个知名的跨域协同应用型项目进一步阐述跨域协同所能带来的实用效能（表 3）。

(1) 美国：圣迭戈 SPAWAR 中心

早在 21 世纪初，DARPA 就曾资助美国圣迭戈 SPAWAR 中心开展过空中-地面-水面平台跨域协作的研究，并于 2005 年 12 月份进行了针对“入侵人员”监控与打击的演示（图 5）。在该演示中，1 台旋翼无人机、3 台地面无人系统和相关参演人员一起展示了如何通过一个中央联合操控系统（Multi-robot Operator Control Unit, MOCU）实现对逃窜人员的联合抓捕，这是可查的、较早开展跨域联合实用化展示的案例^[16]。图 5 中，(a)

为能同时控制多个无人系统的中央联合操控系统; (b)为空地跨域协作中的旋翼飞行器人

RotoMotion; (c)为空地跨域协作中的地面移动机器人 MDARS。

表 3 国外应用驱动型跨域协同项目

Table 3 Foreign application-driven cross-domain collaboration projects

时间	项目&参与方	涉及平台	实施方式	主要任务
2005 年	美国圣迭戈 SPAWAR 中心	一台旋翼无人机、三台地面无人系统、一个中央联合操控系统和相关参演人员	空中、地面、水面真实装备跨域协作演示试验	完成针对“入侵人员”监控与打击的任务
2013—2015 年	欧盟 SHERPA 项目 意大利博洛尼亚大学联合 9 个机构	一架固定翼无人机、一架无人直升机、一架多旋翼无人机、一台地面机器人、一台地面运输无人系统 ^[17]	空中、地面真实系统和装备跨域协同演示试验	针对阿尔卑斯山失踪人员营救、针对雪崩灾难后的被埋者营救
2015 年	葡萄牙 ROBOSAMPLER 项目 葡萄牙 4 个研究机构	一台多旋翼无人机、一台地面作业无人系统	空中、地面真实装备跨域协作演示试验	污染样品的采集与转运
2015 年	DARPA 跨域海上监视和瞄准 (CDMaST) 项目	美海军无人装备	构建能够跨域执行监视与瞄准任务的体系结构,形成能够快速响应、无处不在的进攻能力,拒止对手力量投送,或迫使对手大幅提升海上行动成本,维持美海上绝对控制权; 2017 年项目进入工程阶段	
2016 年	美国 DARPA 进攻性蜂群战术 (OFFSET) 项目	最终达到 250 个小型无人机系统 (UAS) 和小型无人地面系统 (UGS)	真实系统+虚拟系统联合演示	2019 年,完成地面无人车、旋翼无人机和固定翼无人机组成的多平台无人集群系统在模拟城市环境中对目标进行侦察
2017 年	欧盟海上无人系统研究 OCEAN2020 项目 来自 15 个国家的 42 家机构参与	9 无人系统 (4 架无人机、3 艘无人水面舰艇和 2 艘无人水下舰艇)+意、西、希、法等 6 国海军部队+5 颗通信和监视卫星+4 个国家级海上作战中心+2 个地面通信网络+欧盟海上作战中心 ^[18]	真实陆海空装备和有人装备	“地中海演示验证”测试了如何融合从作战区域部署的系统收集的数据及信息

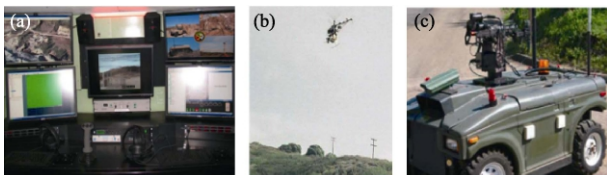


图 5 SPAWAR 中心开展的陆海空跨域协作演示
Fig. 5 Land-sea-air cross domain demonstration of SPAWAR

(2) 欧盟: SHERPA 项目

2013—2015 年,欧盟资助了 SHERPA 项目^[19],该项目由 7 所大学、2 家公司和 1 个联盟组成研发团队联合开展,历时三年,旨在构建一套可利用地面、空中无人平台与搜救人员协同开展山区人员搜救的系统。该项目于 2015 年开展了两次技术演示,其中夏季演示针对阿尔卑斯山失踪人员营救,冬季演示针对雪崩灾难后的被埋者营救。演示过程中固定翼无人机用于大面积搜寻,无人直升机用于搜索和紧急物资输送,多旋翼无人

用于自动跟随人员、提供稳定的航拍图像、扩展人员的观测范围,无人车搭载机械臂,用于精细搜索、挖掘和救援、物资和人员运输等,所有平台信息在同一认知地图上更新、融合(图 6)。



(d) 冬天演示场景 (e) 夏天演示场景

图 6 无人平台在山雪崩事故人员搜救中的应用
Fig. 6 Unmanned system in snowslide rescue

(3) 葡萄牙：ROBOSAMPLER 项目

2013—2015 年，葡萄牙内政部资助了 ROBOSAMPLER 项目。该项目旨在设计旋翼无人机和作业型地面无人系统构成的跨域协同，并通过二者的协同实现野外复杂环境中的重金属、放射性物质等有害物质的采样、存储和运输的工作。实际演示中，无人机系统用于扫描指定区域、识别待采样物，实时回传图像，并指引对地面平台的远程遥控；地面无人系统则通过搭载机械臂完成采样（图 7）^[20]。

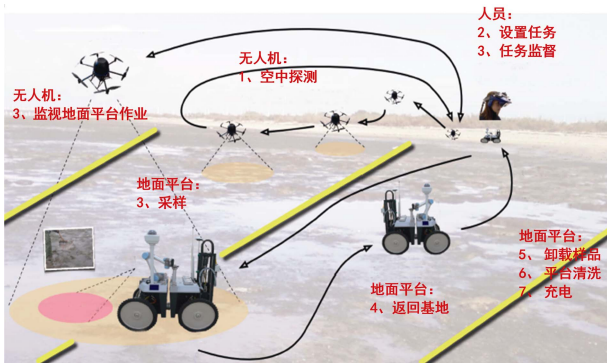


图 7 跨域协同用于污染土壤采样
Fig. 7 Air-land cross domain in soil sampling

(4) 美国：CDMaST 跨域海上监视和瞄准

2015 年，DARPA 启动了跨域海上监视和瞄准（Cross-Domain Maritime Surveillance and Targeting, CDMaST）项目，该项目明确制定了“实现面向海洋的跨域协同体系集成”的目标，旨在转变美海军当前海上力量编成体系，通过将多种海上作战功能分解至可升级的大量低成本有人-无人系统上，并分散部署至对抗激烈的广域海域，构建一种能够跨域执行监视与瞄准任务的“系统之系统”体系结构，形成能够快速响应、无处不在的进攻能力，阻止对手力量投送，或迫使对手大幅提升海上行动成本，维持美军海上绝对控制权（图 8）。

(5) 美国：OFFSET 进攻性蜂群战术

DARPA 于 2016 年资助了“进攻性蜂群战术”（OFFensive Swarm-Enabled Tactics, OFFSET）项目，谋求在未来的小规模步兵部队作战中协同使用多达 250 个小型无人机系统和小型无人地面系

统，利用无人蜂群技术和自主、自治、人机协同技术，快速开发和部署无人集群系统并形成战斗力。2020 年 9 月，该项目完成第四次外场试验，重点是提高分布式异构协同感知能力，由地面无人车、旋翼无人机和固定翼无人机组成的多平台无人集群系统在模拟城市环境中对目标进行侦察（图 9）。

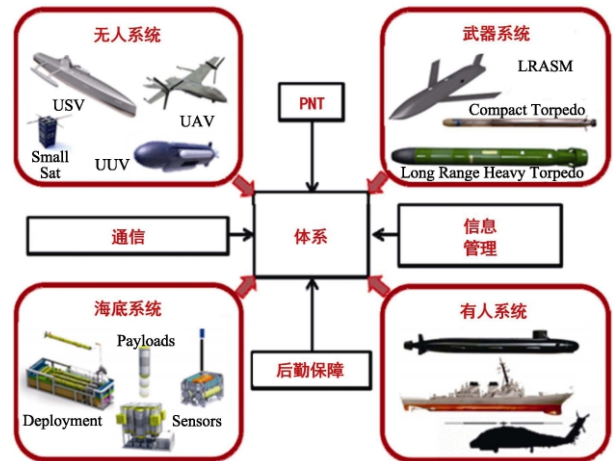


图 8 跨域海上监视和瞄准（CDMaST）项目概念
Fig. 8 Concept of CDMaST project

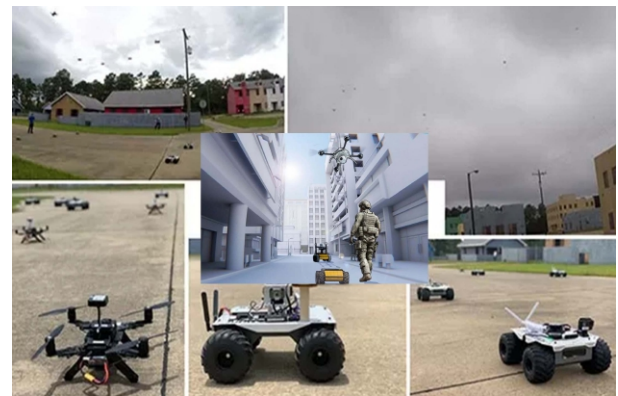


图 9 进攻性蜂群战术项目最新演示
Fig. 9 Demonstration of OFFENSET project

(6) 欧盟：OCEAN2020 无人海上态势感知
OCEAN 2020 是欧盟“国防试点研究计划”的旗舰项目，全称为“欧洲海上感知开放式合作”（Open Cooperation for European mAritime awareNess, OCEAN），目标为探索面向广域持续监测和海上拦截的海洋态势感知相关技术。该项目共涉及来自 15 个国家的 42 家机构，旨在将不

同类型的无人平台(固定翼无人机、旋翼无人机、无人水面艇和无人潜航器等)及主战装备与海上指控中心相整合,通过卫星实现海上指控中心与陆基指控中心的数据交换,以验证跨域协同中的态势感知、自主性及互操作性及其效能。

OCEAN 2020 项目于 2019 年 11 月在“地中海”举行了一次联合演示,此次演示设置了两种场景:一种是威胁船只封锁,另一种是在两栖作战前拦截布雷船。该演示共汇集了 9 部无人系统(4 架无人机、3 艘无人水面舰艇和 2 艘无人水下舰艇),来自意大利、西班牙、希腊和法国等的 6 支海军部队,5 颗通信和监视卫星,4 个国家级海上作战中心,2 个地面通信网络,1 座欧盟海上作战中心原型。“地中海演示验证”测试了如何融合从作战区域部署的系统收集的数据及信息(图 10)。

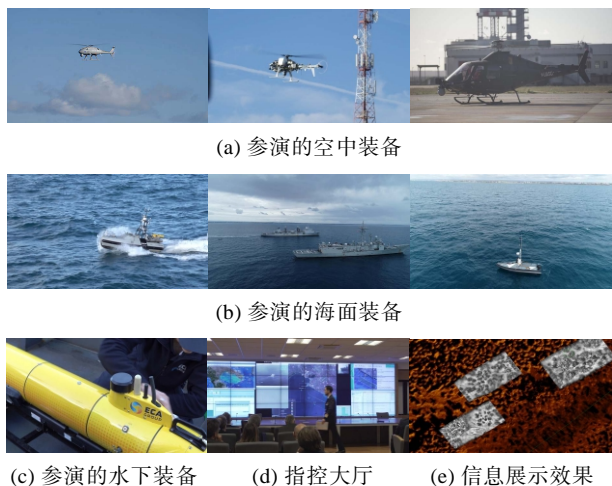


图 10 OCEAN2020 地中海测试场景

Fig. 10 Demonstration of OCEAN2020 at the mediterranean

3 核心问题和技术体系

3.1 跨域协同核心问题

无人系统跨域协同本质上是对单无人平台和单种类无人平台协同的能力增强和效能提升,因此无人系统相关的技术导航、感知、控制、规划、决策、人机交互等均需在跨域协同的框架下进行进一步的研究。但有四方面的关键技术体现了跨域协同区别于其他技术并亟需解决的核心问题。

问题一、具有显著差异性情境信息的一致性表征与无缝融合问题。情境感知是无人系统必须面对的技术挑战,对于协同感知来说,不同无人系统得到的感知信息进行统一表述与融合,是信息共享共用的关键。而对于跨域平台,不同平台所能获得的信息在感知视角、数据类型、数据尺度、噪声水平等方面都存在显著性差异,加之跨域多平台系统所运行的环境通常具有强动态性、高复杂性等特点,所以通信链路易受各种干扰因素影响,这使得环境感知信息一致性表述、抽象与融合技术面临极大挑战。

问题二、多维度情境约束下的实时行为优化决策问题。跨域协作中不同平台得到的环境信息包括大范围“宏”环境信息和局部精细的“微”环境信息,既包含环境信息也包括任务、目标信息,情境约束的多维度特性明显,这将为协同系统中各平台提供更多的环境信息,为实现全局最优决策提供基础。但是,多维度约束下的行为优化决策问题给算法实现带来严重的实时性问题;此外,多约束共同作用下的规划与决策也容易遭遇局部极小甚至不可求解(可行性)等问题,这些都给实时行为优化决策带来了严峻的挑战。

问题三、兼容动力学差异性的跨域实时协同控制问题。跨域平台的运动能力和动力学特性差异明显。例如,空中平台和水下平台具有三维空间运动能力,而地面、水面平台只能实现二维运动;各种环境干扰对平台运动的影响机理不同,空中平台的空气动力学、地面平台的摩擦动力学、水面水下的水动力学等;此外,不同平台的动力学和运动学形式也存在明显差异。而运动学和动力学模型与协调行为的可行性密切相关,这就使得在研究跨域平台协同控制问题时需要构建更复杂的模型、考虑更多的环境/任务约束,这给本就难以解决的协同控制理论和技术研究带来了全新挑战。

问题四、面向跨域协同的人-多机交互与协同决策问题。实际应用过程中往往需要操控人员在不同任务阶段对不同无人系统实施干预,形成人-机系统共同完成相关使命,这是无人系统发展的总趋势。在跨域协同应用中,由于各平台自身

特性的差异性明显，传统的人对多平台干预方式的适用性将会下降，要求更加高效和智能的交互方式以及灵活多变的干预机制与方法，形成能力体系中的人机融合，进一步提升面向使命的跨域协同效能。

3.2 跨域协同技术体系

跨域协同是无人系统发展的高级阶段，其技术体系除包含传统无人系统技术体系相关内容外，具有更加丰富的技术内涵和外延。此外，由于跨域协同往往要面临复杂的环境和使命，属于典型的复杂系统，需要和相关的应用体系相结合，从而往往具有更加复杂的体系架构。图 11 给出了包含三个层次的跨域协同技术体系示意图。

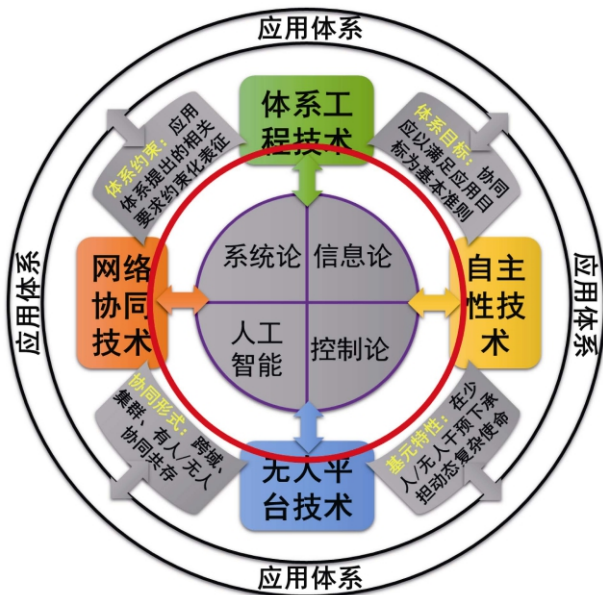


图 11 无人系统跨域协同技术体系

Fig. 11 Technology systems of unmanned system cross domain synergy

第一层次（底层）：平台技术。跨域协同在实际平台上实现才能获得最终效能，因此平台技术是无人系统跨域协同技术体系的底层支撑性技术，是构建无人系统跨域协同技术体系的物理基础。现有的跨域协同往往是在现有无人平台基础上通过信息化改进实现，但从长远发展来看，未来的跨域协同将对现有的无人平台提出明确的技术需求，可能会对无人平台本身的发展产生明显影响。

第二层次（中层）：自主技术和网络技术。自主技术是无人系统的核心技术之一，而网络（互联）技术是实现协同、集群的基础性技术，它们都是在平台基础上为提升综合效能而需要的共性使能技术，自主技术决定了无人系统摆脱对人的依赖、自行运行的本体能力程度，而网络技术则表征多个/种装备/功能实现协同提升总体作战效能的共性使能技术。跨域协同对现有的自主技术和网络技术也都会提出新的需求。

第三层次（顶层）：体系工程技术。体系工程技术是在平台基础上考虑整体目标和应用体系约束下，实现无人系统与所有其他应用单元相互融合、统一的工程实现技术。它包括对技术体系的仿真与验证技术、总体效能评估技术、标准化技术，以及贯穿整个研发周期的体系优化集成技术。它是联系相关应用体系与无人系统跨域协同技术体系的纽带，是提升无人系统整体效能的根本。

4 国内典型案例分析

国内目前已经出现不少利用跨域系统提升应用效能的案例，本文以本单位近期开展的工作之一介绍跨域协同对实际应用效能可能产生的明显提升作用。

2021 年 4 月，中国科学院沈阳自动化研究所和辽宁省公安厅联合组织了针对“大型群众活动现场安保”的空地跨域协同应用示范，演示了空地无人平台在公安应用的新模式。此次示范的参演无人平台包括：1 架复合翼无人机、3 架多旋翼无人机、4 辆无人车及指挥控制方舱。演示过程分为事前勘测、事中巡逻、异常监测、处突取证、嫌犯追踪以及山林抓捕等环节。

(1) 事前勘测。该环节采用固定翼无人机、多旋翼无人机以及地面无人车，分别采用视觉和激光的方式开展三维重建，并将其进行跨尺度融合，最终生成了现场多维度模型^[21-22]。该模型可表征地表物理信息、人/车/飞机可通过区域等信息，为现场指挥与控制提供便利（图 12）。该环节充分展示了利用跨域融合的感知信息可有效提升区域掌控能力。

(2) 事中巡逻: 该环节开展空地跨区域监控验证。过程中, 复合翼无人机开展外围巡逻、多旋翼无人机实施周边巡逻、无人车以及现场布置的多个固定监控设备实施区域内联合监测。该过程显示了利用异构(旋翼、固定翼、地面)平台、人员和固定节点协同, 可开展无死角监控, 提升巡逻监测的时空密度。在此过程中, 平台自主性的高低将直接决定监控效率(图 13)。

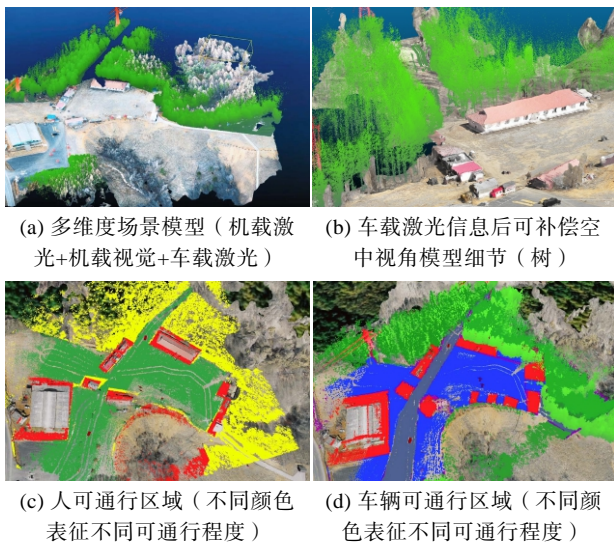


图 12 空地协同多视角、多源勘测

Fig. 12 Air-land cooperatively environmental survey



图 13 事中联合巡逻监控

Fig. 13 Reconnaissance and patrolling

(3) 异常监测: 该环节演示了人工智能算法在安保中的应用, 及其与跨域平台相结合所能起到的效能倍增作用。通过所有节点回传画面进行实时处理, 能够识别异常情况, 如人员跌倒、可疑人员异常行走轨迹(图 14)等, 并通过综合指挥方舱发声、光警报, 提醒警员及时做出应对。该环节演示了智能技术对于整个过程的赋能效应, 其与人机协同调度相结合, 明显提升了现场



图 14 智能异常检测

Fig. 14 Intelligent abnormal behavior detection

处置时效性, 如果能将视频处理功能加载到平台本身, 则对通信的依赖将进一步降低, 从而进一步提升系统的鲁棒性。

(4) 处突取证: 该环节主要展示综合指控系统可对多个平台的载荷系统进行操控, 实现现场取证, 并通过与公安信息网对接确认嫌犯身份, 展示了通过良好的人机交互和信息的无缝对接提升异常事件快速、准确取证的能力。

(5) 嫌犯追踪: 该环节演示嫌疑人员开始逃窜后无人平台实施联合抓捕的能力。示范中, 嫌犯驱车逃离, 综合指挥方舱立刻派遣附近应急无人机前往现场, 锁定并追踪逃犯车辆, 借助无人机回传车辆影像, 结合无人机遥测数据估算嫌犯坐标, 结合指挥员干预派遣无人车提前赶至嫌犯必经点进行拦截(图 15)。该环节显示了空地协同可有效提升异常响应能力。



图 15 空地联合追踪

Fig. 15 Air-land cooperative target tracking

(6) 山林抓捕: 该环节展示嫌犯弃车逃往密林后, 无人车和人员很难快速发现。此时, 综合指挥方舱结合事前勘测数据, 借助固定翼无人机在复杂山林区域内利用视觉信息进行搜捕, 并快速定位嫌犯调配警力实施抓捕(图 16)。

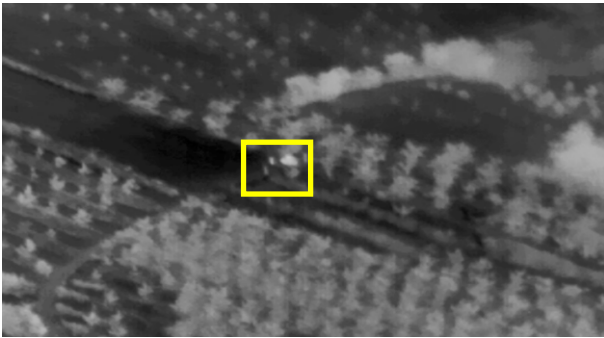


图 16 林中红外搜索

Fig.16 Searching in forest using infrared sensor

上述应用示范过程以实际的公安安保应用为需求，展示了跨域信息融合、协同控制、人机协同决策等跨域协同关键技术，同时也涉及网络组网、自主航行、智能决策等相关技术。结果显示，跨域协同（移动节点+固定节点、空中平台+地面平台、无人平台+人员指挥）有利于形成新的处置能力，并能大大提升任务执行效率。

5 结束语

跨域协同是无人系统发展的高级阶段，是应对日益复杂的环境和使命的重要技术途径与应用手段^[23-25]。随着人工智能等相关技术的快速发展，跨域协同势必将为无人系统的发展带来更多契机，但相关技术进步过程中也必然伴随着重大挑战。从无人系统跨域协同的发展历程和技术特点来看，进行相关规划和推进相关研究应重点关注以下几个关键问题。

首先，坚持需求牵引是开展跨域协同相关工作的重要手段。需求牵引与技术推动是所有技术发展的两个重要方式。跨域协同的最大特点是可通过功能互补性实现效能倍增，而不同领域的应用效能往往存在差异化的评估手段和特点，为此各领域在开展相关规划和技术研发时，要注重与应用场景的紧密结合，坚持需求牵引的总体发展思路。

其次，借鉴系统论、体系论的发展思路，充分发挥学科交叉的特点，开展联合攻关。无人系统本身具备明显的跨学科特点，加之跨域协同应用中往往面临功能节点和应用要素极为丰富的问

题，其本身是一个复杂的大系统，这就要求在开展相关工作时坚持系统化、体系化的研究思路，注重技术发展的同时也要关注技术发展的标准化和实用化。

最后，跨域协同的核心技术仍然在于无人系统的单独节点，而跨域协同也将为无人系统的发展提供更广阔的空间。既然要求跨领域协同，除常规的无人系统所具备的特点外，跨领域应用也为无人系统本身的发展提出了更多要求，从而有望进一步促进无人系统本身的多样化发展，一些面向跨域协同应用的新概念平台/能力势必大量出现。

参考文献

- [1] 李文霞, 毛登森. 马航搜救行动中主要国家的搜救装备综述[J]. 电光系统, 2014, 4: 1-9.
- [2] Dempsey M E. Joint operational access concept[R]. Department of Defense, 2020:1-76.
- [3] 魏代强. 美军开发“空海一体战”概念研究论述[J]. 国防科技, 2013, 34(1): 59-64.
- [4] Robotics 2020 : Multi-Annual Roadmap for Robotics in Europe[R]. Brussels, Belgium: eu Robotics, 2014.
- [5] Winfield A F T, Franco M P, Brueggemann B, et al. euRathlon 2015: A multi-domain multi-robot grand challenge for search and rescue robots[M]. Towards Autonomous Robotic Systems, Sheffield, UK, 2016.
- [6] Roucek T, Pecka M, Íek P, et al. DARPA subterranean challenge: Multi-robotic exploration of underground environments[C]. Modelling and Simulation for Autonomous Systems, Palermo, Italy, October 29-31, 2019.
- [7] Dang T, Tranzatto M, Khattak S, et al. Graph-based subterranean exploration path planning using aerial and legged robots[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(8): 1363-1388.
- [8] Palieri M, Morrell B, Thakur A, et al. LOCUS: A multi-sensor Lidar-centric solution for high-precision odometry and 3D mapping in real-time[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 421-428.
- [9] Stentz T, Kelly A, Herman H, et al. Integrated air/ground vehicle system for semi-autonomous off-road navigation[C]. AUVSI Symposium, Mary's County, Maryland, USA, January 1, 2002.
- [10] He Y Q. Welcome to the Action Project Web site[EB/OL]. 2007-07-19[2020-05-13]. <https://action.onera.fr/node/63>.
- [11] Hsieh M A, Cowley A, Keller J F, et al. Adaptive teams of autonomous aerial and ground robots for situational awareness[J]. Journal of Field Robotics, 2007, 24(11-12): 991-1014.
- [12] Lacroix S, Le Besnerais G. Issues in cooperative air/ground robotic systems[C]. Robotics Research, Hiroshima, Japan, No-

- vember 26-29, 2007.
- [13] He Y Q. Démonstrationssite[EB/OL]. 2012-10-08[2020-05-13]. <https://action.onera.fr/demonstrations>.
- [14] Thamke S, Ax M, Kuhnert L, et al. Control strategies for heterogeneous, autonomous robot swarms[C]. Robot Intelligence Technology and Applications 2012, Gwangju, Korea, December 16-18, 2012.
- [15] Langerwisch M, Wittmann T, Thamke S, et al. Heterogeneous teams of unmanned ground and aerial robots for reconnaissance and surveillance—a field experiment[C]. IEEE International Symposium on Safety, Security, & Rescue Robotics (SSRR), Linköping, Sweden, October 21-26, 2013.
- [16] Nguyen H G, Everett H R. Joint robotics program (JRP)-supported efforts at the Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego[C]. Defense and Security Symposium 2006, Orlando (Kissimmee), Florida, USA, May 12, 2006.
- [17] He Y Q. Sherpa in Short[EB/OL]. 2017-01-31[2020-05-28]. <http://www.sherpa-fp7-project.eu/sherpa/content/sherpa-short>.
- [18] He Y Q. OCEAN2020: The Human Factor in Unmanned Systems Operations[EB/OL]. 2021-05-31[2020-06-03]. <https://ocean2020.eu>.
- [19] Marconi L, Melchiorri C, Beetz M, et al. The SHERPA project: Smart collaboration between humans and ground-aerial robots for improving rescuing activities in alpine environments[C]. 2012 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), TX, USA, November 5-8, 2012.
- [20] Deusdado P, Pinto E, Guedes M, et al. An aerial-ground robotic team for systematic soil and biota sampling in estuarine mudflats[C]. Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference, Lisbon, Portugal November 19-21, 2015.
- [21] He Y Q, Mei Y G. An efficient registration algorithm based on spin image for LiDAR 3D point cloud models[J]. Neurocomputing, 2015, 151(1): 354-363.
- [22] Yin P, Gu F, Li D C. GPU-based heuristic escape for outdoor large scale registration[C]. 2016 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics, Angkor Wat, Cambodia, June 6-10, 2016.
- [23] 张辰, 周乐来, 李贻斌. 多机器人协同导航技术综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(2): 1-8.
- [24] 刘惟恒, 罗阳, 于均杰, 等. 新概念多无人机协同探潜技术发展趋势分析[J]. 无人系统技术, 2020, 3(2): 9-13.
- [25] 张旭东, 孙智伟, 吴利荣, 等. 未来有人机/无人机智能协同作战顶层概念思考[J]. 无人系统技术, 2021, 3(2): 62-68.

作者简介:



何玉庆 (1980–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为无人系统及其自主控制。本文通信作者。



秦天一 (1997–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机系统及飞行控制。



王楠 (1986–), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为无人系统技术情报。

[引用格式] 王伟平, 张尤君, 董超, 等. 海洋无人系统跨域协同观测技术进展[J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 14-21.

海洋无人系统跨域协同观测技术进展

王伟平^{1,3}, 张尤君², 董超^{1,3,4}, 李秋鹏², 郑策^{1,3}, 陈焱琨^{1,3,4}, 郑兵^{1,3,4}

(1. 国家海洋局南海调查技术中心, 广州 510300; 2. 广东省风力发电有限公司, 广州 510300;
3. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广州 510300;
4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519080)

摘要: 无人系统跨域协同观测是海洋观测的发展趋势。对海洋无人系统跨域协同观测这一新兴领域的研究进行了综合评述, 并对未来研究进行了展望。首先, 介绍了传统海洋组网观测技术, 及若干个国内外典型海洋观测网。其次, 从空地协同、空海协同等视角, 对无人系统跨域协同技术进行分析讨论。然后, 简要介绍了海洋观测中的典型应用案例。最后, 概括了现阶段主要技术难点和未来发展趋势。综述表明, 海洋无人系统跨域协同观测在理论和应用方面还需持续开展研究, 特别需要关注的是广域、异构、跨介质协同控制, 复杂海洋环境下的高可靠组网协同通信, 复杂海洋条件下的任务执行和生存能力, 快速机动转场与高效布放回收, 对于实现复杂海洋环境和多样海洋任务的智能、快速、同步、立体观测至关重要。

关键词: 海洋观测; 无人系统; 跨域协同; 协同观测; 无人机; 无人艇; 自主式水下潜器

中图分类号: TP715 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2021)04-14-8

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.4.032

Progress of Cross Domain Collaborative Observation Technology for Marine Unmanned System

WANG Weiping^{1,3}, ZHANG Youjun², DONG Chao^{1,3,4}, LI Qiupeng²,
ZHENG Ce^{1,3}, CHEN Yankun^{1,3,4}, ZHENG Bing^{1,3,4}

(1. South China Sea Marine Survey and Technology Center, Guangzhou 510300, China; 2. Guangdong Province Wind Power Generation Co., LTD, Guangzhou 510300, China; 3. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China; 4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, China)

Abstract: Cross domain collaborative observation of unmanned system is the trend of marine observation. The cross domain collaborative observation of marine unmanned system is reviewed in this paper and the future research is prospected. Firstly, the traditional ocean observation network technology is analyzed, and several typical ocean observation networks are briefly introduced. Then, from the perspective of air-ground and air-sea, the cross domain collaboration of unmanned system is discussed. Furthermore, several typical application cases in ocean observation are summarized. Finally, the main technical difficulties and future development trends are discussed. The review shows that the theory and application of cross domain collaborative observation of marine unmanned system need to be studied continuously. The collaborative control of wide-area, heterogeneous and media-cross, highly reliable network collaborative communication in complex marine environment, task execution and survivability in complex marine conditions, rapid mobile transition and efficient deployment-recovery should be focused. The aforementioned points are very important

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-06-13

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2020B1111010002); 广东省促进经济高质量发展专项资金(GDNRC[2020]018)

for realizing intelligent, rapid, synchronous and three-dimensional observation in hash marine environment and diverse marine task.

Key words: Ocean Observation; Unmanned System; Cross Domain Collaboration; Collaborative Observation; Unmanned Aerial Vehicle; Unmanned Surface Vehicle; Autonomous Underwater Vehicle

1 引言

海洋科学作为一门以观测为主要研究手段的战略科学,其发展在很大程度上依赖海洋观测仪器设备的技术水平。纵观海洋科学史,所有重大突破无一不是技术设备创新的结果。现有的各种海洋观测平台各有优势,但均存在一定的局限性。以无人机(UAV)、无人艇(USV)和自主式水下潜器(AUV)为代表的无人自治平台具备智能、灵活、快速、机动的特点,是海洋观测技术的前沿发展方向。但目前这些平台搭载传感器的类型和数量有限,单一平台难以满足海洋任务多样性的需求。虽然已有不少针对同类型无人自治平台的组网观测研究,但在跨平台、跨域组网并形成机动集成系统方面的应用实践仍处于起步阶段。在这方面抢得先机,对于我国的海洋科技发展和海洋强国建设具有重要意义。

2 传统组网观测技术

国外在组网观测系统方面已经有较为成熟的应用,国内也已经开始这方面的研究,但传统组网技术主要是定点连续观测和单域设备的组网观测,研究内容丰富但观测手段分散,没有做到空中-水面-水下的跨域组网^[1-3]。下面介绍一些主要的传统组网观测系统。

美国综合海洋观测系统是目前世界上业务化程度最高的近岸观测系统,覆盖全美近海海域,由11个区域性海洋观测系统组成,包括535个岸基台站、132个高频地波雷达站、258个浮标或海上平台。近几年,AUV、波浪滑翔器、动物遥测系统也进入观测网,另外还有在全球范围航行的约240艘志愿船。观测数据信息通过卫星或有线通信实时传输至数据中心,6~60 min即可完成观测数据的显示与网络化共享^[4-7]。

加拿大海王星观测系统是目前世界上已业务化运行的规模最大的海底观测网,布放于北美太平洋岸外,海底光电缆长840 km,可传输60 kW的能量和100 GB/s的数据^[8-12]。布放的观测仪器包括宽频地震仪、海底压力计、海流仪、温盐深仪、氧传感器、声学多普勒流速剖面仪、数码相机、浊度计、水听器、荧光计、硝酸盐传感器、气体张力测量仪、方向传感器、流式细胞仪、沉积物捕获器。

澳大利亚综合海洋观测系统可观测洋盆和区域范围的物理学、化学和生物学变化,包括海洋代际变化、气候变率和极端天气、主要边界流和跨流域海流、大陆架、生态系统反应等^[13-17]。该系统由一个注重开放海域的深海和气候节点及五个区域节点组成。五个区域节点涵盖西澳大利亚、昆士兰、新南威尔士、南澳大利亚和塔斯马尼亚等地区。

日本密集型地震海啸海底监测网络系统位于日本以南海域,以地震和海啸的观测预警为首要目的。该系统在退役海底光电缆上建网,大大降低了系统总成本。其最大特色在于监测仪器密集分布,长度300 km的主干光缆上即安装了5个科学节点、20个观测点,观测点之间相距仅15~20 km。每个观测站点可准确地探测地震和海啸活动,并实时将数据传送给日本海洋科学技术中心下属的横滨地球科学研究所^[18-20]。

同济大学负责建设的20 km东海小衢山海底观测网,主要观测东海陆架的海洋物理、化学、生物、地质等变化过程^[21-22]。2012年,“863计划”正式启动了东海浅海海底观测网试验系统集成项目,计划增加观测网的长度,并研发一套适合浅海的海洋环境多参数原位监测节点系统。2013年,小衢山海底观测站升级改造为东海海底观测与海洋仪器装备测试实验平台。

浙江大学牵头研制的摘箬山岛海底观测网络示范系统已在2013年8月11日成功布放,由岸站、叶绿素仪、浊度仪、有色可溶解有机物探测仪等组成,光电缆长1.5 km,水深10 m,接驳2套传感器系统。建成至今仍可正常运行,是目前为止国内应用时间最长的高压供电海底观测网。未来将添加远海传感器通过卫星进行通信和传送数据^[23-26]。

台湾东部海域海缆观测系统由台湾气象局搭建,覆盖台湾东部海域,第一阶段从宜兰市的陆地向外海铺设,总长度约45 km,在缆线末端水深300 m处安装1个科学观测节点。搭载的观测仪器主要有地震与海啸压力计、水听器和温盐仪等,该阶段已于2011年11月开始启用。第二阶段将继续延长海缆,系统全部建成后,海缆总长度将达到250 km^[27-29]。

3 无人系统跨域协同技术

无人智能平台跨域协作能够相互弥补不足,大幅提升综合效能,已经成为欧美等科技强国的共识。作为极具挑战的前沿研究热点,美国海军提出了异构无人平台集群的作战设想^[30-31]中,包含UAV、USV以及AUV在内的三种无人装备^[32]。借助卫星的数据中介,形成空中-海面-水下的立体化、多维度无人集群协同作战。从可靠性以及使用效率的角度出发,依靠UAV与USV的混合集群即可达到预期的任务意图。使用UAV作为预警机,依靠其高速、高空探测视野以及灵活机动的优势,为岸基指挥人员和USV集群提供实时海区态势信息。USV集群则依靠数量优势和良好的搭载能力,配备不同的武器或设备,作为任务的实际执行者^[33]。

目前,多无人智能体组网协同方面的研究多聚集在单一域内,或者空地、空海协同,对空、天、海、潜跨域多智能体组网协同的研究还相对较少。空地、空海协同方面,USV-UAV自主起降、协同方面的研究取得了一些进展,国内上海交通大学、华中科技大学、西安交通大学、西北

工业大学等也在相关领域进行了探索。现阶段,无人系统协同的应用多集中在军事领域,美国在该方面走在前列,空、海、潜协同编队作战的演习,无人水面母舰计划等均有相应的报告。该方面的进展,上海交通大学的张卫东做了非常详细的梳理^[33]。

国内,中国科学院沈阳自动化研究所于2018年提出了多无人平台一体化/融合概念,目标是实现从空中、海面、水体到海底的立体协同观测。在中国科学院海洋先导专项和南海环境变化专项支持下,该所机器人学研究室、水下机器人研究室、海洋机器人卓越创新中心和海洋信息技术装备中心共同开展的空海一体化立体协同观测联合试验在大连圆满完成。这是国内首次组织大规模、跨学科、跨研究室的多平台联合试验,共有五大类型八台套无人装备参加了联合试验,包括沈阳自动化研究所自主研发的“云鹞100”无人直升机、“GZ-01”无人水面艇、“远征二号”AUV、“探索4500”AUV和“海翼”水下滑翔机等。本次试验中,USV在弱通信状态下实现了对“远征二号”的自主跟踪;USV在低空近海复杂环境下,实现了对海上快速移动小目标的精准跟踪和调查取证;实现了指挥中心对多平台实时监控和远程指挥的能力与多平台信息的立体展现。

UAV、USV和AUV的进步为跨域海上无人系统集群的发展奠定了基础,欧美国家通过大量的演习验证了跨域组网协同能力,并在近几年不断取得突破性进展。在实际应用中,无人系统执行的任务多样,面临的环境复杂多变,想要真正具备执行任务的能力,减少人为干预,仍然有诸多的技术难点和挑战亟待解决。

3.1 协同环境感知与数据融合

无人系统集群的环境感知能力是控制与决策的依据。集群中的个体可以看作分布式传感器网络的单个节点,通过信息融合可以获得更广的探测范围、更高的探测精度,从而实现对任务区域的全面感知。按照融合结构的不同可以分为集中式、分布式、混合式^[34-35]。其中,集中式结构将各个节点的传感器数据全部传输至融合中心进行

处理, 这样能最大限度地保证数据的完整性, 融合效果也是理论最优的, 但是对于通信带宽和通信距离提出了极高的要求, 而且系统的可靠性较差。分布式结构每个节点拥有独立的处理单元, 对传感器数据进行初步处理探测数据, 再将结果发送至融合中心, 这样能够缓解通信压力, 提高融合中心的处理效率, 具有较高的可靠性。混合式结构是以上两种结构的组合。按照数据形式的不同可以分为数据层、特征层、决策层融合方法^[36]。其中, 数据层融合直接将传感器接收到的原始数据进行融合; 特征层融合是从传感器数据中提取特征向量进行融合, 大幅缩减数据量, 应用范围较广; 决策层融合将处理得到的高层推论或决策进行融合处理, 常用的有加权决策法(表决法)、经典推理法、贝叶斯推理法、D-S 证据理论等。

无人系统集群多节点功能、空间位置的协同分布为集群态势感知提供了更多可能性, 但是传感器数据具有多源性、异构性和动态性等特点, 随着节点和传感器数目的急剧增多, 数据量呈爆炸式增长, 这些现实因素不仅对通信产生了极大压力, 还对融合算法的计算量提出了巨大挑战^[37]。因此, 针对不同的协同态势感知方式和架构, 需要研究具有较高适用性的融合框架, 提高环境综合感知能力。

3.2 通信自组网

可靠的通信网络是实现无人系统集群实时信息交互传输的基础。多个 UAV 自组网, 建立一个无线移动网络, UAV 之间的通信不完全依赖地面控制站或卫星等基础通信设施, 每个节点兼具收发器和路由器的功能, 节点之间能够相互转发指控指令, 交换感知态势、健康情况和情报搜集等数据。UAV 自组网采用动态组网、无线中继等技术实现互联互通, 具备自组织、自修复能力和高效、快速组网优势, 可满足特定条件下的应用需求^[38-42]。

与 UAV 组网通信技术不同, 跨介质组网通信面临的传递介质, 信道容量和延迟存在差异,

传递信息的距离、速率、带宽、容量和延迟也会有较大的不同。海上无线通信受气候条件和海洋环境影响较大, 通信可靠性不高, 通信带宽窄。海洋卫星通信系统的运营和维护成本高, 且通信带宽受限。岸基移动通信是海洋通信网络的一种有力补充, 具有高速率、低成本的优点, 但是只能适用于小范围的近海海域。水下通信网络的传输带宽和传输速率均远远低于空中通信网络。另外, 不同介质的节点移动速度不同, 这导致通信网络拓扑结构高动态变化、链路质量频繁波动, 这都对组网技术提出了更高的要求和挑战, 其中最主要的是介质访问控制协议和路由协议的设计问题, 以支持不同任务下的传输需求。

3.3 任务分配与协同编队控制

海上无人系统集群的任务分配是指在满足环境约束的条件下, 为各节点分配任务并确定任务时序。按照协同控制框架的不同, 可以分为集中式和分布式任务分配^[43-44]。其中, 集中式任务分配算法求出全局最优的任务分配方案, 但是由于节点数量多, 异构特性突出, 任务类型丰富, 大大增加了求解空间, 导致算法计算量巨大, 实时性不强。分布式任务分配算法可以为中心节点或者通信设施失效引起的单节点故障提供稳定性。针对高对抗、强不确定及时间敏感的环境中随时可能出现的包括任务目标改变、威胁和环境变化、集群成员损伤等突发情况, 需要 UAV 集群具备实时任务调整和重规划的能力, 快速响应外界环境的变化, 提高任务效率和使用灵活性。

在无人系统协同执行某项任务时, 需要编队构型保持相对稳定, 以实现不同平台间的协调运动(如固定队形、协同跟踪、协同围捕等)和稳定的通信连接。为此, 使用的主要方法有领航者-跟随者法、基于行为法、人工势场法、虚拟结构法和基于强化学习的编队控制方法等。传统的编队控制方法需要平台和扰动的精确模型来设计控制率, 但是在实际应用中, 平台和扰动通常具有时变、非线性等特点, 再加上传感器误差、环境扰动等不利因素的影响, 误差模型

的先验信息很难获取，严重限制了传统控制方法的实际应用^[45]。

4 海洋无人系统跨域协同观测

无人系统跨域协同在海洋观测领域具有广泛的应用前景。为了利用 UAV 与 USV 进行环境感知、目标识别、目标跟踪等，葡萄牙里斯本大学研究人员设计了一种协同搜救平台，通过热成像相机、颜色显著特征性地图和生物启发视觉算法协同作业完成海上搜索救援任务^[46]。美国南佛罗里达大学研究人员研究了用于军事、灾害响应等应用的沿海环境监测平台，其中 UAV 搭载视觉摄像头采集完整环境覆盖信息，USV 搭载声呐监测水下环境信息，协同进行沿海环境监测^[47]。针对海洋原油泄漏问题，克罗地亚萨格勒布大学建立了一种由 USV、UAV 和 AUV 组成的跨域协作系统，通过化学传感器和可视化传感器检测海洋原油泄漏情况^[48]。美国佛罗里达大学使用 USV 与 UAV，利用视觉评估方法对海堤与蓄水池结构健康问题监测^[49]。

由于缺乏高效的观测手段，全球已知的海床面积仅占其总面积的 15%，人类仅对水深超过 200 m 海域中的 20% 开展过海床地貌制图，现阶段已知的全球海底精细地形占比不足 1%。因此，海床被称为地球最后的未开发地带，其未探明的面积甚至大于月球或火星。由于电磁传感在海洋中的局限性，世界海洋的水深测量大多必须利用现代声学测绘技术，从水面或水下舰船平台获得。然而，使用单一平台（单艘科考船、USV、AUV）开展走航声学测量的效率极低，严重滞后于人类认知海洋、开发海洋的需求。国际上大规模水面-水下平台协同海洋探测的首次尝试发生于 2018 年对 MH370 疑似失事海域的搜索，属于无人系统跨域协同技术在海底地形地貌观测领域的典型应用。使用 8 台深水型 AUV 搭载水深测量设备近底探测，并通过 8 艘 USV 对水下 AUV 平台提供一对一的水面通信、高精度定位支持，历时 138 天，完成了 12.5 万 km² 海域的搜索，为传统单船

走航作业方式效率的 6.06 倍。目前，该类技术仍多停留在一条大型专业母船支撑一台 AUV 的阶段，且在水面、水下无人平台的自适应组网方面研究甚少，只适合在局部重点区域使用。针对高精度海底地形地貌制图强调测量精度和效率的特点，可以利用海洋跨域组网协同观测技术快速、机动的水面、水下组网观测能力，高效获取所关注海底区域尽量高精度和高分辨率的形貌信息。在深水区域，发挥水下平台近底探测的高分辨率优势和水面平台的高定位精度优势，自适应组网，加速全球未知海床的精细化探测；在浅水区域，利用水面艇吃水浅、快速、机动的优势，实现海陆过度带和岛礁附近海域精细化海底地形地貌数据的有效采集，从而为海洋科学研究、环境保障、防灾减灾等提供关键基础数据。

国内在海洋观测方向的应用多以单艘 USV 携带声学设备开展浅水区水下地形测绘为主，也有部分单一类型无人智能平台组网协同观测的案例，跨域多平台组网协同的案例目前尚未见公开报道。2020 年 9 月，南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海）在万山群岛海域开展多 USV 协同测绘技术应用示范，作业过程分别采用蜂群模式与队列模式，总共完成 1 km² 海域的全覆盖水深测量数据采集，初步验证了 USV 编队协同任务分配、编队控制、编队避障、动力定位控制与设备状态与载荷数据实时处理功能等内容，极大地提高了海洋测绘的作业效率。

在其他海洋观测领域，如中尺度、内波、台风等海洋动力过程观测，赤潮、溢油、风暴潮等海洋灾害灾后监测，海上石油平台、海上风电场等海洋工程现场环境监测等，无人系统跨域组网协同仍以技术探索为主。近年来，我国资助了一批国家级、省部级科研项目，但距离工程应用阶段仍有较大差距。

5 海洋协同观测技术难点和发展趋势

首先，海洋观测任务复杂多变，观测要素覆盖气象、动力、生物、化学、地质等多学科，单

一平台难以胜任横跨空、海、潜三个维度的全要素观测。在海上执行观测任务, 还需具备恶劣海洋环境下的作业能力, 以提高台风、风暴潮等场景的数据采集能力。

同时, 部分海洋观测任务在时间、空间维度提出了巨大的挑战。例如, 次中尺度现象空间尺度小、生命周期短, 传统观测手段难以捕获, 需要一种可快速抵达、可快速展开的观测手段提高捕获概率; 全球已知海床仅占其总面积的 15%, 其未探明的面积甚至大于月球或火星的面积, 已知的海底精细地形占比更是不足 1%, 现有单船走航作业方式效率太低。

最后, 不同观测平台 (USV、UAV、AUV) 搭载的载荷可能存在差异 (载荷类型、载荷指标), 并且由于观测平台在续航力、航速、通信距离、最大观测高度/深度等技术指标方面的差异, 各平台采集的数据在时间分辨率、空间分辨率等方面必然不一致, 须经过数据预处理、同化、融合等步骤统一到同一标准下, 才能开展有效的科学分析。

上述应用难题, 对观测系统的能力提出了非常高的要求, 具体可归纳为如下三个方面:

(1) 具备在大空间尺度内开展快速、立体、同步、高分辨率海洋观测的能力;

(2) 具备应对复杂环境、多样观测等任务场景的能力;

(3) 具备智能、高效、准确地采集、处理和分析观测数据的能力。

针对应用提出的技术难点, 未来须重点关注:

(1) 广域、异构、跨介质无人系统组网协同控制, 包含跨平台信息感知与融合、任务自适应动态调度、集群动态拓扑优化等, 以应对平台、载荷参数特性差异, 任务执行过程中可能出现的观测对象变化、平台失效等问题, 提高组网协同的效率, 保证观测的有效性;

(2) 复杂海洋环境下的高可靠组网协同通信, 包括广域跨介质通信组网架构、适应任务场景的传输资源分配优化、复杂海洋环境下的高可靠传输链路等问题, 为协同观测提供通信基础网

络支撑;

(3) 复杂海洋条件下无人系统的任务执行和生存能力, 须提升系统模块化、通用性等方面的能力, 保证可执行任务的多样性, 并通过水面/水下协同、可潜 USV (兼具水面、水下作业能力) 等进一步优化上述能力;

(4) 无人系统快速机动转场与布放回收, 可研制专业母船作为无人系统指挥控制终端, 提供任务调度、数据管理、通信组网、维修保养、成果展示等方面的支撑, 并通过加装专业化的甲板机械、控制终端等实现无人系统的高效布放、回收。

6 结束语

本文针对海洋无人系统跨域协同观测技术, 从传统组网观测技术入手, 分析了现有海洋观测系统的特点和局限性。随后, 梳理国内外无人系统跨域协同技术进展, 并结合 MH370 搜救等进行案例分析。最后, 结合海洋观测任务特点、时效性、平台性能等因素, 归纳海洋观测系统未来发展须重点解决的关键技术问题。海洋观测任务复杂多变, 涉及学科繁多、作业环境恶劣, 传统技术手段局限性较强。现阶段, 无人系统跨域组网观测发展迅速, 但在智能化、适应性、可靠性等方面仍存在很大的提升空间, 它是提升海洋观测能力的一种重要手段。

参考文献

- [1] Benson A, Brooks C, Canonico G, et al. Integrated observations and informatics improve understanding of changing marine ecosystems[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 5: 428.
- [2] Canonico G, Buttigieg P, Montes E, et al. Global observational needs and resources for marine biodiversity[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 1-20.
- [3] Miloslavich P, Seeyave S, Muller-Karger F, et al. Challenges for global ocean observation: The need for increased human capacity[J]. *Journal of Operational Oceanography*, 2019, 12: 137-156.
- [4] Joyce B, González-López J, Westhuysen A V D, et al. U.S. IOOS coastal and ocean modeling testbed: Hurricane-induced winds, waves, and surge for deep ocean, reef-fringed islands in the caribbean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, 124:

- 2876-2907.
- [5] Kerr P, Donahue A, Westerink J, et al. U.S. IOOS coastal and ocean modeling testbed: inter-model evaluation of tides, waves, and hurricane surge in the Gulf of Mexico[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(9): 4633-4661.
- [6] Willis Z. National ocean observing systems in a global context[J]. *Coastal Ocean Observing Systems*, 2015: 11-25.
- [7] 王伟, 高艳波, 齐连明, 等. 我国业务化海洋观测发展研究——借鉴美国综合海洋观测系统[J]. *海洋技术学报*, 2014, 6: 34-39.
- [8] Barnes C. Transforming the ocean sciences through cabled observatories[C]. *IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA*, March 1, 2009.
- [9] Delaney J R, Chave A D. NEPTUNE: A fiber-optic 'telescope' to inner space[J]. *Oceanus*. 2000, 42(1): 10-11.
- [10] Farrugia J, Davis E, Heesemann M, et al. Non-standard applications of seismic data from the Ocean Networks Canada NEPTUNE offshore cabled observatory array[C]. *American Geophysical Union, Fall Meeting*, 2019.
- [11] Thomson R, Fine I, Rabinovich A, et al. Observation of the 2009 Samoa tsunami by the NEPTUNE-Canada cabled observatory: Test data for an operational regional tsunami forecast model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(11): 1-5.
- [12] Verlinden C, Heaney K, Schonau M C, et al. Passive ocean sensing and soundscape analysis of the Juan de Fuca plate using the Ocean Networks Canada NEPTUNE Array[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 144(3): 1955.
- [13] Chen M, Feng M. A long-term, gridded, subsurface physical oceanography dataset and average annual cycles derived from in situ measurements off the Western Australia coast during 2009–2020[J]. *Data in Brief*, 2021, 35: 106812.
- [14] Eriksen R S, Davies C H, Bonham P, et al. Australia's long-term plankton observations: The integrated marine observing system national reference station network[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 161.
- [15] Lara-Lopez A, Moltmann T, Proctor R. Australia's Integrated Marine Observing System (IMOS): Data impacts and lessons learned[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2016, 50: 23-33.
- [16] Lynch T P, Morello E B, Evans K, et al. IMOS national reference stations: A continental-wide physical, chemical and biological coastal observing system[J]. *Plos One*, 2014, 9(12): e113652.
- [17] McCosker E, Davies C H, Beckley L E. Oceanographic influence on coastal zooplankton assemblages at three IMOS national reference stations in western australia[J]. *Marine Freshwater Research*, 2020, 71(12): 1672-1685.
- [18] Kawaguchi K, Kaneda Y, Araki E. The DONET: A real-time seafloor research infrastructure for the precise earthquake and tsunami monitoring[C]. *IEEE OCEANS Conference, Kobe, Japan*, April 8-11, 2008.
- [19] Kawaguchi K, Kaneko S, Nishida T, et al. Construction of the DONET real-time seafloor observatory for earthquakes and tsunami monitoring SEAFLOOR OBSERVATORIES[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.
- [20] Kimura T, Mikada H, Araki E, et al. Seismic velocity monitoring using ambient noise observed by DONET Seismometers in the Nankai Trough[C]. *The 20th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics*, Chiba, Japan, May 24, 2016.
- [21] 许惠平, 张艳伟, 徐昌伟, 等. 东海海底观测小衢山试验站[J]. *科学通报*, 2011, 56(22): 1839-1845.
- [22] 张艳伟, 范代读, 许惠平. 东海海底观测网小衢山试验站记录的 2010 年智利海啸信号分析[J]. *科学通报*, 2011, 56(32): 2732-2740.
- [23] 刘放. 摘箸山岛智能海洋观测网信息系统的设计与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [24] 瞿逢重. 摘箸山岛海洋立体观测网络[C]. *第二届深海研究与地球系统科学学术研讨会论文集*, 上海, 2012 年 7 月 2-4 日.
- [25] 王玉红, 孙瑜霞. 摘箸山海洋科技示范岛现状及发展概述[J]. *科技资讯*, 2018, 16(14): 222-224.
- [26] 王钰岩. 海底观测网科学仪器插座模块结构优化与观测平台研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [27] Chen C, Chan H C, Chang R I, et al. Data demonstrations on physical oceanography and underwater acoustics from the Marine Cable Hosted Observatory (MACHO)[C]. *IEEE Oceans Conference, Yeosu, South Korea*, May 21-24, 2012.
- [28] Hsiao N, Lin T, Hsu S K, et al. Improvement of earthquake locations with the Marine Cable Hosted Observatory (MACHO) offshore NE Taiwan[J]. *Marine Geophysical Research*, 2013, 35(3): 327-336.
- [29] Hsu S, Lee C S, Shin T, et al. Marine Cable Hosted Observatory (MACHO) project in Taiwan[C]. *Symposium on Underwater Technology Workshop on Scientific Use of Submarine Cables Related Technologies*. Tokyo, Japan, April 17-20, 2007.
- [30] Steinberg M. Intelligent autonomy for unmanned naval systems[C]. *Proceedings of SPIE, Florida, USA*, April 17-21, 2006.
- [31] 李磊, 王彤, 蒋琪. 从美军 2042 年无人系统路线图看无人系统关键技术发展动向[J]. *无人系统技术*, 2018, 1(4): 83-88.
- [32] Salamon A, Houston D, Drewes P, et al. Increasing situational awareness through the use of UxV teams while reducing operator workload[C]. *AUVSI Unmanned Systems North America Conference, Washington DC, USA*, August 10-13, 2009.
- [33] 张卫东, 刘笑成, 韩鹏. 水上无人系统研究进展及其面临的挑战[J]. *自动化学报*, 2020, 46(5): 847-857.
- [34] 何友. 多传感器信息融合及应用 [M]. 2 版.北京: 电子工业出版社, 2007.
- [35] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜. 多源信息融合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [36] Hall D, Llinas J. Hand book of Multisensor data fusion [M].

- Boca Raton, USA: CRC press, 2001.
- [37] 刘惟恒, 罗阳, 于均杰, 等. 新概念多无人机协同探潜技术发展趋势分析[J]. 无人系统技术, 2020, 2(3): 9-13.
- [38] 卓琨, 张衡阳, 郑博, 等. 无人机自组网研究进展综述[J]. 电信科学, 2015, 31(4): 134-144.
- [39] Fawaz W, Atallah R, Assi C, et al. Unmanned aerial vehicles as store-carry-forward nodes for vehicular networks[J]. IEEE Access, 2017, 5: 23710-23718.
- [40] 樊洁茹, 李东光. 有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J]. 无人系统技术, 2019, 2(1): 39-47.
- [41] 李樾, 韩维, 仲维国. 有人机/无人机协同系统航迹控制关键技术浅析[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 22-28.
- [42] 张旭东, 孙智伟, 吴利荣, 等. 未来有人机/无人机智能协同作战顶层概念思考[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 62-68.
- [43] Korsah G, Stentz A, Diaz M. A comprehensive taxonomy for multi-robot task allocation[J]. The International Journal of robotic Research, 2013, 32(12): 1495-1512.
- [44] Korsah G. Exploring bounded optimal coordination for heterogeneous teams with cross-schedule dependencies[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2011.
- [45] 谢伟, 陶浩, 龚俊斌, 等. 海上无人系统集群发展现状及关键技术研究进展[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 7-17.
- [46] Mendonça R, Marques M M, Marques F, et al. A cooperative multi-robot team for the surveillance of shipwreck survivors at sea[C]. IEEE OCEANS Conference, Monterey, USA, September 19-23, 2016.
- [47] Lindemuth M, Murphy R, Steimle E, et al. Sea robot-assisted inspection[J]. IEEE Robotics Automation Magazine, 2011, 18(2): 96-107.
- [48] Vasilijevic A, Calado P, López-Castejón F, et al. Heterogeneous robotic system for underwater oil spill survey[C]. IEEE OCEANS Conference, Genova, Italy, May 18-21, 2015.
- [49] Shojaei A, Moud H I, Razkenari M A, et al. Feasibility study of

small unmanned surface vehicle used in built environment assessment[C]. Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE) Annual Conference, Orlando, USA, May 19-22, 2018.

作者简介:



王伟平(1966-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为海洋无人智能装备研制与应用、海洋测绘。



张尤君(1966-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为海上风电技术开发与应用。



董超(1982-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为海洋无人智能装备研制与应用。本文通信作者。



李秋鹏(1981-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为海上风电网络通信技术开发与应用。



郑策(1991-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为水下目标定位与跟踪。



陈焱琨(1982-), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为海洋声学。



郑兵(1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为计算机视觉与图像处理。

[引用格式] 王 涛, 郭欢祺, 余华煌. 基于组织行为学的跨域协同机理研究[J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 22-29.

基于组织行为学的跨域协同机理研究

王 涛, 郭欢祺, 余华煌

(中山大学智能工程学院, 广州 560006)

摘 要: 未来突发事件凸显了复杂动态环境下的跨域无人系统协同作战需求, 不仅要拓展作战地理空间域, 多个领域之间合作与协调、综合行动互补, 还亟需推动无人系统任务执行力量要素走向“跨域融合”, 应对内外环境的多域冲突威胁。针对跨域融合中存在的多域协同工作机制以及系统架构设计等重要命题, 为未来装备体系跨域协同提供基础理论模型。基于组织行为学原理, 将跨域作战中的协同分为单域个体、单域组织和跨域协同体系层次。从人类管理的组织行为和结构角度对跨域协同的相关原理进行对照映射研究, 并通过分析美军在一些战争中形成的多域协同作战行动方案, 构建一种促进协同行为组织的机制。通过结合美国国防部体系架构设计方法给出相应系统视图、作战视图和能力视图设计。通过初步探索构建一种跨域协同的基础理论, 为多无人系统跨域协同工作提供建模基础。

关键词: 跨域协同; 组织行为; 体系结构; 组织结构; 映射; 机理研究

中图分类号: N945.23

文献标识码: A

文章编号: 2096-5915(2021)04-22-8

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.4.033

Research on Cross-Domain Cooperation Mechanism Based on the Organizational Behavior Theory

WANG Tao, GUO Huanqi, YU Huahuang

(School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 560006, China)

Abstract: In future emergencies, there is no template or established task target list that can be directly used for reference. It highlights the requirements of cross domain cooperative operation of unmanned system in complex dynamic environment. It is not only necessary to expand the operational geospatial domain, cooperation and coordination among multiple fields, and comprehensive action complementation, but also to promote the elements of mission execution force of unmanned system from "joint" to "integration", to deal with the threat of multi domain conflict in internal and external environment. In order to study the cross domain cooperation mechanism of future equipment system, based on the principle of organizational behavior, the cooperation in cross domain operations into single domain individual, single domain organization and cross domain cooperation system levels are provided in this paper, and the related principles of cross domain cooperation from the perspective of organizational behavior and structure of human management are studied. Through the analysis of the multi domain cooperative operation plans formed by the US military in some wars, a mechanism to promote the cooperative behavior organization is constructed. The corresponding system view, operation view and capability view are designed by combining with the Department of Defense Architecture Framework (DoDAF) architecture design method. Through the preliminary exploration of this article, a basic theory of cross-domain collabo-

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(61975151)

ration is constructed to provide a modeling foundation for the cross-domain collaboration of multiple unmanned systems.

Key words: Cross Domain Collaboration; Organizational Behavior; Architecture; Organization Structure; Mapping; Mechanism Study

1 引言

陆海空天运载工具的综合运用将会是 21 世纪重要的无人系统作业形式, 城市以及野外复杂环境下的各种高低强度突发事件, 在泛在信息网络体系的分布式支撑下, 通过多域分布无人系统要素实现整体联动聚能, 运用高强度机动型无人装备力量, 实现多任务目标的定向精确协同运行管控, 而无人系统作为未来任务执行的主体, 实现复杂环境下的无人系统多域协同合作对于未来联合作业战胜挑战人类作业极限, 保卫国家利益和人民生命财产安全至关重要。

2014 年 6 月 23 日, 美国陆军参谋长战略研究小组特大城市概念工作组撰写了一份城市战的专题报告——《特大城市与美国陆军: 为复杂和不确定的未来做准备》。2015 年美国空军的《空军未来作战概念》中强调了多域指挥与控制在空军未来作战任务中的重要作用^[1-2]。2017 年 2 月 24 日, 美陆军与海军陆战队联合发布《多域战: 21 世纪合成兵种》白皮书。2017 年 4 月 11~13 日, 洛·马公司在位于弗吉尼亚州的创新中心举行“多域战”演习, 探讨了如何跨域指挥和控制, 提高美军空中、太空以及网络领域的协同操作能力, 重点研究了如何使作战人员更好地嵌入到决策回路中。2017 年 5 月 31 日~6 月 1 日, 法国舰艇建造局 (DCNS) 实现 3 种无人系统的跨域协同作战, 利用 I4@ Drones 任务系统指控无人机、无人艇和无人潜航器协同, 成功探测、识别和摧毁一艘目标艇, 在欧洲尚属首次跨域无人系统协同作战实验。2019 年 8 月 23 日, 美国陆军协会地面战研究所发文《城市化及特大城市对美国陆军的影响》, 分析了特大城市对美陆军构成的挑战, 强调陆军需要加强其跨域协同的独特能力, 这些说明美国军队在迅速加强城市环境下跨域协

同操作能力。

多域作战概念及理论^[3-5]以及其中所存在的一些技术性挑战问题已经得到很多研究人员的关注。高岚岚等^[6]利用面向服务的体系架构设计思想及 B/S 与 C/S 混合结构模式提出一种跨域协作的组织架构。陆宏泽等^[7]提出了一种基于指控系统软件架构和指控信息流的天空地多域体系作战的指挥控制系统构建方法。刘永才^[8]指出了未来武器装备发展对全域化体系化等的发展要求。David 等^[9]强调了在多域作战中对人工智能和机器学习能力的要求。Eliahu 等^[10]探讨了多域作战的一种指挥架构。胥秀峰等^[11]提出采用 OPM 进行包括多域战、马赛克战的作战概念建模框架构建方法。张佳琦等^[12]针对多域作战中的下多源异类信息融合面对的挑战以及融合智能化处理的关键技术进行了阐述。阳东升等^[13]从宏观尺度上的指挥控制 (2C) 活动一般过程 PREA 环, 对作战多域性进行跨域作战运行及冲突协调管理的模型进行了研究。龚旻等^[14]对陆战的陆空协同装备体系构建进行了研究。跨域或多域协同在星际探测上同样具有新的应用, 王涛^[15]对火星应用陆空跨域协同的技术进行了探索研究。王彤等^[16]对美国的快速轻量自主项目发展情况进行了总结研究, 阐述了无人系统分布式协同作战应用研究价值。

跨域思想将战场分为多个域, 在每个不同场域确立了不同目标, 实现多域作战系统的有效融合, 最终目的是逐步渗透和瓦解敌方攻防手段, 在对抗作战中获胜。杜普伊^[17]提到了两个不同维度的跨域协同需求: 跨战略场域与跨组织场域。管理科学中的组织行为学是研究组织中的不同角色所表现出的行为与态度的系统科学与工程, 提升组织行动的效率, 直至在更高维度上实现帕累托最优。在武器装备协同作战的体系架构研究中不乏从系统工程的角度建构协同作战场景乃至延

伸到军兵种协同的研究案例^[18]。原有的相关研究少有涉及跨域协同的组织机理，本文着眼于管理科学与工程中的组织行为学原理，将跨域作战中的协同分为单域个体、单域组织和跨域协同体系层次，从人类管理的组织行为和结构角度对跨域协同的相关原理进行对照映射研究，并通过分析美军在一些战争中形成的多域协同作战行动方案，构建一种促进协同行为组织的机制，通过使用 DoDAF 工程框架思想进行体系结构设计。

2 跨域协同与组织行为的映射关系

2.1 跨域协同合作的特征分析

考虑跨域作战场域的协同时，以与蓝方（作战目标方）的接触为标准，从浅到深将可以分为七个场域：战略支持区域，作战支持区域，战术支持区域，邻近区域，深入机动区域，作战交火区域与战略交火区域。

支持区域负责部署和控制包括通信、核、空间、网络等基础设施，设有保存火力和打击能力的基地，保持和己方的联络，是作战后方。

邻近区域和深入机动区域是红蓝对抗即将进行物理接触的区域，通常会发生争夺物理空间控制权的行为，领导者需调动能力尽可能闯入该区域。

交火区域是红方物理打击区域，包括空间能力和网络能力的非常规打击能力应用的地方，这种打击可能受到政策限制。

场域的边界跟随作战环境和敌我作战能力发生变化。

组织场域的协同涉及陆、海、空、天地理四个维度的协同，电磁网络不受地理维度限制，这里仅考虑自顶而下四个作战地理空间的协作过程。从军种角度考虑协作的思路古已有之。

在不同作战任务中，需要不同作战地理域军兵种的重点协同。陆地反导作战中，流程见图1，需要陆军力量和空间力量或空军力量的协同合作。在导弹来袭前，天基预警系统或空中预警机、陆地探测雷达会同步侦察给出预警，多空间维度

的预警探测能提高预警准确度，获得更多预警准备时间做出针对性行动；确认目标后进行拦截，根据来袭目标飞行段的不同采用远程打击、中段拦截，或者末端拦截方案，并及时对拦截效果进行评估，决定是否触发多层多次拦截；拦截成功或失败的消息会通过态势感知网络同步到战场指挥官处，由指挥官决定下一步行动。

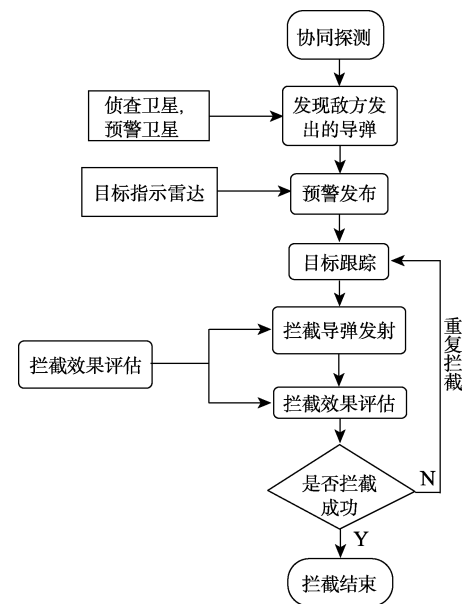


图1 陆地反导作战流程示意图

Fig. 1 Scheme of land-based anti-missile

宏观角度上多域战要求逐步瓦解敌人的防御和战斗系统，在战场上取得机动自由，从而完成击败敌人的目标；微观上涉及具体队伍和组织的组织，有三个相互关联的原则^[19]。

(1) 校准战场态势，即通过信息网络感知己方和敌方兵力动向的能力；

(2) 多域编队，即多军兵种配合进行同一战斗的能力；

(3) 融合，即信息同步，任务目标相同，实现紧密配合。

2.2 跨域协同与组织行为的映射关系

组织行为学有三个研究层次：个体，群体，组织架构。除了静态研究，还有动态的个体决策与激励，群体行为，组织协同中的冲突、谈判、沟通等。将跨域协作关系与不同组织层次之间建

立对照映射关系, 再跟随行动状态变化流在协同体系中添加不同的协同辅助要素, 从而建立基于组织行为学原理来研究跨域协同合作的一种基础理论, 用于指导跨域协同合作的体系架构设计。

表 1 从组织行为学的个体层次的基本要素出发, 对应于跨域协同中单作战域的要素要求构建了映射表, 从而对构建跨域协同机制提供单作战域装备系统的能力要素进行了明确。表 2 从群体层次建立组织行为学要素与跨域协同作战机制要素的映射关系。

表 1 个体层次的组织行为与跨域协同要素映射表

Table 1 Cross-domain cooperation mapping organizational behavior in personal level

组织行为学要素	跨域协同作战要素
胜任各地理作战空间内不同职能的单兵	单域系统满足域内作战需求
组织激励理论, 依据个体能力和行为表现的组织内晋升	单地理空间域内作战能力优势评价以及角色和任务目标的变换逻辑
知觉及心理要素, 基于个人经验、爱好、背景等对周边信息进行收集和处理, 具有片面性	协同作战的单域认知能力, 巩固和增强取得控制权区域的控制能力, 为征服和控制目标区域取得优势
目标设置理论, 目标越具体, 激励效果越好, 目标从架构到组织到个人逐层确立, 减少任务传达层次, 缩减管理成本的作用	跨域协同的任务式指挥, 各单作战域协同之间只有目标任务, 单作战域系统发挥主观能动性, 寻求资源解决问题
反馈与评估, 将士回传任务数据, 参与反馈与评估的过程, 提高作战积极性和效率	跨域协同所要的单作战域内的效能评估, 将任务完成度和完成能力进行评估, 提供跨域协同任务能力综合评价

表 2 群体层次的组织行为与跨域协同要素映射表

Table 2 Cross-domain cooperation mapping organizational behavior in the view of group

组织行为学要素	跨域协同作战要素
组织的形成, 团队的职能	单域装备系统的组织构型, 不同地理作战域内的不同职能团队, 进行单域内群体装备的协调融合
命令型组织和任务型组织, 集中式和分布式的指控关系	单作战域内群体内部的指挥链路构建以及作战目标的一致性
群体内的信息传递	跨域协同作战的信息同步、态势同步、跨域一体信息系统的分发效率和响应速度
冲突的解决, 任务型冲突和关系型冲突, 维持组织创造性, 提高工作效率, 增加联系渠道	单地理作战域内的群体之间行为动作协调, 跨域协同任务目标讨论, 解决单作战域内和多域协同的行为一致性和目标一致性

最后, 通过表 3 对跨域协同的组织架构和组织行为学的组织架构设定建立相应的映射关系。

表 3 组织行为与跨域协同的组织架构设计映射表
Table 3 Cross-domain cooperation mapping organizational behavior in the view of organizational structure

组织行为学要素	跨域协同作战要素
组织架构的专业化和部门化	跨域协同作战做到按需协同, 以完成任务为目标进行跨域协同合作, 适应不同任务和战场要求, 跨域协同形式具备模块化, 可根据任务需求进行组合
组织的文化内涵、目标价值认同, 正规化	跨域协同中减少或者不用中心化的协同合作, 多域协同中的每一个作战域能力为统一的任务目标独立实现各自的任务价值
组织架构的权力分配模式, 集权和分权	跨域协同作战中要有各单作战域在 OODA 环中的角色及其阶段任务目标的确定策略或方法
面对未来发展和冲击挑战的组织规划	跨域协同作战中应对战场攻防态势的变化分析, 有相应的动态任务重视方法

以上通过三个层面建立组织行为学与跨域协同作战之间的映射关系, 从而为跨域协同作战的装备以及军兵种体系设计架构提供理论基础。

3 跨域协同的体系结构视图设计

跨域协同就是一个体系工程问题。体系结构由多个系统工程组成, 其生命周期中, 多个系统互相配合, 共同完成一个目标。体系结构建立的主要过程是, 将需求分配到多个松散耦合的系统, 协调各个系统各自的活动与互动, 直到整个生命周期可以运转。本文在 DoDAF 体系下建立跨域协同运用的武器装备系统工程, 即在一定的战略指导、作战指挥和保障条件下, 为完成一定作战任务, 构建的由功能上相互联系、相互作用的各种武器装备系统组成的更高层次系统。本文主要涉及全视图、作战视图和系统视图的设计。

3.1 跨域协同作战视图

需要开发的作战视图有高级作战概念图 (OV-1) 和作战组织关系图 (OV-4), 给定作战概念图, 高级作战概念图明确作战中的个体和联系

关系，作战组织关系图进一步描述多域战中的指挥关系。

OV-1 针对单独的战役行动及战役的准备工作给出顶层设想，如图 2 所示。其主要元素包括最高指挥当局、联合作战司令部、信息网络、作战编队、战场后方、敌方力量，明确了战役中的重要概念，强调了政令分离的军事指挥链。

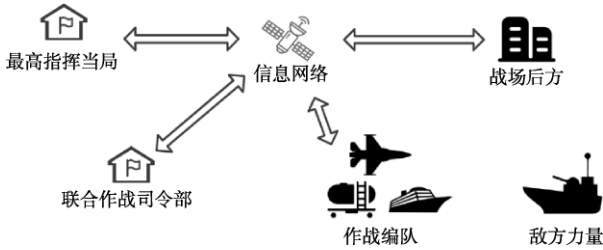


图 2 高级作战概念图 (OV-1)

Fig. 2 High-level operational concept graphic (OV-1)

从组织行为学来看，发布作战任务，进行“任务式指挥”的作战思想，将任务分解为作战目标/时间限制和所用方法，将采取方法的自由交给下属兵士，目标明确且形成了良好的分权基础；组织的反应更加迅速，更适应瞬息万

变的战场环境^[20-21]。

以美军军令系统为参考，对作战组织关系图内部结构细化如图 3 所示，明确了军政系统和军令系统及其职责。其中，军政系统承担支援职责，军令系统承担作战职责。参谋联合会给最高指挥当局提供建议，最高指挥当局拥有对远程威慑和联合作战司令部的直接控制，并统筹军政系统的训练融合、装备资源、指派等工作。作战时，指挥以联合作战司令部为中心，军政系统对部队只有行政控制权。概念图中的信息网络泛化为网络攻防与作战信息支援两部分。

作战信息与资源流视图 (OV-2) (图 4) 说明了陆海空天信息域对其他维度战场的辅助作用：通过探测得到敌方信息，通过传感器和网络收集己方态势信息，辅助作战判断。同时，信息流稳定运行，需要保障系统的跟进和维护。对此，美军建立全球信息栅格来保障信息流的稳定运行。应急计划，作战反馈系统保证在信息可以沿指挥链从下级传递到上级，让军队更适应于节奏紧张变化迅速的作战环境。

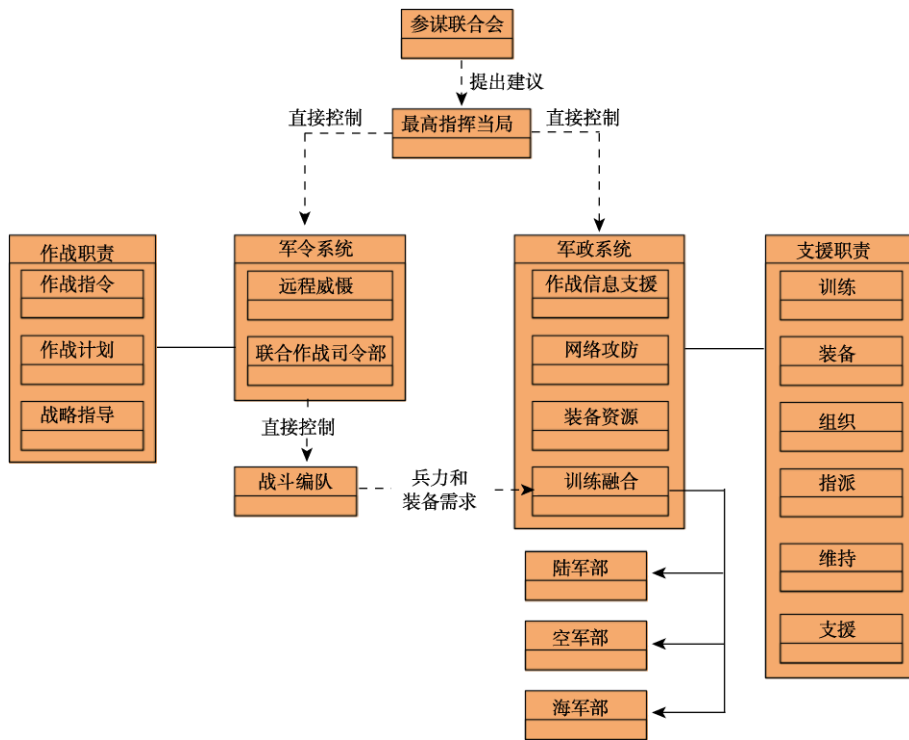


图 3 跨域协同作战组织关系图 (OV-4)

Fig. 3 Operational organization relationship view (OV-4)

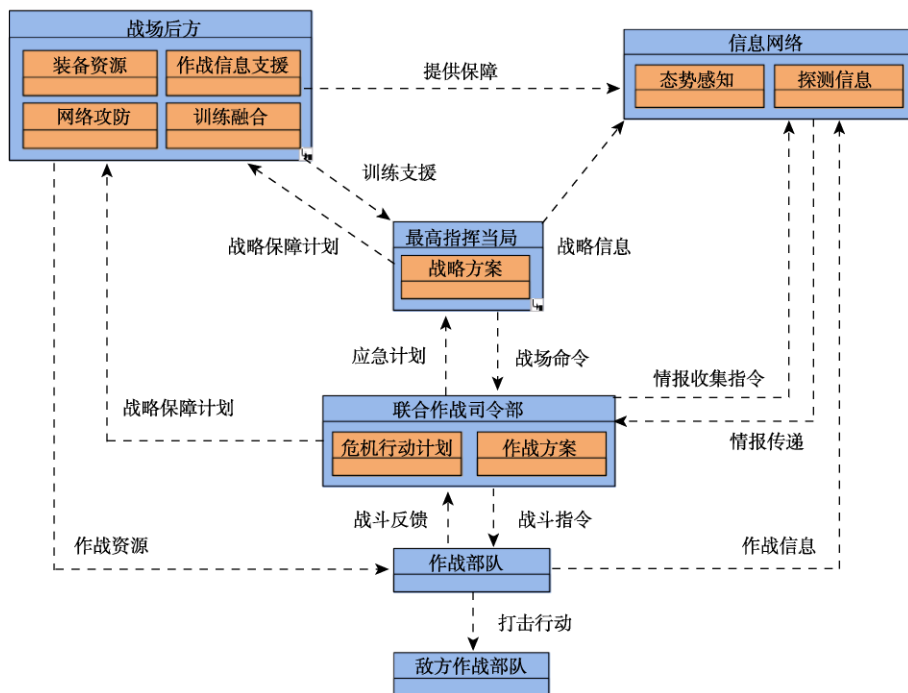


图 4 作战信息与资源流视图 (OV-2)

Fig. 4 Operational information flow chart (OV-2)

3.2 跨域协同系统视图

系统视图包括系统资源流描述 (SV-2), 系统结构与功能分配 (SV-4), SV-2 在系统层面上描述了体系可以分成哪几个系统, 分别实现什么功能, SV-4 指出了系统之间交换的资源与信息, SV-10b, SV-10c, 从各个系统的角度出发对作战进行描述; SV-5 则将作战视图和系统视图对应起来。先将体系拆分成子系统, 描述系统具有的功能, 再找到接口和耦合, 进行迭代开发的开发方式。此开发方式保证系统发展可满足对系统的能力要求。按照作战视图中梳理出的作战流程设想, 图 5 明确了多域作战结构体系中的六个子系统及其主要功能。

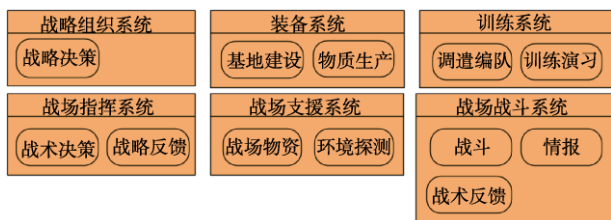


图 5 系统构成与功能分配 (SV-4)

Fig. 5 System structure and functional assignment (SV-4)

图 6 描述系统之间信息和资源传递的路径与信息传递依赖的技术。情报中心为整个作战体系的信息节点, 利用空间技术保持六大系统的联通及态势同步; 六大系统之间, 装备系统向战场支援系统和训练系统提供物资, 训练系统向战场战斗系统提供军队, 战场支援系统向战场战斗系统提供战场物资; 战场指挥系统利用无线电技术与战场支援系统和战场战斗系统通信, 保持消息

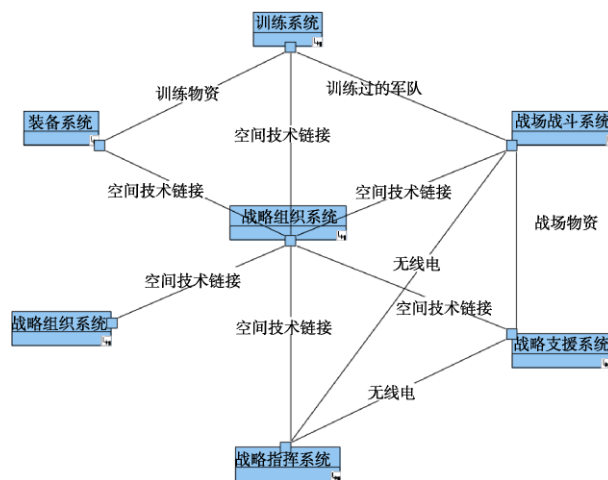


图 6 系统资源流描述 (SV-2)

Fig. 6 Description of system resource flow (SV-2)

同步。

战略通信系统受战略组织系统领导，主要由国防通信系统、国防卫星通信系统、最低限度应急通信网等组成，使用有线通信、无线电通信、卫星通信和光纤通信等多种手段，保障命令下达的速度和达到率。

图 7 描述了六大系统的互动过程和接口，按时间顺序说明了任务在系统中的自顶而下拆解和执行的过程，执行过任务的反馈会引出下一步任

务的执行。

战略规划形成后，分成三部分传达到装备、训练、战场指挥三大系统。三大系统按战略计划拆解和执行任务，给战略系统执行情况反馈，再将资源与信息给到有需求的战场支援和战场战斗系统。战斗过程中，战场战斗系统和战场支援系统保持与指挥系统的连接，以协调物资和人员；战斗结束后，战场指挥系统将任务完成情况反馈到战略指挥层。

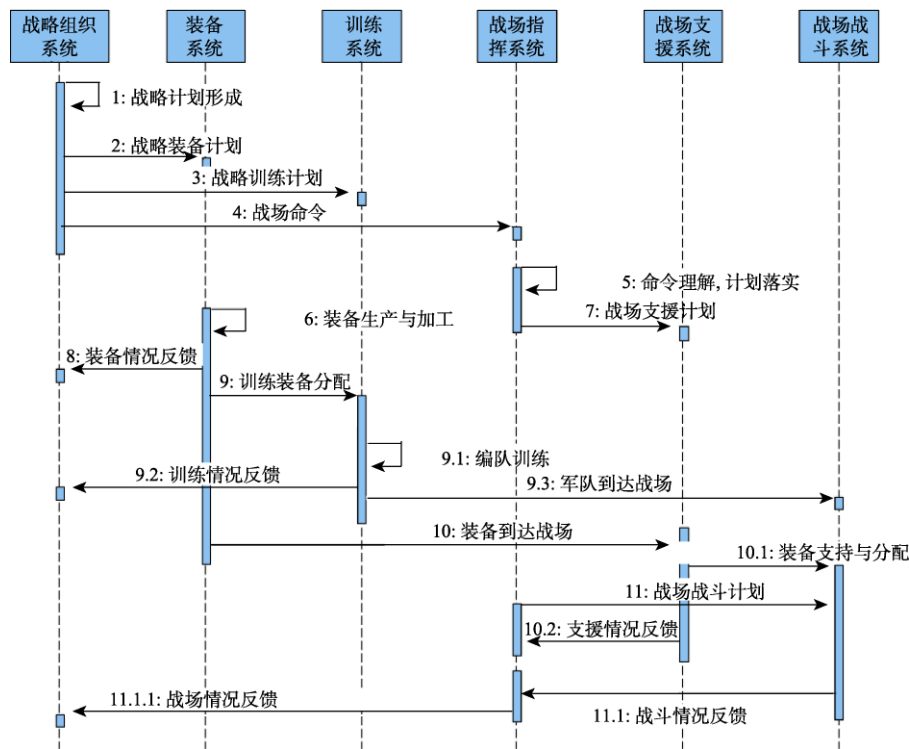


图 7 系统状态转换描述(装备系统) (OV-10)

Fig. 7 Transmission of system situation for the equipment (OV-10)

4 结 论

本文针对跨域协同中所具有的多域协同合作特点，在组织管理上从个体、群体以及组织架构顶层三个维度分别进行组织行为学原理与跨域协同作战要素映射关系构建，从而从管理科学与工程的角度对跨域协同作战的基本原理进行了阐述明确，进一步根据跨域协同作战这样一个系统的系统设计概念，采用体系架构的研究方法，依托 DoDAF 体系设计框架开展系统视图和作战视图

的体系结构设计，为跨域协同机理的顶层架构设计提供一种初步设计参考，通过这些视图的构建能够明确跨域协同机制的核心要素以及他们之间的组织关系和信息流程。得出了以下主要结论。

(1)提出了一种基于组织行为学原理的跨域协同机制的研究方法，为构建相应的跨域协同作战体系从单地理空间域装备需求到多域协同的组织架构问题，均给出了初步的解决思路。

(2)基于组织行为学与跨域协同合作的映射关系，采用 DoDAF 体系设计框架初步完成了系

统视图和作战视图的构建,初步探索了跨域协同作战体系结构设计的理论模型。

(3)本文仅基于原理性分析完成初步的体系结构视图构建,下一步还需采用着色 pertri 网方法对体系结构设计出的流程合理性进行模型仿真验证。

参考文献

- [1] 郝雅楠,陈杰,关晓红.美空军敏捷作战概念研究及其影响分析[J].战术导弹技术,2018(1):22-29.
- [2] 王伟,张洋.美国空军敏捷作战概念形成及影响分析[J].军事文摘,2020(8):59-62.
- [3] 李复名,王丽军,孔磊,等.对“多域战”作战概念的理解与思考[J].电子信息对抗技术,2020,35(5):56-58.
- [4] 王竞.美军第三次“抵消战略”视阈下的“多域战”研究[D].长沙:国防科技大学,2018.
- [5] Townsend G S. Accelerating multidomain operations evolution of an idea[J]. Military Review Online Exclusive, 2018:1-3.
- [6] 高岚岚,刘怡静,刘然,等.面向任务的跨域协作系统设计与应用展望[J].信息技术与网络安全,2021,40(2):19-23.
- [7] 陆宏泽,赵长见,李吉甫,等.天空地多域体系作战指挥控制系统构建方法[J].导弹与航天运载技术,2019(1):1-5.
- [8] 刘永才.新形势下武器装备发展思考[J].战术导弹技术,2020(4):1-12.
- [9] David K S, Stephen D, Adam T. Operationalizing artificial intelligence for multi-domain operations: A first look[C]. SPIE Defense + Commercial Sensing, Baltimore, Maryland, United States, 10 May, 2019.
- [10] Eliahu N, Greg G, Tyler L. A new battle command architecture for multi-domain operations[R]. MIRE Center for Technology and National Security, MITRE Cooperation, December 2019.
- [11] 胥秀峰,司光亚,王艳正.基于OPM的军事行动概念模型框架[J].指挥控制与仿真,2020,42(6):1-8.
- [12] 张佳琦,鹿瑶,张修社.多域一体化作战下的多源异类信息融合研究概述[J].现代导航,2020,11(1):30-34.
- [13] 阳东升,朱承,肖卫东,等.宏观尺度C2过程机理:多域多PREA环及其冲突协调模型[J].指挥与控制学报,2021,7(1):11-27.
- [14] 龚旻,卜昭鹏,陈梅,等.陆战分队空地一体无人作战系统装备体系构想研究[J].无人系统技术,2021,4(1):71-78.
- [15] 王涛.火星探测陆空协同无人系统的研究发展分析[J].无人系统技术,2020,3(5):5-12.
- [16] 王彤,李磊,蒋琪.美国“快速轻量自主”项目推进无人系统自主能力发展[J].无人系统技术,2019,2(1):58-64.
- [17] 杜普伊.武器和战争的演变[M].北京:军事科学出版社,1985.
- [18] 王新尧,曹云峰,孙厚俊,等.基于DoDAF的有人/无人协同作战体系结构建模[J].系统工程与电子技术,2020,42(10):2265-2274.
- [19] 程飞,许涛,张加林.基于DoDAF的潜艇作战系统体系结构设计[J].四川兵工学报,2012,33(3):80-84.
- [20] U.S. Army Training and Doctrine Command. U.S. Army in Multi-Domain Operations 2028[R]. TRADOC Pamphlet 525-3-1, December 6, 2018.
- [21] Eitan S. The long and winding road: The US army managerial approach to command and the adoption of mission command[J]. Journal of Strategic Studies, 33(5): 645-672.

作者简介:



王涛(1981-),男,博士,副教授,主要研究方向为智能无人系统、多域协同任务规划。本文通信作者。



郭欢琪(1999-),女,本科生,主要研究方向为体系结构设计。



余华煌(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为无人系统协同控制。

[引用格式] 王玉茜, 张雪涛, 闫飞, 等. 基于视觉的无人机大范围室外道路检测及拓扑地图构建[J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 30-39.

基于视觉的无人机大范围室外道路 检测及拓扑地图构建

王玉茜¹, 张雪涛², 闫飞¹, 庄严^{1,2}

(1. 大连理工大学控制科学与工程学院, 大连 116024; 2. 大连理工大学人工智能学院, 大连 116024)

摘要:空地协作中空中机器人对室外可行道路的检测与建图, 有利于提升地面机器人的导航能力。为了实现上述功能, 提出了一种新的基于道路分割、图像拼接、骨架提取的无人机大范围室外道路检测及拓扑地图构建方法。首先, 为了解决无人机基于航拍图像的道路识别问题, 通过 D-LinkNet 网络完成对无人机航拍图像中道路的分割, 并在保证分割准确率的情况下提升了分割的实时性。其次, 考虑到无人机飞行高度和相机视角有限的问题, 设计了基于 GPU 加速的 ORB 图像拼接算法, 从而实现了室外大范围场景的获取。然后, 为了完成道路拓扑关系的建立, 借鉴并行二值图像细化算法, 设计了用于道路拓扑化的骨架提取算法, 进而得到了道路拓扑地图。最后, 所提方法在马萨诸塞州道路数据集上进行测试, 实验结果验证了该方法在道路分割、拓扑地图构建方面具有较高的准确性, 且可满足实时性要求。所建拓扑地图有利于地面机器人导航能力的提升。

关键词:空地协作; 拓扑地图; D-LinkNet; 道路分割; 图像拼接; 骨架提取

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2021)04-30-10

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.4.034

Large-scale Outdoor Road Detection and Topological Map Building for Vision-based UAVs

WANG Yuqian¹, ZHANG Xuetao², YAN Fei¹, ZHUANG Yan^{1,2}

(1. School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Artificial Intelligence, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The detection and mapping of outdoor feasible roads by aerial robots in air-ground cooperation is conducive to improve the navigation capabilities of ground robots. In order to achieve the above functions, a new method of UAV large-scale outdoor road detection and topology map construction based on road segmentation, image stitching, and skeleton extraction is proposed. Firstly, in order to solve the problem of road recognition in UAV's aerial images, D-LinkNet is used to complete the segmentation of roads in UAV aerial images, which improves the real-time performance of segmentation by ensuring the accuracy. Secondly, considering the limitation of UAV's flight altitude and camera view angle, an ORB image stitching algorithm based on Graphics Processing Unit(GPU) acceleration is designed to achieve the capture of a large outdoor scene. After that, in order to complete the road topology, a skeleton extraction algorithm for road topology is designed based on the parallel binary image thinning algorithm, and the

收稿日期: 2021-05-09; 修回日期: 2021-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(U1913201、61973049)

topological representation of the road is obtained. Finally, the proposed method is tested on the Massachusetts road dataset, and the experimental results show that the method has high accuracy in road segmentation and topological map construction, and can meet the real-time requirements. The topology map is helpful to improve the navigation capabilities of ground robots.

Key words: Air-ground Cooperation; Topological Map; D-LinkNet; Road Segmentation; Image Stitching; Skeleton Extraction

1 引言

近年来,随着人类在人工智能、地图构建、图像处理等领域取得突破性的科技进展,无人机和地面机器人也得到了迅速发展,二者各有利弊。一方面,无人机具有较广的观察视角,但其有效载荷低、续航时间有限;另一方面,地面机器人的视角受限制,但其有效载荷高、续航时间长^[1]。如果利用无人机进行环境探索,从而引导地面机器人更快地完成作业任务,即空地协作,吸引了诸多学者研究^[2-6]。文献[7]提出了一种基于鸟瞰图导航地面机器人的概念证明。文献[8]利用无人机空中建图,进而驱动地面机器人进行避障和路径规划。空地协作可以拓宽地面机器人的有限视野^[9-10],可以用于虚拟现实^[11]、多机器人监控^[12-13]、协同作战^[14]。而如何利用无人机对地面环境建图是空地协作领域发展的一个关键问题。

本文目标是使用无人机生成可供地面机器人使用的室外大范围拓扑地图。为此,本文提出了一种基于道路分割、图像拼接和骨架提取的大范围拓扑地图构建方法,其中,图像拼接技术可实现室外大范围场景的获取,道路分割和骨架提取可实现拓扑地图的构建。

为实现拓扑化地图的构建,首先需要无人机对地面道路的准确观测,即对场景中的道路进行准确分割。在道路分割领域,基于航拍图像的道路检测技术的应用范围越来越广,道路识别也得到广泛研究。文献[15]基于视觉对车道线和道路边界进行检测,同时运用基于蒙特卡罗方法的置信度评价方法对待测图像进行处理。该算法能够有效克服道路环境不佳的影响,并且计算耗时较小。然而,该算法仅适用于与环境背景特征相差较大的道路目标检测,很难适用于背景环境复

杂的无人机航拍图像。文献[16]提出了基于启发式搜索连接的航拍图像直线检测方法,首先对图像进行高斯滤波和边缘检测,然后利用启发式搜索连接,提取出符合道路直线模型的直线,最终获得检测结果。该算法实现简单并具有良好的抗噪性能。文献[17]提出了基于霍夫变换的航拍图像道路检测,霍夫直线检测作为直线提取的经典算法,广泛应用于直线检测领域。文献[18]针对道路颜色与周围环境颜色存在明显区别的情况,提出了基于颜色识别的道路检测,但航拍图像受屋顶、树木阴影、车辆等影响较大,不适合应用此方法。随着深度学习的发展,出现了多种基于神经网络^[19-20]的航拍图像道路提取方法,主要分为两类:一类追求图像分割的准确性,牺牲了时间;另一类则以快速为主,降低了准确性。为了兼顾时间与准确性,本文采用时间与准确性均衡的 D-LinkNet 语义分割神经网络^[21]。

其次,通过图像拼接实现大范围场景的获取,在图像拼接领域,Szeliski 提出了包含相机三维旋转运动的图像拼接技术,该方法首先求解透视矩阵,然后求解单应性矩阵的参数,调整焦距和旋转矩阵以消除累积误差,最后采用加权融合的方法将拼接图像合成到一起。Brown 等^[22-23]使用基于不变局部特征的物体识别技术来选择匹配图像,实现了无序图像的全自动拼接,取得了较好的拼接效果。然而,当图像数目较多时,边缘图像会发生畸变。为了解决这个缺陷,Gao 等^[24]将场景划分为背景平面和前景平面,用两个单应性矩阵分别对齐背景和前景,进而无缝拼接大部分现实场景。随后,文献[25]采用网格优化的方法来解决图像拼接问题,从形状矫正的角度出发,借鉴图像缩放的 Shape-Preserving 类方法,非重叠区域逐渐过渡到全局相似变换,并对整个图像

增加相似变换约束, 矫正拼接图像的畸变, 减小了投影失真。Lowe^[26-27]提出了尺度不变特征变换 (Scale-Invariant Feature Transform, SIFT) 算法, 其具有尺度不变性, 可在图像中检测出关键点, 对于光线、噪声、微视角改变的容忍度也相当高, 但 SIFT 算法计算量大, 匹配速度较慢。因此, Bay 等^[28]提出了快速鲁棒特征 (Speeded Up Robust Features, SURF) 算法, 它是 SIFT 算法的加速版, 其性能可与 SIFT 相媲美, 且比 SIFT 快三倍。SURF 善于处理模糊和旋转的图像, 但不擅长处理视点变化和照明变化。为解决 SIFT 特征的高昂计算代价以及对噪声敏感的弱点, Rublee 等^[29]提出了特征提取算法 (Oriented FAST and Rotated BRIEF, ORB), 该算法基于 FAST 和 BRIEF 特征提出了二值特征, 大大减少了计算量, 提高了匹配速度, 实验表明, ORB 算法在时间上比 SIFT 快 100 倍, 比 SURF 快 10 倍, 并且匹配效果也较好。在道路分割后进行图像拼接, 可减少拼接时提取特征点的数量, 大大减少了匹配拼接的计算量。除此之外, 为了进一步提高匹配速度, 本文设计了基于 GPU 加速的 ORB 图像拼接算法, 可以兼顾实时性与准确性。

最后, 关于地图构建, 目前的地图表示方法分为三类: 栅格地图、几何地图和拓扑地图^[30]。其中, 拓扑地图将环境表示为一张拓扑意义的图, 图中的节点对应环境中的拐点或交叉点, 弧表示不同节点之间的通道, 适合于表示大规模环境。为完成拓扑地图的构建, 需要对道路分割后的大范围场景进行骨架提取。一类方法是通过对所有道路线段求交来建立道路拓扑, 但是在确定道路是否相交时难以选择阈值。与此不同, 用骨架表示目标图像的连接拓扑和边界信息, 在机器人领域有着广泛的应用。图像骨架提取, 即提取目标在图像上的中心像素轮廓, 以目标中心为准, 对目标进行细化, 细化后的目标为单像素宽度。中轴线是一个典型的骨架模型, 其具有简单、完整等优点。在此基础上, 研究人员提出了一系列基于细化的骨架提取算法, 其大致可分为迭代和非迭代两大类。在迭代算法中, 又分为并行迭代和

顺序迭代两种。Saeed 等^[31]提出的 K3M 算法则是顺序迭代中应用广泛的方法之一, 该类算法的思想是, 假定从二值图像中物体的边界处同时开始燃烧, 物体就会被逐步细化, 但在燃烧过程中要保证满足一定条件的点被保留或者被“烧掉”, 以确定燃烧结束后, 剩下最后一个像素宽度的图像为图像的骨架。该方法存在像素冗余问题, 得到的骨架出现分叉、不平滑现象。并行迭代以 Zhang 并行快速细化算法最为经典, 该算法多应用于文字骨架的提取, 在连接性和轮廓噪声抗扰度方面效果较好。本文使用骨架提取的方法进行拓扑化, 将 Zhang 并行快速细化算法应用于拓扑地图的构建。

为了实现室外大范围拓扑地图构建, 本文提出了基于道路识别、图像拼接、骨架提取集成的拓扑地图构建框架。具体而言, 先由图像拼接实现大范围场景获取, 然后通过道路识别和骨架提取实现拓扑地图构建。由于所提策略先分割后拼接, 实现了方法的实时性。此外, 设计了基于 GPU 加速的 ORB 图像拼接算法, 提高了拼接效率。

2 大范围拓扑地图构建方案

2.1 整体方案设计

本文的整体设计方案可分为三部分: 道路分割、图像拼接、拓扑构建, 采用边分割边拼接、先分割后拼接的方案, 前者可减少同时参与拼接的图像数目, 增加拼接准确性, 后者可减少拼接时特征点检测与匹配的计算量, 增加拼接速度, 流程图如图 1 所示。

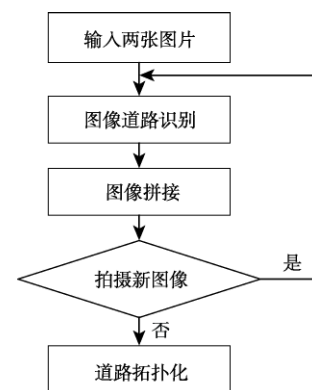


图 1 整体方案流程图

Fig. 1 Flow chart of the general scheme

2.2 基于深度学习的航拍图像道路分割

道路系统是一个非常复杂的系统，其主要特点是连接特性和宽度特征，传统的道路检测的方法包括基于启发式搜索连接的直线检测方法^[15]、基于霍夫变换的直线检测^[16]、基于颜色分割的道路检测^[17]等。但是航拍图像中的道路极易受到非道路因素的干扰，如阴影、车辆、与道路连通的开放区域（如小型停车场、篮球场）等，这些干扰不可避免，且将直接影响道路的连接特性和宽度特征。为了提高道路分割的准确性，选用 D-LinkNet 语义分割神经网络对道路进行分割。D-LinkNet 网络包含编码器、中心部分、解码器三部分，组成结构如图 2 所示。

D-LinkNet 使用 ResNet34 作为网络的编码器，编码模块由最大池化层和若干残差块组成，四个编码模块依次分别具有 3、4、6、3 个残差块。单个残差块如图 3 所示，在普通卷积的基础上增加恒等映射，可以有效解决随着卷积神经网络深度的增加而出现的训练误差增大的问题。激活函数选用非线性函数 ReLU，残差块输出可表示为

$$y = F(x, \{W_i\}) + x \quad (1)$$

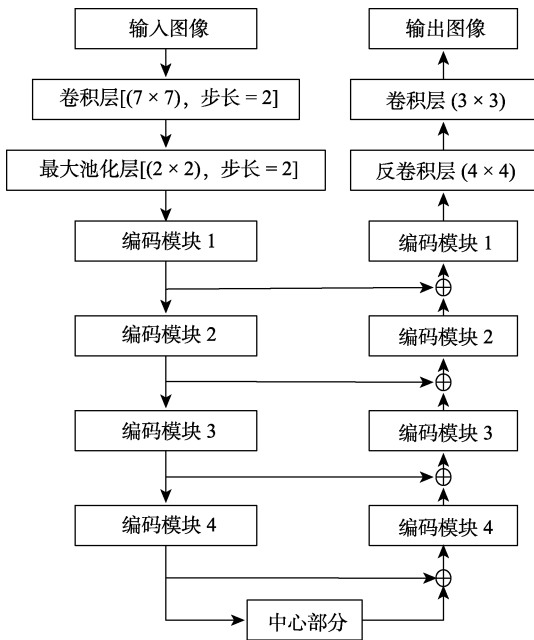


图 2 D-LinkNet 结构图
Fig. 2 Structure chart of D-LinkNet

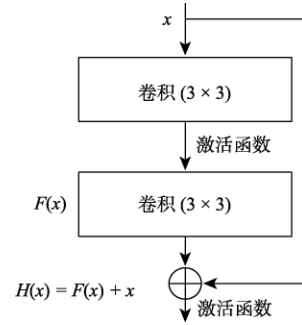


图 3 单个残差块
Fig. 3 Single residual block

当输入、输出维度发生变化时，需要在恒等映射过程中对 x 做线性变换 W_s ，相当于加入了 1×1 卷积层，如下：

$$y = F(x, \{W_i\}) + W_s x \quad (2)$$

在深度网络中为了增加感受野且降低计算量，通常会进行降采样，这样虽然可以增加感受野，但会使得空间分辨率降低，而空洞卷积的出现，巧妙地解决了这一问题。空洞卷积是一种功能强大的内核，可用于调整特征图的感受野而不降低特征图的分辨率，使得整个网络识别能力更强、接收域更大、融合多尺度信息，广泛应用于图像分割、识别任务中。中心层部分由空洞卷积层组成，空洞卷积如图 4 所示。

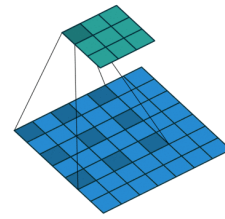


图 4 膨胀系数 $r = 2$ 的空洞卷积
Fig. 4 Dilated convolution with $r = 2$

假设空洞卷积的卷积核大小为 k ，膨胀系数为 r ，则其等效卷积核 k' 为

$$k' = k + (k - 1) \times (r - 1) \quad (3)$$

当前层感受野 R_i 计算公式如下：

$$R_i = R_{i-1} + (k' - 1) \times S_{i-1} \quad (4)$$

其中， R_{i-1} 表示上一层感受野， S_{i-1} 表示之前所有层步长之积。

D-LinkNet 中心部分的空洞卷积层结合级联模式和并行模式,可以灵活调整特征图的感受野,且每个路径的感受野不同,可以有效地融合多尺度特征。其结构如图 5 所示,当堆叠的空洞卷积层膨胀系数 r 分别为 1、2、4、8 时,每层的感受野一次为 3、7、15、31。

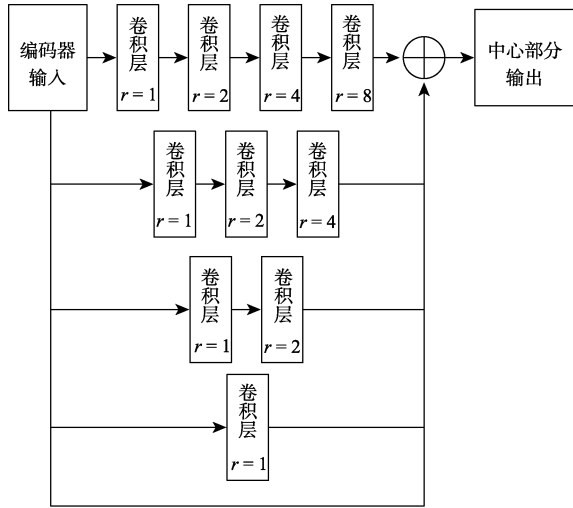


图 5 中心部分结构图

Fig. 5 Diagram of central part

道路分割是一个二分类问题,训练模型时,损失函数采用 Dice 损失和二值交叉熵损失结合的方式。Dice 损失大多用于样本极度不均衡的情况,一般情况下使用 Dice 损失会对反向传播有不利的影响,使得训练不稳定,因此,选用二值交叉熵损失函数与 Dice 损失相结合的方式进行了损失计算。

$$\text{Loss} = \text{DiceLoss}(p_i, y_i) + \text{BCELoss}(p_i, y_i) \quad (5)$$

$$\text{DiceLoss} = 1 - \frac{2|p_i \cap y_i|}{|p_i| + |y_i|} \quad (6)$$

$$\text{BCELoss} = \frac{1}{N} \sum_i^N -[y_i \cdot \log(p_i) + (1 - y_i) \cdot \log(1 - p_i)] \quad (7)$$

其中, y_i 表示样本 i 真实标签类别, p_i 表示样本 i 预测输出类别。

D-LinkNet 是一种高效的语义分段神经网络,它具有跳接、残差块、空洞卷积和编码器-解码器体系结构的优势,在计算和存储方面非常有效。

2.3 基于 ORB 算法的图像拼接

无人机航拍受飞行高度、摄像头视角范围、焦距等因素的影响,单张图像涵盖的室外场景范围较小,为获得室外大范围图像,需要拍摄多幅图像,通过图像拼接技术,把各幅图像间重叠的部分进行提取、匹配、拼接,从而得到大范围室外场景。图像拼接算法结构如图 6 所示,主要包含图像特征点提取与匹配、图像配准、图像融合三部分,其中,特征点提取与匹配、图像配准两步实现了基于 GPU 的 CUDA 并行加速处理。

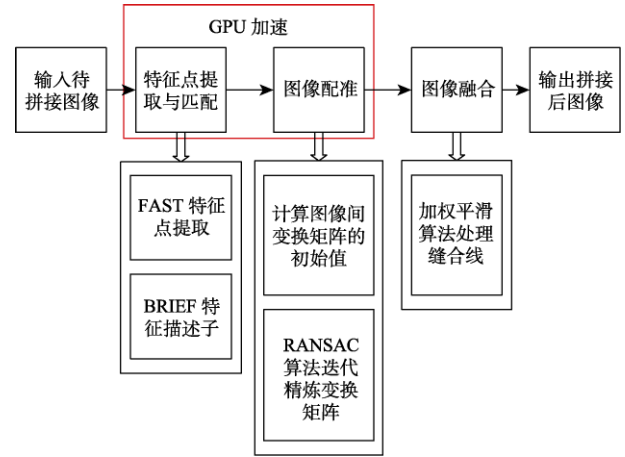


图 6 图像拼接算法结构图

Fig. 6 Diagram of image stitching algorithm

ORB 是一种快速特征点提取和描述的算法,分为两部分,分别是特征点提取和特征点描述。特征点提取是由 FAST 算法发展来的,特征点描述是根据 BRIEF 特征描述算法改进的。ORB 特征是将 FAST 特征点的检测方法 with BRIEF 特征描述子结合起来,并在它们原来的基础上做了改进与优化。

图像的特征点可以理解为图像中比较显著的点,如物体轮廓点、亮度变化分界点等。ORB 首先采用 FAST 算法来检测特征点,FAST 算法是公认的最快的特征点提取方法。选取图像中某一像素为特征点,检测该候选特征点周围一圈的像素值,如果候选点周围领域内有足够多的像素点与该候选点的灰度值差别够大,则认为该候选点为一个特征点。在使用 FAST 提取出特征点之后,给其定义一个特征点方向,以此来实现特征点的

旋转不变性, 称为 oFAST 算法, ORB 算法提出使用矩法来确定 FAST 特征点的方向。即通过矩来计算某特征点周围的图像区块 p 内的质心, 该特征点坐标到质心形成一个向量作为该特征点的方向。对图像求质心时, 每个像素点的值即该处的密度, 利用图像零阶矩和一阶矩可求得图像质心, 矩定义如下:

$$m_{ij} = \sum_{u,v \in r} u^i v^j I(u,v) \quad (8)$$

其中, (u,v) 是特征邻域内的点, $I(u,v)$ 为图像灰度表达式。该矩的质心为

$$C = \left(\frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}} \right) \quad (9)$$

假设特征点坐标为 O , 则向量 \overline{OC} 即为该特征点的方向:

$$\theta = \arctan\left(\frac{m_{01}}{m_{00}} / \frac{m_{10}}{m_{00}}\right) = \arctan(m_{01}/m_{10}) \quad (10)$$

得到特征点后需要以某种方式描述这些特征点的属性。这些属性的输出称为该特征点的描述子。ORB 采用 BRIEF 算法来计算一个特征点的描述子。该算法的核心思想是在某特征点周围的图像区块 p 内, 选取 n 对点对, 把这 n 对点对的比较结果组合起来作为描述子。因此, BRIEF 描述子的输出结果是一个二进制串的特征描述符。一个二值测试 τ 定义如下:

$$\tau(p; x, y) = \begin{cases} 1 & p(x) < p(y) \\ 0 & p(x) > p(y) \end{cases} \quad (11)$$

其中, 像素 x 与像素 y 组成一对点对, $p(x)$ 、 $p(y)$ 分别表示图像区块 p 内像素 x 和像素 y 的灰度值。

BRIEF 描述子选取点对的时候, 是以当前特征点为原点, 以水平方向为 X 轴, 以垂直方向为 Y 轴建立坐标系。当图片发生旋转时, 坐标系不变, 同样的取点方法取出来的点却不一样, 计算得到的描述子也不一样, 所以 BRIEF 描述子不具备旋转不变性。ORB 算法对 BRIEF 描述子的这一缺点进行了改进, 改进后的方法改变了坐标系的建立方式, 以特征点为圆心, 以特征点和选取

区域质心的连线为 X 轴建立平面坐标系, 即利用 oFAST 中求出的特征点的主方向 θ , 对特征点邻域进行旋转, 改进后的算法称为 Steer BRIEF 算法。假设在某一特征点的邻域内选取 n 对点集, 用 S 表示, 则

$$S = \begin{pmatrix} x_1, \dots, x_n \\ y_1, \dots, y_n \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$R_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$S_\theta = R_\theta S \quad (14)$$

其中, R_θ 表示旋转矩阵, S_θ 表示旋转后的点对位置。

BRIEF 描述子的一个优秀特性为点对均值稳定, 方差大, 区分性强, 那么不同特征点的描述子就表现出的差异性越大, 对匹配来说不容易误配。但是当 BRIEF 沿着特征点的方向调整为 Steered BRIEF 时, 均值就漂移到一个更加分散式的模式, 且方差变小, 区分性降低, 此时选取点对时就不能随机选取, 需要经过比较选取出区分度大、关联程度低的点对。ORB 算法的最后一步为特征点的匹配, 当两个描述子的相似度达到一定阈值时, 可认为这两个描述子代表的是同一个特征点。

图像配准是一种确定待拼接图像间的重叠区域以及重叠位置的技术, 通过匹配点对构建图像序列之间的变换矩阵, 将两张图像转换为同一坐标下, RANSAC 算法对于图像变换矩阵的求解与精炼有较好的效果。RANSAC 算法首先随机地选择两个点, 通过这两个点确定一条直线, 并称在这条直线的一定范围内的点为这条直线的支撑。这样的随机选择重复数次后, 具有最大支撑集的直线被确认为是样本点集的拟合。

在特征点提取与匹配和图像配准过程中, 提取大量特征点, 并完成大量描述子计算与匹配的数学计算, 是图像拼接程序耗时长、效率低的主要原因。由于显卡具有优秀的并行计算能力, 为有效提高拼接效率, 本文充分利用显卡进行并行加速计算, 大大提高了算法的运行速度。

根据配准时得到的变换矩阵，可以对相应图像进行变换以确定图像间的重叠区域，并将待融合图像映射到一幅新的空白图像中形成拼接图。若两幅待拼接图像之间亮度、饱和度存在差异，则会导致拼接后的图像缝合线两端出现明显的明暗变化，此时，可采用加权平滑算法处理，即图像重叠区域中像素点的灰度值由两幅图像中对应点的灰度值加权平均得到。

$$\text{Pixel} = k \times \text{Pixel}_L + (1 - k) \times \text{Pixel}_R \quad (15)$$

其中， Pixel_L 和 Pixel_R 分别为两幅待拼接图像中对应点的灰度值， k 为加权系数。

2.4 基于骨架提取的拓扑地图构建

拓扑地图由边和节点构成，用来表示道路的连通关系，使用骨架提取算法实现拓扑化，构建出道路的拓扑地图。骨架可理解为物体的中轴，骨架提取流程图如图 7 所示。

骨架提取主要包括以下步骤：首先，图像细化。细化就是经过层层剥离，从原图像中去掉一些点，但仍要保持原来的形状，直到得到图像的骨架。其次，过滤。过滤使得任意两骨架点不能紧靠在一起，两点之间至少间隔一个空白元素。最后，检测端点和交叉点。端点和交叉点即拓扑地图中的节点，骨架即边。

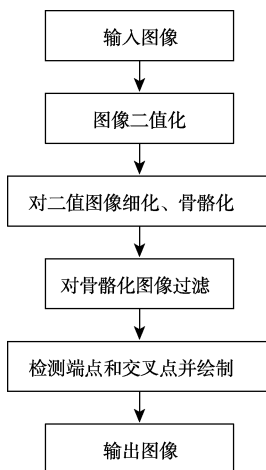


图 7 骨架提取流程图

Fig. 7 Flow chart of skeleton extraction

选用经典的 Zhang 并行快速细化算法，将输入图像二值化后选取其中某一像素点 P_1 及其周

围相邻 8 个像素点，按图 8 所示顺序标号。

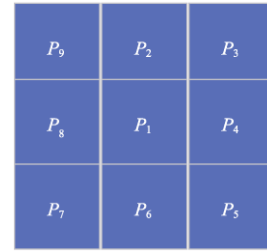


图 8 像素排列示意图

Fig. 8 A schematic view of the pixel arrangement

对图像中的每个点进行遍历，对每个像素为 1 的点进行检测，若符合以下条件 1、2，且符合条件 3、4 之一，则非骨架点，删除该点。

条件 1: $2 \leq N(P_1) \leq 6$ ，其中 $N(P_1)$ 为 P_1 的 8 个邻域中黑色像素的数目。

条件 2: $A(P_1) = 1$ ，其中 $A(P_1)$ 指的是邻域像素按顺序排列时像素值由 0 变 1 的次数。

条件 3: $P_2 \times P_4 \times P_6 = 0$ 且 $P_4 \times P_6 \times P_8 = 0$ 或者 $P_2 \times P_4 \times P_8 = 0$ 且 $P_2 \times P_6 \times P_8 = 0$ 。

条件 4: $P_2 \times P_4 \times P_8 = 0$ 且 $P_2 \times P_6 \times P_8 = 0$ 。

过滤部分实现每两个白点之间不能紧靠在一起，即两个点之间至少隔一个空白像素，若满足 $P_2 + P_3 + P_8 + P_9 \geq 1$ ，则删除 P_1 。检测端点与交叉点部分首先需要确定卷积邻域范围，然后统计卷积范围内像素为 1 的点的个数，若个数高于给定阈值，则说明 P_1 为交叉点，反之则为端点。图 9 为图像中部分像素排列情况。

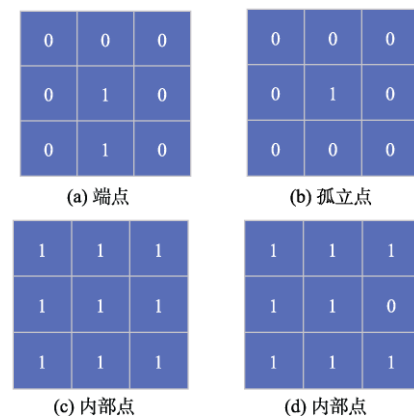


图 9 部分像素排列情况

Fig. 9 Arrangement of partial pixel

3 实验结果及分析

为证明本文方案的有效性, 在麻省塞州道路数据集上进行验证。首先, 使用图像标注工具 labelme 对数据集中道路部分进行标记, 制作出用于训练及验证的数据集, 并完成对 D-LinkNet 网络的训练。所作数据集共 5300 幅图像, 其中 80% 用于训练, 20% 用于测试, 该部分基于 NVIDIA GTX1080 显卡配置下完成。其次, 创建一个用于发送图像的 ROS 节点, 而后进行道路分割, 每完成一幅图像的分割, 便由 ROS 节点发出该分割后的图像, 直至处理全部图像。图 10 给出了两种不同场景下 32 幅图像的道路分割结果, 单幅图像程序运行时间约 0.17 s, 分割准确率达 92.89%, 具有较高的准确率与场景适应性。



图 10 道路分割结果

Fig. 10 Result of the road segmentation

在图像拼接部分, 首先创建一个新的 ROS 节点, 用于接收道路分割后发送的图像, 当图像数量达到两幅即进行拼接, 直到节点接收不到新的图像消息。

图像拼接采用基于 GPU 的 CUDA 并行加速方法, CUDA 处理图像的时候, 首先需要把 Mat 图像上载到 CUDA 数据单元 GpuMat 对象中, 然后对特征点提取及图像配准进行并行处理, 处理完成之后, 再从 GpuMat 下载数据到原始 Mat 对象中, 完成后续图像融合操作。

本文比较了 SURF 拼接算法、ORB 拼接算法以及 GPU 加速后的 ORB 算法的拼接耗时, 各图像拼接算法运行时间对比如表 1 所示。

其中, SURF 拼接算法选取特征点的条件与

ORB 算法不同, 其提取的特征点个数远大于 ORB 算法, 因此 SURF 算法在三种算法的比较中效率最低、耗时最长, ORB 算法效率居中, 经 GPU 并行加速后的 ORB 算法效率更高、耗时更短。

表 1 三种拼接算法时间对比

算法名称	不同像素下的计算耗时/ms				
	256 × 256	400 × 400	600 × 600	720 × 720	1024 × 1024
SURF	159.21	195.07	330.14	355.99	462.00
ORB	129.34	130.65	136.71	140.64	166.67
ORB_GPU	109.06	112.97	115.73	116.27	128.07

四种不同场景下的图像拼接与道路拓扑化结果如图 11~12 所示, 由此可见, 本文方法在多种不同场景中具有较好的适应性与准确性。

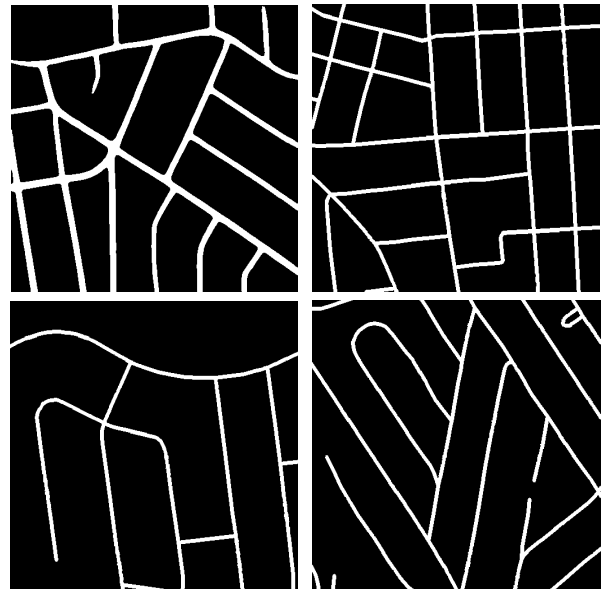


图 11 图像拼接结果

Fig. 11 Result of the image stitching

4 结 论

本文针对空地协作领域无人机室外道路观测问题, 提出了由道路分割、图像拼接、骨架提取组成的基于视觉的无人机大范围室外道路拓扑地图的构建方法。首先, 成功地将基于 D-LinkNet 的航拍图像道路分割和 Zhang 并行快速细化算法



图 12 道路拓扑化结果

Fig. 12 Result of the road topology

用于室外大范围拓扑地图构建问题；其次，提出先分割后拼接的方案，大大减少了图像拼接计算量，设计了基于 GPU 加速的 ORB 拼接算法，提高了拼接效率；最后，在 INRIA aerial image 数据集上成功验证了该方法的准确性和实时性。

参 考 文 献

- [1] Renaudeau B, Labbani-Igbida O, Mourioux G. Air-ground cooperative topometric mapping of traversable ground[J]. *Autonomous Robots*, 2020, 44(3-4): 705-720.
- [2] 吴允桢, 江汉, 王海超, 等. 无人机使能的空地协同信息分发优化技术[J]. *通信技术*, 2019, 52(5): 1150-1156.
- [3] 刘重, 何玉庆, 谷丰, 等. 四倾转旋翼无人机无源控制与飞行实验 [J/OL]. [2021-01-12][2021-06-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20210112.1248.004.html>.
- [4] 狄春雷, 于利, 潘思, 等. 基于局部相对定位的空地子母机器人自主收放引导系统与技术研究[J]. *无人系统技术*, 2020, 3(6): 68-78.
- [5] 龚旻, 卜昭鹏, 陈梅, 等. 陆战分队空地一体无人作战系统装备体系构想研究[J]. *无人系统技术*, 2021, 4(1): 71-78.
- [6] 尹昊, 侯婷婷, 李东光. 面向典型任务的有人/无人机协同效能评估[J]. *无人系统技术*, 2021, 4(1): 62-70.
- [7] Elfes A, Bergerman M, Carvalho J, et al. Air-ground robotic ensembles for cooperative applications: Concepts and preliminary results[C]. *The 2nd International Conference on Field and Service Robotics*, Pittsburgh, USA, August, 1999.
- [8] Garzón M, Valente J, Zapata D, et al. An aerial-ground robotic system for navigation and obstacle mapping in large outdoor areas[J]. *Sensors*, 2013, 13(1): 1247-1267.
- [9] 周光召, 苑晶, 高海明, 等. 结构化环境下基于结构单元软编码的三维激光雷达点云描述子[J]. *机器人*, 2020, 42(6): 641-650.
- [10] Mahendran A, Dewan N, Soni K, et al. UGV-MAV collaboration for augmented 2D maps[C]. *2013 Advances In Robotics*, Pune, India, July 4-6, 2013.
- [11] Cantelli L, Mangiameli M, Melita C D, et al. UAV/UGV cooperation for surveying operations in humanitarian demining[C]. *2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*, Linköping, Sweden, October 21-26, 2013.
- [12] Saska M, Vonasek V, Krajník T, et al. Coordination and navigation of heterogeneous MAV-UGV formations localized by a 'hawk-eye'-like approach under a model predictive control scheme[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2014, 33(10): 1393-1412.
- [13] Harik E, Guérin F, Guinand F, et al. UAV-UGV cooperation for objects transportation in an industrial area[C]. *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology*, Seville, Spain, March 17-19, 2015.
- [14] Oviedo M G, Valente J, Zapata D, et al. Towards a ground navigation system based in visual feedback provided by a mini UAV[C]. *2012 International IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Alcalá de Henares, Spain, June 3-7, 2012.
- [15] 王燕清, 陈德运, 石朝侠. 基于单目视觉的非结构化道路检测与跟踪[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2011, 32(3): 334-339.
- [16] 董银文, 苑秉成, 王航宇, 等. 一种有效的航拍图像中直线提取算法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012(2): 160-164.
- [17] 梅超, 曹凯, 王杰, 等. 基于航拍图像的道路提取算法[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2018(1): 5-9.
- [18] Yan J, Yu Y, Zhu X, et al. Object detection by labeling superpixels[C]. *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Boston, MA, USA, June 7-12, 2015.
- [19] 莫虹平. 基于递归神经网络的高分辨率航拍图像道路分割与提取[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [20] Tian G, Liu L, Ri J H, et al. Object Fusion: An object detection and segmentation framework with RGB-D SLAM and convolutional neural networks[J]. *Neurocomputing*, 2019, 345(JUN.14): 3-14.
- [21] Woo S, Kim D, Cho D, et al. LinkNet: Relational embedding for scene graph[C]. *The 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems*, Montreal, Canada, December 3-8, 2018.
- [22] Brown M, Lowe D G. Recognising panoramas[C]. *The Ninth IEEE International Conference on Computer Vision*, Nice, France, October 13-16, 2003.
- [23] Brown M, Lowe D G. Automatic panoramic image stitching using invariant features[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, 74(1):59-73.
- [24] Gao J, Kim S J, Brown M S. Constructing image panoramas using dual-homography warping[C]. *2011 Computer Vision and Pattern Recognition*, Colorado Springs, CO, USA, June 20-25, 2011.
- [25] Chang C H, Sato Y, Chuang Y Y. Shape-preserving

- half-projective warps for image stitching[C]. 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Columbus, OH, USA, June 23-28, 2014.
- [26] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]. The Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece, September 20-27, 1999.
- [27] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [28] Bay H, Tuytelaars T, Gool L V. SURF: Speeded up robust features[C]. The 9th European Conference on Computer Vision, Graz, Austria, May 8-11, 2006.
- [29] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF[C]. 2011 IEEE International Conference on Computer Vision, Barcelona, Spain, November 6-13, 2011.
- [30] 李尚宇. 移动机器人语义地图构建系统研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- [31] Saeed K, Tabedzki M, Rybnik M, et al. K3M: A universal algorithm for image skeletonization and a review of thinning techniques[J]. International Journal of Applied Mathematics &

Computer Science, 2010, 20(2): 317-335.

作者简介:



王玉茜(1997-),女,硕士研究生,主要研究方向为空地协同、地图构建。



张雪涛(1992-),男,博士,副教授,主要研究方向为无人机自主探索与运动规划。本文通信作者。



闫飞(1981-),男,博士,副教授,主要研究方向为移动机器人地图构建、路径规划、自主导航和场景理解。



庄严(1975-),男,教授,主要研究方向为移动机器人面向复杂三维环境的自主感知、建模、地图构建、场景理解。

[引用格式] 苏梅梅, 程咏梅, 胡劲文. 基于改进蚁群算法的无人机集群任务分配和路径规划联合优化[J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 40-50.

基于改进蚁群算法的无人机集群任务分配 和路径规划联合优化

苏梅梅¹, 程咏梅¹, 胡劲文¹, 赵春晖¹, 贾彩娟², 徐 钊¹, 张剑锋²

(1. 西北工业大学, 西安 710000; 2. 西安爱生技术集团公司, 西安 710065)

摘要: 无人机集群作战得到广泛的应用, 其路径规划和任务分配技术的研究是无人机集群作战的关键步骤。然而, 传统的方式是将路径规划和任务分配分别求解计算, 这样的处理方式未考虑任务分配和路径优化的耦合关系, 会造成路径交叉、资源分配不均匀的问题。针对多任务场景中的多子群任务分配和路径规划问题, 将任务分配和路径规划联合优化, 提出了改进的蚁群优化算法。首先, 根据时间、距离、任务优先级等约束, 建立任务分配和路径规划联合优化目标函数。然后, 通过改进信息素更新机制, 在任务优先级启发下进行信息素更新, 实现满足路径安全(不存在交叉现象)、资源分配均匀的任务分配和路径规划。由于该方法中单个编队被视为一个整体, 因此, 在任务分配之前, 设计了基于十进制数无人机 ID 设计, 实现了无人机编队分群的目的。最后, 在多种情形下, 通过仿真对比分析验证所提算法的有效性。所提出的算法实现了在复杂多任务环境中, 多无人机能够无碰撞地执行多任务。

关键词: 任务分配; 路径规划; 联合优化; 蚁群算法; 无人机集群; 编队集结

中图分类号: V19 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2021)04-40-11

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.4.035

Combined Optimization of Swarm Task Allocation and Path Planning Based on Improved Ant Colony Algorithm

SU Meimei¹, CHENG Yongmei¹, HU Jinwen¹, ZHAO Chunhui¹, JIA Caijuan²,
XU Zhao¹, ZHANG Jianfeng²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710000, China; 2. Xi'an ASN Technology Group Co., Ltd, Xi'an 710065, China)

Abstract: UAV cluster operations are widely used, path planning and task allocation technology are key steps in UAV cluster operations. However, the traditional method is to calculate the path planning and task allocation separately. This processing method does not consider the coupling relationship between task allocation and path optimization, which will cause the problems of "path crossing" and "uneven resource allocation". Therefore, aiming at the problem of multi-subgroup task allocation and path planning in multi-task scenarios, task allocation and path planning is combined in this paper to optimize, and an improved ant colony optimization algorithm is proposed. First, according to constraints such as time, distance, and task priority, a joint optimization objective function for task allocation and path planning is

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(61803309); 中央高校基本科研业务费(3102019ZDHKY02); 陕西省重点研发计划(2020ZDLGY06-02); 中国博士后科学基金(2018M633574); 航空基金(2019ZA053008); 陕西省自然科学基金(2019JM-254); 陕西省重点产业创新链项目(2019ZDLGY14-06, 2020ZDLGY06-02)

established. Then, by improving the pheromone update mechanism, the pheromone update is carried out under the enlightenment of task priority to achieve task allocation and path planning that meets path safety (no crossover phenomenon) and uniform resource allocation. Because of this method, a single formation is regarded as a whole. Therefore, before task assignment, a UAV ID design based on decimal numbers was designed to achieve the purpose of UAV formation and grouping. Finally, in a variety of situations, the effectiveness of the proposed algorithm is verified through simulation and comparative analysis. In a complex multi-task environment, multiple UAVs can perform multi-task without collision by the algorithm proposed in this paper.

Key words: Task Allocation; Path Planning; Combined Optimization; ACO; Drone Swarm; Subgroup Aggregation

1 引言

随着无人机飞行环境日益复杂和无人机性能等要求的提高,无人机编队任务分配的安全性、资源分配均匀等需求也变得越来越重要。之所以要进行任务分配,是因为多无人机在执行任务时,无人机的油耗等资源受限,无人机的突发故障以及无人机任务之间的优先级逻辑关系等都会影响无人机如何分配任务和执行任务。根据各种约束信息下得出任务规划指令,无人机才能在高保障、高效率、低消耗的需求下完成任务。目前,常用求解任务规划的算法主要有基于集中式的线性规划法、基于分布式市场机制的方法以及基于启发式的算法等。

基于线性规划的方法:该类方法主要通过建立满足需求的线性目标函数,2015年, Malvankar-Mehta^[1]在复杂的有人/无人机器人任务分配系统,该团队针对有人/无人机器人任务分配问题,考虑各类风险因素以及人为因素的性能指标,利用非线性规划算法进行求解,完成无人机任务分配。2016年, Berger等^[2]针对异构飞行器静态目标搜索过程中的计算复杂度高的问题,提出了新的整数线性规划和二次规划公式,以降低计算复杂度和近似最优地解决包含异构智能体的离散静态搜索路径规划问题,在计算代价较小的情形下获得了包含异构飞行器的近似最优解。以同样思维处理异构机器人计算复杂度高问题的还有2017年 Bays等^[3],他们解决了异构机器人团队服务代理运输过程中的任务分配问题。该过程是一个机器人根据任务的优先顺序,执行多个任务的过程。

该方式可以保证得到解的存在性以及降低计算复杂度,然而通常用来解决单一的任务中,解决方案较单一化,不能处理需要多机器人协作才能完成的任务。另外,随着任务和机器人的增多,计算复杂度将呈指数级增长,这类方法的扩展性和效率较弱。

基于市场机制的方法:该类方法^[4]通常基于分布式的框架,是解决多机器人任务分配(Multi Robot Task Allocation, MRTA)问题最流行的方法,如一级价格拍卖、动态角色分配、交易机器人、默多克、德马克夫、M+等。由于其良好的可扩展性,这些方法特别适用于分布式机器人领域。在这些方法中,每个分布式代理都会计算一个完成任务的费用,并广播该任务的出价。拍卖机器人会决定最佳出价,而中标者会尝试执行中标的任务。它们有效地满足了机器人的实际需求团队,同时通过捕获分布式和分布式服务器各自的优势来产生有效的解决方案。但是,在任务分配过程中,如果通信成本太高,机器人的沟通性能会明显下降^[5],因此这些方法适用于中小规模的任务分配。2018年, Bays等^[6]针对异构结构的空间约束的优先约束问题,提出了一种带有调度约束的分布式任务分配拍卖法,比使用整数线性规划解决此类问题提高了计算效率。同样,2011年, Chen等^[7]研究了考虑资源约束的一组异构移动机器人的多机器人任务分配问题。机器人按照任务执行所需要的资源来划分。由于每个机器人可能没有足够的资源单独完成分配的任务,因此在任务执行中,机器人必须组成联盟,以满足任务强加的资源约束。

基于启发式算法：与上述两种算法不同，启发式算法^[8]在处理任务规划问题时，由于其本身的随机性不再是试图搜索全局空间，而是在计算时间和最优性能之间达到某些妥协，使得同时兼顾计算效率和性能之间平衡的一个次优解。2013年，Yuan等^[9]为了解决多机器人系统的任务分配问题，提出了一种基于爆炸进化的免疫遗传算法。Manathara等^[10]针对多无人机作战的最优资源分配问题，针对多种异构无人机设计了任务分配策略，并采用启发式算法进行求解。Marden等^[11]针对多智能体系统中的分布式控制问题，考虑了分配效能函数设计问题，并分析了效能函数同纳什平衡之间的关系。2013年，该团队针对多类资源分配问题，采用改进的基于状态的博弈论方法，进一步优化了效能函数，相比传统的博弈论，提高了资源分配求解速度。2014年，Nagarajan等^[12]通过最大限度地提高通信效率和处理成本，提出了一种适用于异构多机器人系统任务处理的启发式搜索任务分配算法。针对任务数量大于系统中机器人数量的给定问题，采用对等结构算法找到近似最优分配方案。且其研究了多机器人系统的任务分配过程，为了解决多机器人系统的最优任务分配问题，针对动态环境下多机器人系统的自主任务分配问题，采用了一种改进的蚁群算法，考虑了任务约束和机器人能力。在所有情况下，蚁群算法都比IG启发式算法得到了更好的结果。2014年，美国珀杜大学Kim等^[13]针对异构无人机的编队区域搜索和任务分配问题，提出了一种基于响应阈值模型的概率决策机制的分布式方法，考虑了环境的不确定性，实现了快速灵活的无人机区域搜索和任务分配。2019年，Zhao等^[14]利用强化学习算法Q-Learning进行快速任务分配，利用神经网络近似和经验优先重放，将在线计算转移到离线学习过程中，具体就是开发了一个Q网络编码分配规则，有效地将各种不同的任务分配给无人机。采取同样方式的还有2019年Dai等^[15]为了解决环境探测中的多无人机协同搜索问题，通过采用基于拍卖方法、

空缺链方法、基于策略选择的Q-Learning方法来求解多任务动态勘察与破坏的问题。不同的是，该篇文章考虑的目标具有反打击能力，从而增加了问题的复杂性。2020年，Brown等^[16]研究了具有任务间优先约束的应用中大型机器人团队的顺序任务分配和无碰撞路由问题，提出了一个层次算法来计算问题的最优解。2020年，Gibson等^[17]利用A*算法实现了实时的多智能体路径规划算法。本文通过建立约束下的无人机模型，每个无人机的模型将在每个时间步骤中更新，并确定最终的控制。生成的路径以路径点序列的形式提供给无人机。2018年，Zhou等^[18]以固定翼无人机辅助MCS系统为研究对象，从能效的角度研究了相应的联合路径规划和任务分配问题。将求解的联合优化问题转化为双边两阶段匹配问题，第一阶段采用动态规划或遗传算法求解路径规划问题，第二阶段采用Gale Shapley算法求解任务分配问题。然而，2019年，Hafez等^[19]研究了无人机协同任务分配和协同飞行轨迹规划问题，提出了一种新的层次模糊控制器和粒编队算法。2019年，唐俊林等^[20]基于合作型协同进化算法的理念，提出了一种基于竞争型协同进化的多传感器任务规划算法。首先，建立了防空多传感器任务规划数学模型；其次，基于竞争型协同算法建立框架，并设计了新的编码方式，提出了交叉、变异以及冲突消解的策略。2020年，史人赫等^[21]综合考虑速度增量和变轨时间等指标，基于双脉冲霍曼转移构建了一种两层任务规划框架。在此基础上，提出了一种新型网格编码差分进化方法。该方法引入序列逐次枚举思想，快速生成满足一对一任务约束的任务指派矩阵，并定制一种面向离散网格编码的差分变异操作，在保证任务规划方案可行性的前提下实现设计空间的高效探索，从而有效求解在轨服务任务规划问题。

另外，还有一些学者采用其他方式实现任务分配的目的。例如，2019年，于晓强等^[22]针对大型空间结构的在轨装配任务分配问题，提出了基

于扩展一致性算法的拍卖算法,在考虑在轨装配过程中运输、安装等任务的时间先后特性以及某些特定复杂任务需要多航天器协同完成的任务约束条件下,解决将各项任务分配给多个多种类航天器的在轨装配任务分配问题。2019年,朱利等^[23]为了在最短时间内降低整个区域的环境不确定度,提高多无人机协同区域搜索效率,提出了一种基于Voronoi图质心的多无人机协同区域搜索算法。针对不断变化的环境信息,提出了Discrete Combined Partition and Search(DCPS)策略,该策略将Voronoi图质心用于引导无人机运动,任务区域在每一步搜索时都会被重新进行Voronoi图划分。2021年,杜越洋等^[24]针对无人机载荷选型以及载荷试验过程复杂、试验周期长、试验成本高的问题,设计了一种基于数据分发服务通信技术的无人机任务载荷综合仿真平台。

上文提到的方法都是先进行任务分配,然后将任务分配的结果输入到路径规划模块生成所需要的路径。未考虑任务分配和路径规划的耦合性。然而这一种处理方式在进行任务分配时未考虑无人机本身的运动学约束,仅考虑任务之间的关系,路径规划的输入是任务分配的结果,降低了问题求解的复杂度,但在实际任务中无法满足需求。为了应对以上困惑,很多学者将任务分配与路径规划耦合求解。2015年, Kim等^[25]针对无人机团队在不同目标移动的环境中执行搜索和破坏任务,在此背景下作者将搜索计划和任务分配在一个框架下进行建模,提出了一种基于响应阈值模型的概率决策机制的分布式方法,搜索计划为每架无人机生成一个有效的搜索路径,以方便快速地进行目标检测。Deng等^[26]在考虑了UAV的弹药数量约束条件下,通过改变遗传算法的基因编码方式,完成了问题的求解。以上文献均是基于集中式架构完成协同任务规划问题的建模与求解,将规划运算过程完全在地面站或某个UAV上完成。2017年,崔乃刚等^[27]以多异构无人机执行侦察、打击以及评估任务为场景,利用分布式规划框架和图论思想对问题进行建模,在考虑了避碰、燃油和任务次序约束条件下,采取遗传算

法进行任务规划问题的求解。然而其规划出来的路径存在交叉现象,会增加无人机间的防撞可能性。2019年,Albani等^[28]在多机器人的工作区域中利用分层任务分配与路径规划寻找框架,该框架扩展了仿生多机器人任务分配(MRTA)框架,使用Floyd-Warshall算法将任务分配问题与路径规划问题耦合求解。该框架主要包括三个步骤,分别是把每个机器人通过感知获得可用的局部知识,以及与其他机器人交互的任务分配,利用其他机器人的知识制定运动规划。

综上所述,启发式算法在耗时和解的最优性能之间进行综合考虑,使得同时兼顾计算效率和性能之间平衡的一个次优解。其中,蚁群算法由于其分布式求解的方式,在解决多任务场景问题中受到广泛的使用。另外,为了更符合实际应用的需求,将任务分配与路径规划耦合求解是必不可少的。最重要的是,大部分学者在无人机任务规划过程中都考虑了任务的约束和时间的约束,在规划时往往会出现无人机没有被分配到任务,原因是在规划的过程当中没有考虑将所拥有无人机资源进行充分利用的约束条件。

本文主要解决复杂多任务多编队场景中,在考虑任务优先级、航路最短以及耗时最短等约束,建立任务分配和路径规划的联合优化模型,采用改进的蚁群算法实现任务规划。其中,改进的蚁群算法主要是为了避免在任务分配过程当中出现路径交叉、资源分配不均匀的问题。为了解决该问题,本文主要通过引入执行任务的编队数量的约束,且改进信息素更新机制来实现。

2 问题描述

2.1 任务分配和路径规划联合优化模型

任务分配是运筹学中基本的组合优化问题。多无人机任务分配是指在给定无人机种类和数量前提下,充分考虑战场环境、任务要求和载荷能力约束,研究如何将合适的任务在合适的时间分配给合适的无人机。典型的任务分配模型有基于旅行商(Travelling Salesman Problem, TSP)模

型、混合整数线性规划 (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) 模型、车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem, VRP) 模型、指派问题模型及运输问题模型。上述模型通常用于单智能体场景中。随着信息技术的发展,无人机的能力和应用领域越来越广泛。为了完成一项复杂的任务,需要多无人机合作和协调。复杂环境下的多无人机系统的协作与分配是研究热点问题。

本文旨在解决复杂环境中,大型固定翼无人机投放小型固定翼无人机群,在经过巡航阶段后,抵近目标区域,进行地毯式搜索侦察、干扰等任务。在整个过程中,无人机编队的任务规划包括任务规划和分配、航路规划。本文研究的是多无人机编队多类型任务分配问题以及航迹规划问题,由大型无人机携带小型无人机群飞往任务执行区,首先通过大飞机抛撒小型无人机群,再通过任务分配指令将小无人机群分成多个任务组进行巡航至任务地点,以不同的任务队形执行任务。每个无人机编队由一个无人机做长机,多个无人机做僚机来实现队形的控制。任务分配准则是整体工作效益最大化、耗时最小化。下面将对含约束情况下的任务分配模型建立展开详细的介绍。本文的任务规划场景示意图如图1所示。

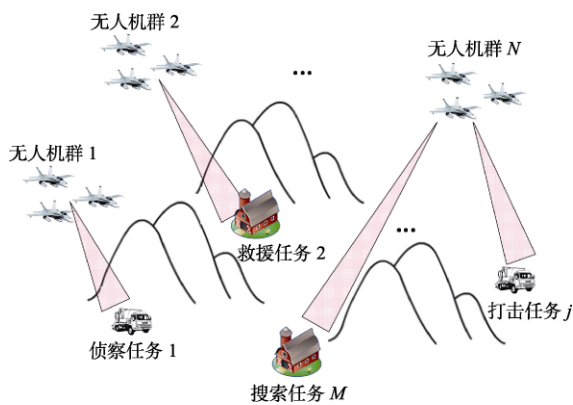


图1 多任务多编队任务规划的示意图

Fig. 1 Multi-task multi-subgroup task planning

如上述任务场景所示,假设有 N 个无人机编队组成的固定翼无人机集群集合 $U=[U_1, U_2, \dots, U_N]$, K 个任务的集合 $M=[M_1, M_2, \dots, M_K]$, 每个固定翼无人机编队均可执行任意任务, 每个任务需要的

编队数量小于等于 1, 不同的任务需要无人机编队用不同的队形去完成。例如, 侦察任务需要使用“一字队形”才能保证侦察范围的覆盖率。而突防攻击任务需要使用“三角队形”才能保证前方无人机攻击后方无人机掩护的安全性。

与传统任务分配建模不同, 本文的固定翼无人机编队在执行任务时, 会同时兼顾任务的优先级顺序和距离约束进行选择。具体是指, 每个固定翼无人机编队在执行任务区域时根据自己的队形优先选择与自己相对应的任务区域, 因而每个编队都有自己对应的优先级准则, 当排在优先级最前面的任务完成时, 再去变换队形完成下一个优先级的任务。要求当任务分配结束后, 必须保证所有任务均被执行。因此, 对于编队 U_1 来讲, 其执行任务的优先级是 M_1, M_2, \dots, M_K , 对编队 U_2 来讲, 其执行任务的优先级是 $M_2, M_3, \dots, M_K, M_1$, 对于编队 U_n 来讲, 其执行任务的优先级是 M_K, \dots, M_2, M_1 。另外, 通过设计任务评价矩阵来判断该无人机是否已经执行任务, 如果无人机已经执行任务, 则该无人机的任务评价矩阵为零。本文的目标是将 K 个任务分配给 N 个无人机编队, 使得在能耗和时间消耗最少的情况下总体收益最大。综上所述, 本文设计如下的任务和路径规划模型。

假设: (1) UAV 的燃油限制约束可以等价于 UAV 的最长飞行时间; (2) 无人机可以正常通信, 不受通信干扰, 甚至通信中断; (3) UAV 在任务期间不会被破坏。

$$\begin{aligned}
 J &= \max_{X_{N \times K}} \sum_{n=1}^N \frac{1}{H(d_{ij}, \text{Cost}(U_i, M_j))} \\
 \text{s.t. } L_1 &: t_{k,n} \leq T_{\max}, \forall R^n \in R^N \\
 L_2 &: x_{n,k} = \begin{cases} 1, & \text{任务 } n \text{ 分配给编队 } k \\ 0, & \text{任务 } n \text{ 不分配给编队 } k \end{cases} \\
 L_3 &: \sum_{k=1}^K x_{n,k} \leq 1, \forall R_k \in R_K \\
 L_4 &: d_{ij} = \|p_{\text{UAV}_i} - p_{M_j}\|, \quad i=1, 2, \dots, N, \\
 & \quad j=1, 2, \dots, M \\
 L_5 &: N = K
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中, J 函数为本文的优化指标;

$\frac{1}{H(d_{ij}, \text{Cost}(U_i, M_j))}$ 为本文的任务分配和路径规划的综合代价; L_1 代表时间的约束; L_2 代表任务分配到无人机的值; L_3 代表一个任务仅需要一个编队来完成。通常, 任务规划是在上述约束条件下进行任务分配。

不同于传统的建模方式, 本文为了充分利用所有的编队资源, 使得任务完成的时间消耗最少, 并兼顾执行任务的优先级别和路径最优的原则。设置了约束条件 L_4 和 L_5 , p_{UAV_i} 代表 i 号编队的位置, p_{M_j} 代表 j 号任务的位置。 L_4 代表每个无人机编队在选择任务时仍要考虑就近原则, 即假设对于任务 M_1 来讲, 编队 U_1 和编队 U_2 均搜索到任务 M_1 , 按照任务优先级, 此时应该编队 U_1 去执行 M_1 , 然而此时编队 U_2 距离 M_1 更近, 且若编队 U_1 去执行 M_1 可能会与其他编队的路径出现交叉, 会增大编队之间的碰撞的可能性。因此, 本文将会安排编队 U_2 去执行 M_1 , 编队 U_1 去执行其他任务。 L_5 条件是指执行任务的编队数量和所拥有的编队总数量相等, 该约束避免了出现无人机没有被分配到任务的情况。

2.2 无人机集群编队 ID 设计

在进行无人机多编队任务分配和路径规划之前, 本文首先将散乱的无人机群通过调用 ID 的方式实现各编队的集结。ID 表示包括编队编号和各编队各无人机的编号。然而, 在编程过程中考虑到变量名的第一个字符不能是数字, 所以本文将采用 UAV+ID 作为这架飞机的名字。

(1) 方法 1: 十进制数表示法

由于本文的无人机数量为 30 架, 因此本文通过三位十进制数来设计 ID 编号, 如图 2 所示, 其中, 百分位的十进制数代表无人机编队的编号,

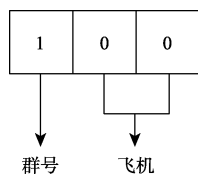


图 2 基于十进制编队 ID 的设计

Fig. 2 Design of formation ID based on decimal

十分位和个位的十进制数的组合代表编队中各无人机的编号。因此, 利用十进制数设计的无人机 ID 的格式为 UAV101, UAV315 等。其分别代表 1 号编队中的 1 号无人机, 3 号编队中的 15 号无人机。

(2) 方法 2: 二进制数表示法

另外一种设计无人机 ID 的方式是采用二进制的方式。与方法 1 类似, 编队 ID 的设计包含编队编号和编队中各无人机的编号, 总共包含 8 位, 前四位是指无人机编队的编号, 后四位是指编队中各无人机的编号。如图 3 所示, 例如, 00010010 和 00100011 则分别代表 1 号编队中的 2 号无人机和 2 号编队中的 3 号无人机。

通过对比分析, 为了更加清晰易懂地识别编队编号, 本文选用方法 1 来设计各无人机的 ID 编号。由于本文在集中式框架下进行编队, 在分配任务时, 将各编队视为整体。

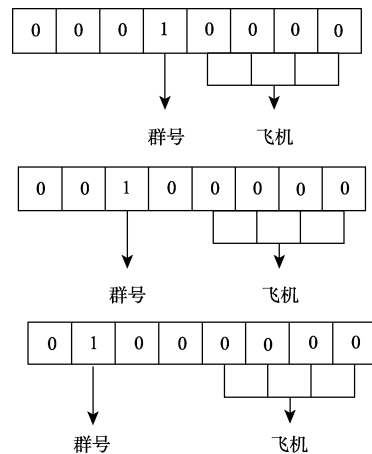


图 3 基于二进制编队 ID 的设计

Fig. 3 Design of formation ID based on binary

3 基于改进的蚁群算法的任务分配和路径规划

与传统的蚁群算法不同的是, 本文将任务分配和路径规划耦合讨论。由 2.1 节建模分析可知, 多无人机多任务规划问题是一个典型的组合优化问题, 且在文献[29-30]中已经证明了该问题是一个 NP-hard 问题, 因此其求解难度很大。正如研

究现状分析可知，为了降低求解难度，通常任务分配与路径规划可分为两个子问题来求解，路径规划的输入是任务分配的任务序列，弱化其两者之间的耦合性。然而，这种处理方式往往不考虑模型自身的运动学约束、任务之间的相互影响，以及任务分配取决于路径长度，只有根据分配策略才能获得准确的路径长度等因素。因此，任务分配与路径规划问题必须耦合^[31]分析才满足实际要求。

另外，为了考虑任务优先级顺序和充分利用无人机编队资源的约束，本文设计新的信息素更新机制。传统的蚁群算法信息素更新机制，对于蚂蚁来讲，每个任务对应的 Q 是在同样的条件下进行更新的。即在同样的信息素浓度增强系数的影响下，蚂蚁搜索任务时不会考虑任务的优先级顺序。然而，这种更新机制在本文的任务背景下会导致无人机编队在执行任务时有可能存在队形不断切换的问题，增加了问题的复杂性。

为了解决上述问题，本文在使用蚁群算法求解多任务分配问题时，将本文所期望的整体收益函数模块加入到概率更新公式中，使得蚁群在搜索的过程中有着更多的启发信息。更有针对性地找到满足本文需求的目标，改善了传统蚁群算法的随机性和解的最优性。为了使得无人机编队在搜索寻找任务时能够兼顾任务的优先级约束，保证无人机在任务分配过程中，能够充分利用资源，使得总体工作时间尽可能较少，本文通过把任务优先级因素考虑到信息素更新机制中。具体是指，通过对无人机编队和任务进行编号，相应的编队对应的与其队形相符合的任务。蚂蚁在搜索任务时，如果无人机编队编号与任务编号对应，则其留下的信息素浓度将会更多，反之，当无人机编队搜索到的任务编号不对应时，其留下的信息素浓度会较少。信息素增强度系数 Q 的设置如下。

$$Q_{(i,j)} = \begin{cases} A, & \text{若 } i = j \\ B, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

同时，本文在进行任务分配的同时，兼顾路径规划的实际情况。首先，将任务随机分配给某个节点处。然后根据当前蚂蚁编号，临界点矩阵

采取不同的分配策略的蚂蚁编号的临界点。其中蚂蚁在公式(2)信息素增强因子启示下，散布信息素浓度，更新信息素浓度。蚂蚁根据信息素规则，每个任务分配好无人机编队后，本文同时进行路径规划的求解，在任务分配过程中，无人机获得无人机任务序列后，路径规划过程为每个无人机生成可飞行安全的路径，以最小化/最大化预定义的目标函数，如寻求最短的飞行路径。

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q_{(i,j)}}{\sum_{k=1}^M H(d_{ij}, \text{Cost}(U_i, M_j))} & (3) \\ 0 \end{cases}$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^M \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (4)$$

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (5)$$

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}^k)^\alpha \times (1/d_{ij})^\beta}{\sum_{j \in N_i^k} (\tau_{ij}^k)^\alpha \times (1/d_{ij})^\beta} & j \in N_i^k \\ 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中， $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻节点 i 与节点 j 之间的信息素浓度； ρ 为信息挥发因子； α 为信息启发因子； β 为期望启发式因子； $H(d_{ij}, \text{Cost}(U_i, M_j))$ 为固定翼无人机编队任务分配和路径规划的综合代价； $\text{Cost}(U_i, M_j)$ 为蚁群根据任务执行难易程度选择任务 i 的代价； d_{ij} 为无人机编队与任务之间的距离。本文所提算法的流程图如图 4 所示。

本文所提算法的运算复杂度分析如下：假设每个编队需要执行 n 个任务，采用改进的蚁群算法的求解运算时间复杂度为 $O(n^4)$ ；空间复杂度为 $O(n^2)$ 。根据编程过程当中循环迭代机制，其中 n 是任务数量， m 是蚂蚁数量， T 是迭代次数， m 通常取 n 的 $2/3$ ，记 $m=2n/3$ ； T 通常取 n 的倍数，记 $T=k \cdot n$ ，则时间复杂度 $2n(n-1)nTnk/3$ ，当 n 趋于无穷大时， k 会远小于 n ，故时间复杂度为 $O(n^4)$ 。空间复杂度 $n \cdot n + n \cdot m$ ，当 n 趋于无穷大时，空间复杂度约等于 n^2 ，故空间复杂度为 $O(n^2)$ 。

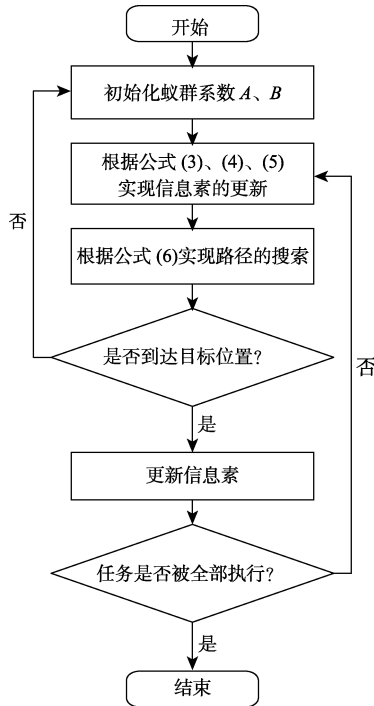


图 4 改进的蚁群算法的流程图
Fig. 4 Flow chart of improved ACO

4 仿真结果及分析

本文在 MATLAB2019b 平台进行仿真验证, 将进行多组仿真实验验证本文算法。本文将通过性能指标来分析算法的有效性。为了充分验证本文所提出算法的正确性, 设置了三种情形, 分别是编队个数小于任务个数、编队个数等于任务个数以及编队个数大于任务个数。并分别采用传统的蚁群算法和本文提出的改进的蚁群算法进行对比, 充分展示本文保证资源充分利用以及距离约束条件下的任务规划结果。

4.1 性能指标

为了评价本文算法的有效性, 本文设置以下性能指标。

- (1) 任务完成数量等于 K ;
- (2) 执行任务的无人机编队量等于 N ;
- (3) 每个编队路径的重合度为 0;
- (4) 资源分配不均匀度 (无人机闲置个数)

为 Y 。

4.2 仿真任务场景设置

在实验的过程中, 蚁群的数量很重要, 因为

蚁群数量过大, 会导致搜索过的路径上信息素变化趋于平均, 这样就不好找出好的路径了; 蚁群数量过小时, 易使未被搜索到的路径信息素减小到 0, 这样可能会出现早熟, 没找到全局最优解。通常, 在时间等资源条件紧迫的情况下, 蚂蚁数设定为城市数的 1.5 倍较稳妥。本文主要设置了三种任务, 分别是抵近侦察、协同干扰和电子对抗。

为了进一步说明本文所提算法的有效性, 将分别讨论无人机编队个数和任务个数相等和不等的情形下进行仿真验证。在仿真环境中本文设置了最多五个无人机编队和最多五个任务, 并根据优先级顺序依次注明无人机编队标识和任务标识, 分别是 $\{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5\}$ 和 $\{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5\}$ 。通过多次测试, 参数 $A = 200$ 、 $B = 50$ 效果最为满意, 根据本文的三种任务场景的难易程度, 本文设置 $Cost(U_i, M_j)$ 矩阵如下:

$$Cost(U_i, M_j) = \begin{matrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ \begin{matrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 10 & 10 & 10 & 10 \\ 10 & 1 & 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 1 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 & 1 & 10 \\ 10 & 10 & 10 & 10 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7)$$

4.3 多任务多编队任务规划仿真验证与分析

本文的子群集结仿真结果如图 5 所示, 蓝色的“★”代表无人机的起始位置, 红色的“▲”代表无人机的目标位置。红色的轨迹代表 Leader 的飞行轨迹, 其余黑色轨迹代表 Follower 的飞行

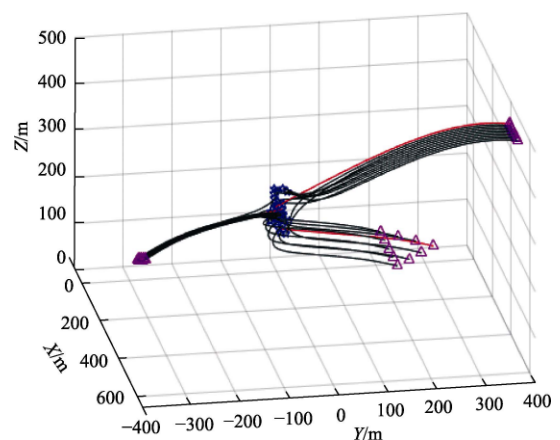


图 5 基于 ID 的无人机编队集结仿真图
Fig. 5 UAV subgroup aggregation based ID

轨迹。在不碰撞的前提下，30 架任意初始位置的无人机通过对 ID 的调用，使用集结控制算法，经过 400s 后，实现了三个子群的分群。每个子群集结成各自所指定的队形，分别为一字形、三角形以及圆周队形。

情形 1：编队个数小于任务个数($N < K$)

根据图 6(a)可知，当编队个数小于任务个数时，利用蚁群算法求解任务规划问题时，存在两

个无人机编队路径交叉的现象。通过本文所提出的启发式蚁群算法，当编队个数小于任务个数时，充分利用了每个无人机编队资源，并且在兼顾距离约束和编队执行任务的优先顺序约束的条件下，满足本文任务分配和路径规划的性能指标，分配结果如图 6(b)所示。表 1 对比说明了本文所提算法路径重合度优于传统的蚁群算法，即防撞性能更优。

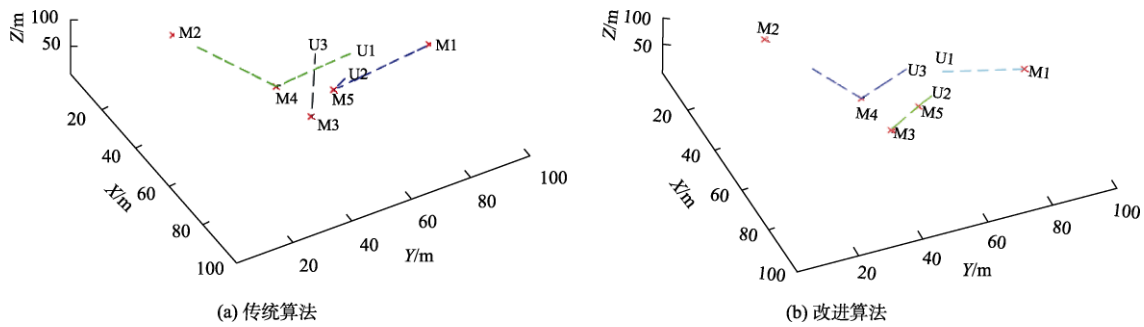


图 6 传统的和改进的蚁群任务分配与路径规划仿真图($N < K$)

Fig. 6 Traditional and improved ACO task assignment and path planning($N < K$)

表 1 多任务多编队任务分配和路径规划指标 (情形 1)

Table 1 Index of multi-task, multi-subgroup task allocation and path planning (case 1)

性能指标	传统的蚁群算法	本文所提算法
完成任务数量	5	5
执行任务编队数量	3	3
路径重合度	1	0
资源分配不均匀度	0	0

情形 2：编队个数等于任务个数($N = K$)

根据图 7(a)可知，当编队个数等于任务个数时，利用蚁群算法求解任务规划问题时，同样存在两个无人机编队“空闲”的现象。通过本文所提出的启发式蚁群算法，当编队个数等于任务个数时，充分利用每个无人机编队资源，并且在兼顾距离约束和编队执行任务的优先顺序约束的条件下，满足本文任务分配和路径规划的性能指标，分配结果如图 7(b)所示。表 2 说明本文所提算法在该场景中资源分配更加均匀，不存在无人机空闲的情形。

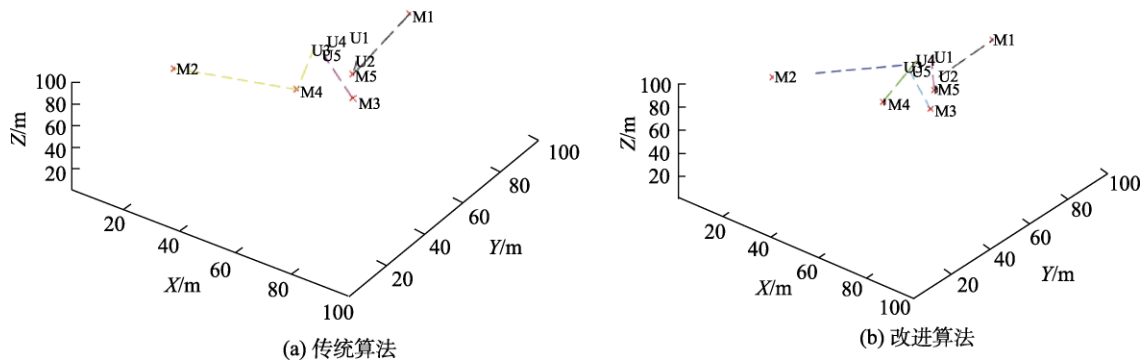


图 7 传统的和改进的蚁群任务分配与路径规划仿真图($N = K$)

Fig. 7 Traditional and improved ACO task assignment and path planning($N = K$)

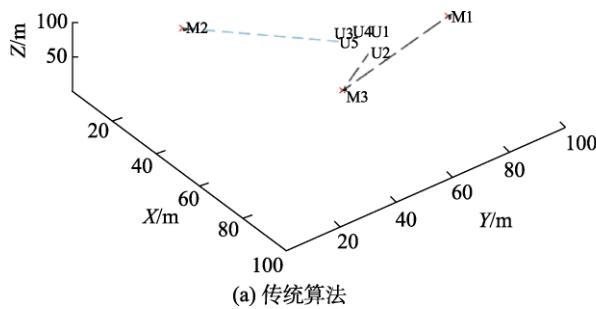
表 2 多任务多编队任务分配和路径规划指标 (情形 2)

Table 2 Index of multi-task, multi-subgroup task allocation and path planning (case 2)

性能指标	传统的蚁群算法	本文所提算法
完成任务数量	5	5
执行任务编队数量	5	5
路径重合度	0	0
资源分配不均匀度	2	0

情况 3: 编队个数大于任务个数($N > K$)

根据图 8(a)可知, 当编队个数大于任务个数时, 利用蚁群算法求解任务规划问题时, 同样存在三个无人机编队“空闲”的现象。经过本文所提出的启发式蚁群算法, 当编队个数大于任务个数时, 由于每个任务仅需要一个编队执行, 所以



仍然存在两个编队闲置, 但与传统的蚁群算法相比, 本文所提算法充分利用了每个无人机编队资源, 并且在兼顾距离约束和编队执行任务的优先顺序约束的条件下, 满足本文任务分配和路径规划的性能指标, 分配结果如图 8(b)所示。同时, 表 3 表明在该场景中本文所提算法的分配均匀度优于传统的蚁群算法。

表 3 多任务多编队任务分配和路径规划指标 (情形 3)

Table 3 Index of multi-task, multi-subgroup task allocation and path planning (case 3)

性能指标	传统的蚁群算法	本文所提算法
完成任务数量	3	3
执行任务编队数量	5	5
编队路径重合度	0	0
资源分配不均匀度	3	2

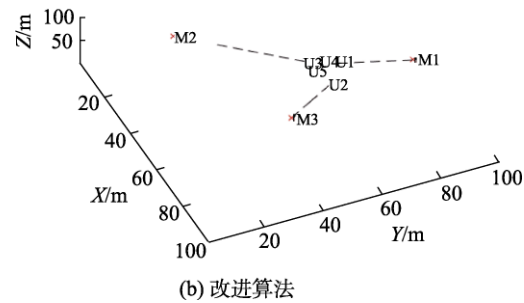


图 8 传统的和改进的蚁群任务分配与路径规划仿真图($N > K$)

Fig. 8 Traditional and improved ACO task assignment and path planning($N > K$)

5 结 论

本文主要解决了多任务多编队的任务分配和路径规划问题。通过对现有的任务分配算法进行调研发现, 蚁群算法是解决多编队多任务分配和路径规划有效的解决算法, 在保证较优解的同时计算效率也可满足需求。同时, 指出了任务分配和路径规划过程中没能充分利用资源, 使得出现无人机“空闲”的问题, 以及路径交叉问题。针对上述问题, 本文通过分析多任务多编队的任务分配和路径规划的实际需求, 在考虑距离、时间以及任务优先级等约束基础上, 建立了任务分配和路径规划耦合的优化模型, 且提出了启发式的蚁群算法。最后, 通过仿真验证本文算法与传统蚁群算法的效果对比, 证明了本文算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Malvankar-Mehta M S, Mehta S S. Optimal task allocation in multi-human multi-robot interaction[J]. Optimization Letters, 2015, 9(8): 1787-1803.
- [2] Berger J, Lo N, Barkaoui M. Static target search path planning optimization with heterogeneous agents[J]. Annals of Operations Research, 2016, 244(2): 295-312.
- [3] Bays M J, Wettergren T A. Service agent-transport agent task planning incorporating robust scheduling techniques[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 89: 15-26.
- [4] Kalra N, Martinoli A. Comparative study of market-based and threshold-based task allocation[J]. Distributed Autonomous Robotic Systems, 2006, 7: 91-101.
- [5] Tang F, Parker L E. ASyMTRe: Automated synthesis of multi-robot task solutions through software reconfiguration[C]. In Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, April 18-22, 2005.
- [6] Bays M J, Wettergren T A. Service agent-transport agent task

- planning incorporating robust scheduling techniques[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 89: 15-26.
- [7] Chen J, Sun D. Resource constrained multirobot task allocation based on leader-follower coalition methodology[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011.
- [8] Michalewicz Z, Fogel D B. How to solve it: Modern heuristics[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004.
- [9] Yuan M X, Jiang Y F, Shen Y, et al. Task allocation of multi-robot systems based on a novel explosive immune evolutionary algorithm[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 246-247: 331-335.
- [10] Manathara J G, Sujit P B, Beard R W. Multiple UAV coalitions for a search and prosecute mission[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2011, 62(1): 125-158.
- [11] Marden J R, Wierman A. Distributed welfare games with applications to sensor coverage[C]. Decision and Control, Cancun, Mexico, December 9-11, 2009.
- [12] Nagarajan T, Thondiyath A. An algorithm for cooperative task allocation in scalable, constrained multiple robot systems[J]. Intelligent Service Robotics, 2014, 7(4): 221-233.
- [13] Kim M H, Baik H, Lee S. Response threshold model based UAV search planning and task allocation[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2014, 75(3): 625-640.
- [14] Zhao X, Zong Q, Tian B, et al. Fast task allocation for heterogeneous unmanned aerial vehicles through reinforcement learning[J]. Aerospace Science and Technology, 2019: 92.
- [15] Dai W, Lu H, Xiao J, et al. Multi-robot dynamic task allocation for exploration and destruction[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2020(98):455-479
- [16] Brown K, Peltzer O, Sehr M A, et al. Optimal sequential task assignment and path finding for multi-agent robotic assembly planning[J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2020, 27: 441-447.
- [17] Gibson J, Schuler T, Mcguire L, et al. Swarm and multi-agent time-based A path planning for LTA3 systems[J]. Unmanned Systems, 2020, 8(3): 253-260.
- [18] Zhou Z, Feng J, Gu B, et al. When mobile crowd sensing meets UAV: Energy-efficient task assignment and route planning[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(11): 5526-5538.
- [19] Hafez A T, Kamel M A. Cooperative task assignment and trajectory planning of unmanned systems via HFLLC and PSO[J]. Unmanned Systems, 2019, 7(2): 65-81.
- [20] 唐俊林, 张栋, 王玉茜, 等. 防空作战多传感器任务规划算法设计[J]. 无人系统技术, 2019, 2(5): 46-55.
- [21] 史人赫, 宝音贺西, 龙腾, 等. 基于网格编码差分进化的在轨服务星群任务规划方法[J]. 无人系统技术, 2020, 3(5): 24-29.
- [22] 于晓强, 郑红星. 基于拓展 CBBA 算法的在轨装配航天器任务分配技术研究[J]. 无人系统技术, 2019, 2(4): 46-53.
- [23] 朱利, 符小卫. 基于 Voronoi 图质心的多无人机协同区域搜索算法[J]. 无人系统技术, 2019, 2(2): 39-51.
- [24] 杜越洋, 赵盾, 闫智超. 基于数据分发服务的无人机任务载荷综合仿真平台研究[J]. 无人系统技术, 2021, 4(1): 79-86.
- [25] Kim M H, Baik H, Lee S. Resource welfare based task allocation for UAV team with resource constraints[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2015, 77(3-4): 611-627.
- [26] Deng Q B, Yu J Q, Wang N F. Cooperative task assignment of multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles using a modified genetic algorithm with multi-type genes[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(5): 1238-1250.
- [27] 崔乃刚, 吴蔚楠, 郭继峰. 分布式协同动态任务规划的建模与一体化求解方法[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(4): 523-529.
- [28] Albani D, Nardi D, Hönig W, et al. Summary: Distributed task assignment and path planning with limited communication for robot teams[C]. In Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, Montreal, QC, Canada, May, 13-17, 2019.
- [29] Rathinam S, Sengupta R, Darbha S. A resource allocation algorithm for multivehicle systems with nonholonomic constraints [J]. IEEE Transaction on Automation Science and Engineering 2007, 4(1): 98-104.
- [30] Chandler P R, Pachter M, Swaroop D, et al. Complexity in UAV cooperative control[C]. American Control Conference, Anchorage, AK, USA, May 8-10, 2002.
- [31] Zhen Z Y, Chen Y, Wen L D, et al. An intelligent cooperative mission planning scheme of UAV swarm in uncertain dynamic environment[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 100: 105826.

作者简介:



苏梅梅 (1993-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为无人机集群对抗中的任务理解与推演。



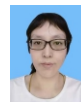
程咏梅 (1960-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为信息融合及其在多传感器目标跟踪、组合导航和相对导航中的应用。



胡劲文 (1983-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为无人机编队、智能车、协同控制等。本文通信作者。



赵春晖 (1973-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为无人机感知规避与视觉导航、图像处理。



贾彩娟 (1975-), 女, 高级工程师。主要研究方向为无人机控制系统与仿真。



徐钊 (1982-), 女, 博士, 副教授。主要研究方向为无人机编队、协同控制、网络控制、分布式滤波与控制等。



张剑锋 (1980-), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为无人机飞行控制系统设计、仿真及系统集成测试。

[引用格式] 马云红, 刘云昊, 杨誉乔. 基于一致性群组算法的多无人机自主协同任务分配[J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 51-58.

基于一致性群组算法的多无人机自主 协同任务分配

马云红¹, 刘云昊², 杨誉乔¹, 王鼎涵¹, 张健¹

(1. 西北工业大学, 西安 710072; 2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 多无人机自主协同是当前无人机参与空战的趋势, 无人机具有基于信息共享的自主任务分配能力对提高其自主作战能力具有重大意义。首先, 采用基于竞拍的一致性算法解决单个无人机完成单个任务的分配问题。其次, 采用基于一致性的拍卖包算法解决单个无人机完成多个任务的分配问题。然后提出了一致性的群组算法, 解决了多无人机到多任务的分配, 特别是需要多无人机形成联盟执行某个复杂任务的分配问题。最后, 引入的时间窗口限制不仅可以确保多无人机的联盟同时到达任务, 而且还保证在相应的时间要求中完成不同的任务。仿真表明, 提出的算法在解决不同类型任务的分配方面是有效的, 且适用于多无人机间的自主协作。

关键词: 任务分配; 基于一致性算法; 任务联盟; 时间窗限制; 自主协同

中图分类号: V19

文献标识码: A

文章编号: 2096-5915(2021)04-51-08

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.4.036

Multi-UAV Autonomous Cooperative Task Assignment Based on Consistent Group Algorithm

MA Yunhong¹, LIU Yunhao², YANG Yuqiao¹, WANG Dinghan¹, ZHANG Jian¹

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Multi-UAVs autonomous cooperation is the current trend of UAVs participating in the air combat. In order to improve the autonomous capabilities of UAVs, UAVs are required to have the capability of autonomous task allocation based on information sharing. The real-time task assignment is studied using consistency algorithm based on bidding. Firstly, the Consensus Based Auction Algorithm (CBAA) is used to solve the problem of single-UAV to single task. Secondly, the Consensus Based Bundle Algorithm (CBBA) is used to solve the problem of task assignment of single UAV to multi-tasks. Then the Consensus-Based Group Algorithm with Time Window (CBGA-TW) is proposed to solve the task allocation of multi-UAVs to multi-tasks, which resolves the task allocation issues requiring multi-UAVs to form alliance to execute a complicate mission under the time window limit. Finally, the introduction of time window restrictions not only ensures that the UAVs' alliance arrive the task simultaneously, but also guarantees that different tasks are completed in the corresponding time requirement. Simulation demonstrates that the algorithm proposed by the paper is effective in solving the different types of task assignment issues, and the algorithm is useful to make the multi-UAVs achieve autonomous collaboration.

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-06-20

基金项目: 航空基金(20200020053002); 大学生创新创业训练项目(S202010699026, S202010699283)

Key words: Task Allocation; Consensus-based Algorithm; Task Alliance; Time Window Limitation; Autonomous Collaboration

1 引言

随着无人机的轻量化、智能化发展,无人机在各个领域发挥越来越重要的作用^[1-2],凸显了无人机智能化的优势,多无人机自主协同执行多任务成为可能。同时,随着无人机的作用得到不断的开发和拓展,无人机的协同任务分配逐步由单无人机执行单任务,转变为单无人机执行多任务,再到多无人机执行单任务的任务联盟任务分配问题。即多无人机需要适时组成小的“任务联盟”合作完成一个复杂的任务。例如,在进行大宗货物搬运或者危险环境的救援等活动时,需要不止一架无人机执行任务。这种依靠多无人机自主组队解决大型复杂任务的需求在现代化空战中更为迫切^[3]。因此,对于多无人机能够自主协同完成不同类型不同数量任务的任务分配问题研究具有重要意义。

无人机任务分配通常是指一定的任务集合由多架无人机执行,根据任务的属性和任务的位置确定最佳的任务分配方案,使得无人机执行完成所有任务的时间最短或者收益最大。任务分配本质上是一种组合优化问题,可以用一般的解决 NP-hard 问题的方法求解。文献[4-5]采用启发式空间搜索方法求解车辆完成多个任务的最优任务路径问题的解。文献[6]采用了蚁群算法进行这类问题的求解。文献[7]采用了遗传算法进行动态最优任务路径优化。文献[8-9]将遗传算法扩展到多个无人机多任务分配问题求解。文献[10]采用改进 NSGA 算法实现无人机联盟多任务的任务分配。然而,现有的这些算法,主要解决了静态规划,依赖对全局信息的获取。而自主任务规划要求能够根据动态变化的场景进行实时规划。分散算法是无人机之间基于实时信息共享的实时任务分配,可以应对实时变化的场景,成为多无人机自主协同任务分配的重要手段。文献[11]基于分散合作优化解决了任务目标函数独立的凸优化问

题,但仅适用于具有连续决策变量的凸优化函数。文献[12]采用基于分散化计算的匈牙利任务分配算法,可以解决目标函数独立的任务分配。这些算法可以在通信可靠的前提下实现基于中央集中控制中心的优化计算。但是,对于多无人机自主协同完成多任务来说,无人机通常处于敌方控制区域,没有传统通信基础设施进行通信辅助,特别是如果在空域或水下环境执行任务时,甚至没有通用基础通信条件,不能保证所有信息同时共享。为此需要设计基于无人机之间的信息共享的分散算法,提升无人机自主任务分配的适用性和鲁棒性,也降低对集中节点的指挥的依赖。文献[13]引入的基于一致性的拍卖算法(Consensus Based Bundle Algorithm, CBBA)算法,是一种基于协商机制的一致性规划方法,用于求解车辆完成运输任务的车辆路径问题。文献[14]基于拓展的CBBA算法进行了轨装配航天器的任务分配研究。文献[15]采用合同网算法进行了多任务的分配。文献[16]提出部分重规划思想,结合合同竞拍实现了实时动态任务分配。这些文献完成了一致性算法下的任务分配。但是,在多无人机协同执行多任务的情形下,有些任务是有时间约束的,即必须在制定的时间内完成,否则失去作战价值。这类任务分配问题就是带有时间窗约束的任务分配问题。文献[17]讨论了带时间窗约束的邮递员路径问题。采用的是把具有时间约束的客户和没有时间约束的客户先聚类后求解的方法,再基于多目标优化的思想实现了带有时间限制的最佳邮递路径问题。文献[18]提出了一种聚类第一路线和第二路线的算法,即根据目标的时间窗口对目标进行聚类,然后为每个聚类生成运输问题,再用单纯形算法逐步解决这些运输问题,可以在短时间内找到高质量的解决方案。但这个算法还是一种集中式优化,需要所有信息共享,而且也不能解决多无人机协同同时到达任务的时间约束问题。本文基于目前的研究基础,对不同类型的

任务分配问题, 采用基于合同竞拍的机制实现实时任务分配, 并重点解决带时间窗限制的多无人机自主协同执行一个复杂任务分配问题的求解。

2 任务分配问题模型

2.1 单无人机单任务的任务分配模型

为了建立一般化的多无人机多任务分配模型, 首先分析最简单的任务分配模型—单无人机执行单任务的任务分配模型。对于单无人机执行单任务的任务分配问题, 是指限定多无人机中的每个无人机只能执行一个任务。单无人机执行单任务的任务分配的目的在于将 N_t 个任务分配给 N_a 个无人机, 保证目标函数达到最优的任务分配方案, 其对应的数学模型如下:

$$F = \max \sum_{i=1}^{N_a} \left(\sum_{j=1}^{N_t} c_{ij} x_{ij} \right), x_{ij} \in \{0,1\}, \forall (i,j) \in I \times J \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j=1}^{N_t} x_{ij} \leq 1, \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N_a} x_{ij} \leq 1, \forall j \in J \quad (3)$$

其中, x_{ij} 表示第 i 个无人机执行第 j 个任务, $x_{ij} = 1$ 表示第 i 个无人机执行第 j 个任务, $x_{ij} = 0$ 表示第 i 个无人机不执行第 j 个任务; c_{ij} 表示第 i 个无人机执行第 j 个任务的收益。式(2)表示一个任务只能由一个无人机执行的约束, 式(3)表示一个无人机只能执行一个任务的约束。

2.2 单无人机多任务的任务分配模型

单无人机执行多任务的任务分配问题, 是指多无人机中的每个无人机可以执行多个任务, 其具体任务数量受无人机能力、任务执行难度等条件限制。单无人机对多任务分配的目标是将 N_t 个任务分配给 N_a 个无人机。其中, 每个无人机可以分配 L_i 的任务数量, 并使任务收益最大。相应的数学模型如下:

$$F = \max \sum_{i=1}^{N_a} \left(\sum_{j=1}^{N_t} c_{ij} x_{ij} \right), x_{ij} \in \{0,1\}, \forall (i,j) \in I \times J \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j=1}^{N_t} x_{ij} \leq L_i, \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{N_a} x_{ij} \leq 1, \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^{N_t} x_{ij} = \min\{N_a L_t, N_t\} \quad (7)$$

其中, 式(5)表示无人机最多执行 L_i 个任务。式(6)表示每个任务由一架无人机执行, 式(7)保证所有任务都要执行。

2.3 多无人机联盟协同执行多任务的任务分配模型

将需要两架及以上无人机合作完成一个任务的分配, 定义为无人机联盟协同执行多任务的分配问题, 而同时参与协同执行一个任务的无人机小组定义为任务联盟。

因此, 多无人机任务联盟协同执行任务的分配问题, 是指每个无人机可以执行多个任务, 同时有些任务又要求多架无人机组成联盟共同完成的复杂情况。任务联盟的成员数量定义为联盟规模。任务联盟规模一般有定值和最小值两种情况, 如大宗物品搬运任务的规模一般为某个定值, 即需要多少无人机完成搬运, 集中救援则可以设置为最小值, 即最少需要多少无人机参与救援, 也可以设定为定值, 即指定固定的无人机数量完成特定的任务。本文的任务联盟的规模采用定值。即任务联盟任务分配是将 N_t 个任务分配给 N_a 个代理无人机, 其中的复杂任务需要特定规模的无人机联盟完成。在任务联盟协同完成任务的前提下, 以最优的资源组合完成所有的任务。记无人机可以分配 L_i 的任务数量, 无人机联盟规模设定为 L_j , 相应的数学模型表示为

$$F = \max \sum_{i=1}^{N_a} \left(\sum_{j=1}^{N_t} c_{ij} x_{ij} \right), x_{ij} \in \{0,1\}, \forall (i,j) \in I \times J \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j=1}^{N_t} x_{ij} \leq L_i, \forall i \in I \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{N_a} x_{ij} \geq L_j, L_j > 0, \forall j \in J \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^{N_t} x_{ij} = \min\{N_a L_t, N_t\} \quad (11)$$

$$T_{ij} \in [T_{j\min}, T_{j\max}] \quad (12)$$

其中，式（9）是对无人机最多执行 L_i 个任务的约束。式（10）表示复杂任务至少需要有 L_j 个无人机完成。式（11）约定所有任务都要完成。式（12）约定无人机 i 执行任务 j 的时刻位于任务 j 的执行时间区间。 $T_{ij\text{-start}}$ 表示无人机 i 执行任务 j 的开始时间， $T_{j\text{min}}$ 为任务 j 的可执行的开始时间， $T_{j\text{max}}$ 是任务 j 的可执行的结束时间。

3 任务分配算法

3.1 基于一致性的拍卖算法原理

本文采用基于一致性的竞拍算法实现任务分配，即将任务作为待拍卖的货品，无人机根据自身完成任务的能力（到达任务的时间）对任务进行竞价，最后以所有无人机的收益综合最大达成拍卖，从而实现任务分配。常规的拍卖活动是一种集中式的控制机制，通常由拍卖师负责控制拍卖流程，是一种集中式的任务分配。本文的任务分配采用竞拍机制，但是拍卖结果是由所有竞拍者通过信息共享和通信协商达成一致实现的，即竞拍过程不需要控制中心进行计算并发放指令，而是完全依靠无人机借助通信网络进行信息交互，冲突消解，最终完成一致性和协调，得到最佳任务分配。这是一种分散式的任务分配，可以保证无人机在自带的通信设备情形下自主协商，完成任务分配。

3.2 单无人机单任务的任务分配的基于竞拍的一致性算法

3.2.1 变量定义

定义任务分配问题为 N_a 个无人机执行 N_t 个任务，则 $N_a \times N_t$ 的矩阵表示任务分配结果，其元素为 x_{ij} ， $x_{ij}=1$ ，表示无人机 i 执行任务 j ， $x_{ij}=0$ 表示无人机 i 不执行任务 j 。定义 \mathbf{x}_i 为状态向量，其长度为 N_t ， N_t 是任务数量， \mathbf{x}_i 记录无人机 i 认为当前自己获得的任务状态。记 \mathbf{y}_i 为胜者投标价格向量，长度为 N_t ，记录胜者的投标价格。 y_{ij} 记录无人机 i 认为的任务 j 的胜者投标价格。 \mathbf{c}_i 称为出价向量，长度为 N_t ，记录无人机 i 对所有任务

的出价。 c_{ij} 表示无人机 i 对任务 j 的出价，如果不出价则 $c_{ij}=0$ 。 \mathbf{h}_i 称为有效出价向量，长度为 N_t ，记录无人机 i 的每个任务出价是否有效。如果 $c_{ij} > y_{ij}$ ，即无人机 i 的出价大于目前它认为对任务 j 的最高出价，则 $h_{ij}=1$ ，否则 $h_{ij}=0$ 。 J_i 是代理无人机 i 的有效投标任务，代表无人机 i 所有的有效出价中最高的一个对应的任务。 \mathbf{g} 为 $N_a \times N_a$ 的通信矩阵， $g_{ik}=1$ 表示无人机 i 可以与无人机 k 通信， $g_{ik}=0$ 则表示无人机 i 不能与无人机 k 通信。 \mathbf{z}_i 是胜者向量，长度为 N_t ，记录每个任务的竞标成功无人机编号， z_{ij} 是无人机 i 收到的投标信息中对任务 i 的最高投标价格对应的无人机编号， I 为无人机集合， J 为任务集合。

3.2.2 基于竞拍的一致性算法流程

基于以上定义，基于竞拍的一致性算法（Consensus Based Auction Algorithm, CBAA）流程如下所述。CBAA 算法分为拍卖阶段和一致性阶段。第一阶段是拍卖阶段。如果无人机 i 没有任务，则进入拍卖环节，否则直接进入一致性阶段。在拍卖阶段，每一个无人机 i 根据自身完成任务的“能力”对任务 j 进行投标竞价。无人机 i 根据上一轮 $(t-1)$ 的拍卖结果和本轮 (t) 自己的出价情况更新两个向量 \mathbf{x}_i 和 \mathbf{y}_i 。第 t 轮次拍卖阶段的伪代码如下：

```

 $\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{x}_i(t-1); \mathbf{y}_i(t) = \mathbf{y}_i(t-1)$ 
if  $\sum_j x_{ij}(t) = 0$ , then
     $h_{ij} = \begin{cases} 1 & c_{ij} > y_{ij} \\ 0 & \text{others} \end{cases}$ 
    if  $h_{ij} \neq 0$ 
         $J_i = \arg \max_j c_{ij} \cdot h_{ij}$ 
         $y_{iJ_i}(t) = c_{iJ_i}$ 
    end if
end if

```

CBAA 算法的第二阶段是一致性阶段。每一个无人机 i 都将它最新的列表 \mathbf{y}_i 传送给它通信可达的邻近无人机 k ，同时从代理无人机 k 获取对方的 \mathbf{y}_k ，通过协商协议达成一致，消除冲突。协商原则包括：如果一个无人机发现对于某一个任

务其他无人机的出价高于自己, 那么该无人机放弃这个任务; 如果两个无人机发现对于某一个任务的出价相同, 则编号小的无人机获胜, 编号大的无人机放弃这个任务。为了解决异步通信过程中的通信不同步问题, CBAA 引入时间印记 s 标识数据时戳, 这样每轮的数据仅通信一次, 降低通信损耗。一致性阶段的伪代码如下:

```

consensus( $g_i(t), y_{k \in \{k|g_{ik}(t)=1\}}(t), J_i$ )
 $y_{ij}(t) = \max_k g_{ik}(t) \cdot y_{kj}(t), \forall j \in J$ 
 $z_{iJ_i} = \arg \max_k g_{ik}(t) \cdot y_{kJ_i}(t)$ 
if  $z_{iJ_i} \neq i$ , then
 $x_{iJ_i}(t) = 0$ 
end if
 $s_{ik} = t$ 
    
```

3.3 基于 CBBA 的单无人机执行多任务的任务分配

在无人机可以执行多个任务的情形下, 仍然采用基于一致性协商的合同竞拍机制进行任务分配。将每个无人机执行的任务表示成一个任务序列, 称为拍卖包。每个拍卖包标明了无人机执行多个任务的顺序。竞价时, 增加一个未被执行的任务进入任何一架无人机的序列。即 CBBA 算法。CBBA 算法的第一阶段是拍卖包构建阶段。即每个无人机执行的所有任务形成一个拍卖包, 拍卖包中的任务顺序就是无人机执行任务的路径。一个无人机 i 确定对任务 J_i 投标后, 将该任务 J_i 插入其先前路径中某一处, 则无人机 i 的拍卖包就相应地产生一个收益值。如果这个收益值大于当前的赢家, 无人机 i 将把任务 J_i 添加到它的拍卖包中。一直重复这个过程, 直到无人机 i 不能再添加任务到它的路径上。最后, 无人机 i 更新它认为的中标向量 z_i 和中标价格向量 y_i , 进入下一轮竞标。CBBA 算法的拍卖包构建阶段伪代码如下:

```

Procedure Bundle ( $z_i(t-1), y_i(t-1), b_i(t-1)$ )
 $x_i(t)=x_i(t-1); y_i(t)=y_i(t-1); b_i(t)=b_i(t-1); p_i(t)=$ 
 $p_i(t-1);$ 
while  $|b_i| < L_t$  do
 $c_{ij} = \max_{n \leq |p_i|} S_i^{p_i \theta_n(j)} - S_i^{p_i}, \forall j \in J \setminus b_i$ 
    
```

```

 $h_{ij} = \begin{cases} 1 & c_{ij} > y_{ij} \\ 0 & \text{others} \end{cases}$ 
 $J_i = \arg \max_j c_{ij} \cdot h_{ij}$ 
 $n_{iJ_i} = \arg \max_j x_n S_i^{p_i \theta_n(J_i)}$ 
 $b_i = b_i \theta_{\text{end}}(J_i);$ 
 $p_i = p_i \theta_{n_{iJ_i}}(J_i);$ 
 $y_{iiJ_i}(t) = c_{iJ_i};$ 
 $x_{iiJ_i}(t) = 1$ 
end while
    
```

CBBA 算法的第二阶段是一致性阶段。每一个无人机 i 都将它的最新向量表 z_i , y_i 和 s_i 传达给所有可以通信的无人机, 并根据它们各自的拍卖价格进行协商和冲突消解。一致性过程中的三个响应行为为“更新” $y_{ij}=y_{kj}$, $z_{ij}=z_{kj}$, “重置” $y_{ij}=0$, $z_{ij}=\emptyset$ 和“保留” $y_{ij}=y_{ij}$, $z_{ij}=z_{ij}$ 。这个冲突消解的过程中, 如果两个无人机 i 和 k 对位于 i 拍卖包中的特定任务 j 有冲突, 则失败的无人机 (假设是 k) 不仅需要重置任务 j , 还需要重置竞拍包内 j 之后的所有任务, 确保后续 CBBA 拍卖包在建立阶段的竞拍方案的合理性。如果两个无人机发现对于某一个任务的出价相同, 约定编号小的无人机的获胜。一致性阶段协议一致性冲突消解原则如表 1 所示。

表 1 一致性阶段冲突消解原则
Table 1 Principles of conflict resolution

发送	接收	接收者决策
k	i	如果 $y_{kj} > y_{ij}$, 更新; 否则, 保留
	k	更新
	$m \notin \{i, k\}$	如果 $s_{km} > s_{im}$ 或者 $y_{kj} > y_{ij}$, 更新; 否则, 保留
i	none	更新
	i	保留
	k	重置
	$m \notin \{i, k\}$	保留
$n \notin \{i, k\}$	none	保留
	i	如果 $s_{km} > s_{im}$ 或者 $y_{kj} > y_{ij}$, 更新; 否则, 保留
	k	如果 $s_{km} > s_{im}$, 保留; 否则, 重置
	m	保留
	$n \notin \{i, k\}$	如果 $s_{kn} > s_{in}$, $s_{kn} > s_{in}$, 更新;
none	$n \notin \{i, k, m\}$	如果 $s_{km} > s_{im}$, $y_{kj} > y_{ij}$, 更新;
	none	如果 $s_{km} > s_{im}$, $s_{km} > s_{im}$, 重置
	none	如果 $s_{km} > s_{im}$, 更新; 否则, 保留
	i	保留
none	k	更新
	$m \notin \{i, k\}$	如果 $s_{km} > s_{im}$, 更新; 否则, 保留
	none	保留

根据表 1 的冲突消解原则协商达成本轮一致，形成本轮竞价结果。

3.4 基于 CBGA 的任务联盟任务分配算法

基于与 CBBA 算法类似的拍卖包构建过程和一致性阶段过程，本文提出 CBGA 算法，完成任务联盟任务分配问题的求解。定义 $N_a \times N_t$ 的矩阵 x_i ，如果无人机 i 认为无人机 k 获得了任务 j ，那么 $x_{ikj} = 1$ ，否则 $x_{ikj} = 0$ 。

CBGA 算法的拍卖包构建阶段伪代码如下：

```

Procedure Bundle (  $x_i(t-1), y_i(t-1), b_i(t-1),$ 
 $p_i(t-1), z_i(t-1)$  )
   $x_i(t) = x_i(t-1);$ 
   $y_i(t) = y_i(t-1);$ 
   $b_i(t) = b_i(t-1);$ 
   $p_i(t) = p_i(t-1);$ 
   $z_i(t) = z_i(t-1)$ 
  while  $|x_{ij}| < L_t$  do
     $c_{ij} = \max_{n \leq |p_i|} S_i^{p_i \theta_n(j)} - S_i^{p_i}, \forall j \in J$ 
    for  $\forall j \in J$ 
      if  $L_j > 1$  then
        if  $L_j > (\sum_{k=1}^{N_a} x_{ikj} > 0), h_{ij} = 1$ 
        else if  $c_{ij} > \min(y_{ikj}), \forall k \in I$ 
           $h_{ij} = 1$ 
        else  $h_{ij} = 0$ 
        end
      end
       $h_{ij} = \begin{cases} 1 & c_{ij} > y_{ij} \\ 0 & \text{others} \end{cases}$ 
    end
    end for
     $J_i = \arg \max_j c_{ij} \cdot h_{ij}$ 
     $n_{iJ_i} = \arg \max_j x_n S_i^{p_i \theta_n(J_i)}$ 
     $b_i = b_i \theta_{n_{iJ_i}}(J_i);$ 
     $p_i = p_i \theta_{n_{iJ_i}}(J_i);$ 
     $y_{iiJ_i}(t) = c_{iiJ_i};$ 
     $x_{iiJ_i}(t) = 1$ 
  end while

```

3.5 时间窗限制的群组拍卖算法 (CBGA-TW)

3.5.1 CBGA 算法的不足

CBGA 算法可以实现任务联盟完成复杂任务的任务分配，但是没有考虑到复杂任务合作执行的时间问题，如大宗货物的搬运和危险环境的救援需要多架无人机同时执行搬运任务，无人机协同打击也需要同时到达。

3.5.2 基于时间窗的 CBGA-TW 算法

为了实现任务协同的同时到达要求，本文对 CBGA 算法进行了改进，提出了一种有时间窗限制的 CBGA-TW 算法。算法通过引入时间窗限制，解决合作执行任务的同时到达时间约束问题。

CBGA-TW 算法加入了对协同同时到达的时间窗约束，设计了能够体现时间窗约束的收益值，通过收益值的竞价，解决满足同时到达的时间约束问题。

在 CBGA-TW 算法的第一阶段，如果是 $L_j = 1$ 的简单任务，则采取 CBBA 算法进行解算。对于任务联盟任务，如果该任务尚未分配给足够多的无人机或者无人机 i 的出价高于现在投标价格中的最小值，则认为对于该任务的有效出价。CBGA-TW 算法的出价 c_{ij} 的表达式设计为

$$c_{ij} = \begin{cases} V_{ij} \times e^{-\lambda \Delta T} & T_{ij-\text{start}} \in [T_{j\text{min}}, T_{j\text{max}}] \\ 0 & T_{ij-\text{start}} > T_{j\text{max}} \end{cases} \quad (13)$$

$$\Delta T = T_{ij-\text{start}} - T_{j\text{min}} \quad (14)$$

其中， $T_{ij-\text{start}}$ 表示无人机 i 执行任务 j 的开始时间， $T_{j\text{min}}$ 为任务 j 的可执行的开始时间， $T_{j\text{max}}$ 是任务 j 的可执行的结束时间， $e^{-\lambda \Delta T}$ 是对时间的惩罚项，只有能在规定时间内执行任务的无人机才能获得收益，即如果无人机能够执行该任务的时间大于任务的结束时间，则收益值为 0，如果无人机能够执行的时间位于任务的执行时间窗内，则加入一个奖惩因子，时间差越小，收益值越大。保证满足带时间窗限制的任务获得优先分配权，也满足了时间窗的约束。

这里特别指出，每个无人机的收益值包括任务自身的价值以及由于任务时间满足时间窗约束

的奖惩系数。而无人机对任务的出价是基于无人机到达任务的飞行代价或者飞行距离计算的。无人机到达目标的飞行距离越短,飞行时间就越短,则可以给出的出价越高。这表示在计算无人机的任务收益时考虑了执行任务的时间,但是没有考虑环境中障碍情形的避障飞行的距离,仅采用到达任务的直线距离的飞行时间。收益函数的收益表达式加上时间窗约束的奖惩因子,可以针对时间窗满足条件进行任务估价,如果超过任务执行时间的收益值为 0。通过收益函数的评价限定了无人机联盟协同完成任务的同时达到。因此,基于这个收益函数的出价再经过一致性竞拍,可以得到最快时间完成所有任务的任务分配方案,同时保证需要多架无人机协同完成的任务的可靠执行。

4 基于 CBGA-TW 任务分配仿真

包含带时间窗约束的多无人机任务联盟任务分配是本文综合考虑多种约束的复杂任务分配问题,以这类问题的任务分配进行本文的算法仿真验证。设定仿真任务场景如下:多架异构型无人机执行不同类型的任务分配。即 6 架无人机完成 12 个任务,其中 I 型无人机 3 架,II 型无人机代理 3 架;I 型任务 6 项,每个任务需要 5 s 的执行时间,II 型任务 6 项,每个任务需要 10 s 的执行时间。无人机型号和它能够执行的任务匹配,即 I 型无人机可以执行 I 型任务,II 型无人机可以执行 II 型任务。其中任务 2 和任务 7 设定为需要两架无人机共同完成的任务,即 $L_2 = L_7 = 2$,任务 2 和任务 7 的时间窗都设置为 [5,15]。将无人机执行任务的时间(到达任务时间)作为出价和收益标准。参与作战的无人机之间都可以通信,即

$$g_{ij} = \begin{cases} 1 & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad \forall (i, j) \in I \times J \quad (15)$$

针对上述任务场景进行 CBGA-TW 算法仿真,采用 Matlab R2016b 软件作为仿真计算平台,并假设所有无人机间都能通信并正常收发数据。

仿真结果如图 1 和图 2 所示。

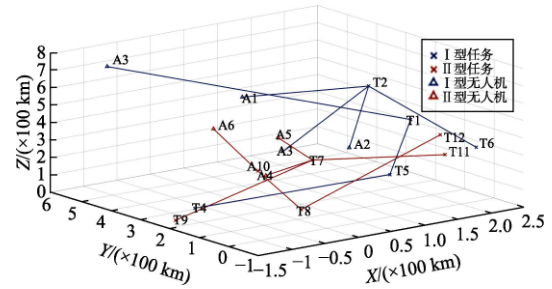


图 1 CBGA-TW 任务分配结果

Fig. 1 Task allocation results with CBGA-TW

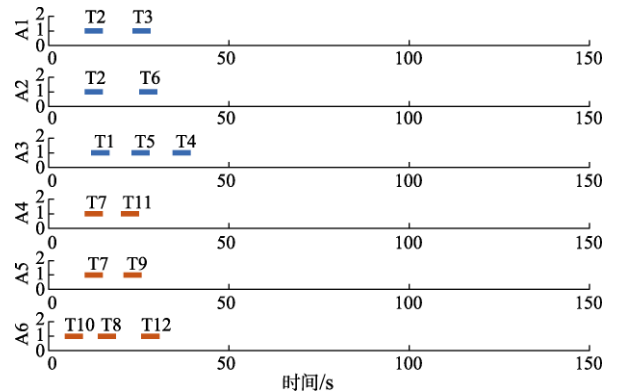


图 2 CBGA-TW 任务分配结果甘特图

Fig. 2 Gantt chart of CBGA-TW task allocation result

图 1 中 Δ 表示无人机的位置, \times 表示任务位置,实线表示规划后的代理无人机的路径。不同的颜色表示不同的无人机类型和任务类型,相同颜色进行无人机和任务匹配。

仿真结果显示,经过约 0.224937 s, 11 轮的 CBGA-TW 解算之后,所有任务得到最佳竞价方案,得到该场景下的任务分配结果。执行这组任务的总时间,即多无人机完成最后一个任务的时间为 39.354 s,得到的总收益为 749.6437。

通过图 1 和图 2 可以看到,任务 2 被同时分配给了无人机 1 和无人机 2,任务 7 被分配给了无人机 4 和无人机 5,两个任务都在时间窗限制内执行,满足了时间窗约束并达到同步,实现了多无人机协同执行一个复杂任务。可以说明 CBGA-TW 算法能够有效解决带时间约束的任务联盟的任务分配问题。

可以发现,采用 CBGA-TW 算法的多无人机联盟任务分配是基于时间窗限制的群组拍卖算法,通过时间窗限制条件的加入,保证了任务的同时执行。依靠无人机之间通信和一致协商,可

以达到最终的协同任务执行方案。整个过程不需要集中控制中心或人工参与，提升了多无人机自主任务分配、自主协同作战的能力。同时，本文提到的单无人机执行单任务的无人机任务分配和单无人机执行多任务的任务分配，也是基于无人机之间的通信协商的一致性竞拍协商机制完成的，也是自主任务分配。

5 结 论

本文进行了一致性群算法的多无人机协同作战的自主任务分配，包括单无人机执行单任务的多无人机任务分配、单无人机执行多任务的任务分配，以及无人机任务联盟的任务分配。本文提出了基于时间窗限制的多无人机一致性群组拍卖算法 CBGA-TW 算法，解决了在时间约束下的无人机联盟同时到达并执行任务的任务分配的问题求解。本文仿真验证了算法的有效性。同时说明基于信息共享的无集中控制的任务分配，可以完成多无人机自主任务联盟任务分配，提升了多无人机自主任务分配、自主协同作战的能力。

参 考 文 献

- [1] 樊洁茹, 李东光. 有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J]. 无人系统技术, 2019, 2(1): 39-47.
- [2] 张辰, 周乐来, 李贻斌. 多机器人协同导航技术综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(2): 1-8.
- [3] 庞强伟, 胡永江, 李文广, 等. 多无人机协同侦察任务规划方法研究综述[J]. 电讯技术, 2019, 59(6): 741-748.
- [4] Pillac V, Gendreau M, Guéret C, et al. A review of dynamic vehicle routing problems[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 225(1): 1-11.
- [5] Ritzinger U, Puchinger J, Hartl R F. A survey on dynamic and stochastic vehicle routing problems[J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(1): 215-231.
- [6] Montemanni R, Gambardella L M, Rizzoli A E, et al. Ant colony system for a dynamic vehicle routing problem[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2005, 10(4): 327-343.
- [7] 徐哲, 蒋进, 郑祥明. 基于多种群遗传算法的无人机集群并行任务分配[J]. 江苏航空, 2019(3): 10-13.
- [8] Edison E, Shima T. Genetic algorithm for cooperative UAV task assignment and path optimization[C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2008.
- [9] Guang X, Li L, Long T, et al. Cooperative multiple task assignment considering precedence constraints using multi-chromosome encoded genetic algorithm[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Florida, USA, 8-12 January, 2018.
- [10] Ma Y H, Bai S Y, Xu Z, et al. The Formation method of task coalition for multi-UAV cooperation[C]. IEEE International Conference on Control and Automation, October 9-11, 2020: 713-718.
- [11] Nedic A, Ozdaglar A. Distributed sub-gradient methods for multi-agent optimization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(1): 48-61.
- [12] Chopra S, Notarstefano G, Rice M, et al. A distributed version of the Hungarian method for multi-robot assignment[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(4): 932-947.
- [13] Choi H L, Brunet L, How J P. Consensus-based decentralized auctions for robust task allocation[C]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(4): 912-926.
- [14] 于晓强, 郑红星. 基于拓展 CBBA 算法的在轨装配航天器任务分配技术研究[J]. 无人系统技术, 2019, 2(4): 46-53.
- [15] 常松, 贾子彦. 基于改进合同网算法的多无人机任务分配[J]. 物联网技术, 2020, 10(5): 98-100.
- [16] Noam B, Jonathan P H. Partial replanning for decentralized dynamic task allocation[C]. AIAA SciTech Forum, California, USA, January 7-11, 2019.
- [17] Bretin A, Desaulniers G, Rousseau L M. The traveling salesman problem with time windows in postal services[J]. Journal of the Operational Research Society, 2021, 72(2): 383-397.
- [18] Semiz F, Polat F. Solving the area coverage problem with UAVs: A vehicle routing with time windows variation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 126: 103435.

作者简介：



马云红 (1972-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为无人机任务规划、复杂系统建模、智能优化算法。本文通信作者。



刘云昊 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为无人机集群控制、无人机协同。



杨誉乔 (2000-), 男, 本科生, 研究方向为无人机自主协同、无人机任务分配。



王鼎涵 (2000-), 男, 本科生, 研究方向为无人机智能决策、无人机航路规划。



张健 (1999-), 男, 本科生, 主要研究方向为无人机目标跟踪、无人机协同控制。

[引用格式] 李学成, 张润锋, 杨绍琼, 等. 不同通信概率下海洋滑翔机异构编队稳定性分析[J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 59-66.

不同通信概率下海洋滑翔机异构编队稳定性分析

李学成¹, 张润锋¹, 杨绍琼^{1,2}, 苗展展²

(1. 天津大学机械工程学院机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300350;
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋观测与探测联合实验室, 青岛 266237)

摘要: 海洋观探测任务的同步性与广域性需求促使海洋滑翔机产生了更灵活的运作模式。针对当前水下通信距离约束和复杂洋流干扰导致的机间通信链路难以保持稳定问题, 对波浪滑翔机与水下滑翔机在不同通信概率下编队构型的稳定性进行分析。首先, 对国内外海洋滑翔机编队发展现状进行概述。其次, 根据领导者与跟随者策略建立了海洋滑翔机编队构型, 并基于复杂网络理论, 提出了一种适用于异构编队系统的稳定性评估方法。最后, 通过 31 台海洋滑翔机进行案例分析, 对通信概率分别为 0.2、0.4 和 0.6 下编队构型的稳定性及受干扰后考虑动态配置的稳定性进行仿真实验, 得到通信概率为 0.6 时, 其稳定性综合评价指标 R 分别为 0.822 和 0.968, 具有较好的稳定性。研究可进一步为海洋滑翔机编队构型设计和实际海上试验任务规划提供技术指导。

关键词: 海洋滑翔机; 异构组网; 通信概率; 稳定性分析; 复杂网络

中图分类号: TP249

文献标识码: A

文章编号: 2096-5915(2021)04-59-8

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.4.037

Stability Analysis of Marine Glider Heterogeneous Formation under Different Communication Probability

LI Xuecheng¹, ZHANG Runfeng¹, YANG Shaoqiong^{1,2}, MIAO Zhanzhan²

(1. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. The Joint Laboratory of Ocean Observing and Detection, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: The requirement of synchronization for multiple gliders and wide area of ocean observation mission promotes flexible operation mode of marine vehicle. Due to the distance constraint of underwater communication and the disturbance of ocean current, it is difficult to maintain the stability of inter glider communication. The formation stability of wave glider and underwater glider under different communication probabilities is analyzed. Firstly, the development status of marine glider formation at home and abroad are summarized. Secondly, according to the leader-follower strategy, the formation configuration of glider is established. Then, based on the complex network theory, a stability evaluation method for a heterogeneous formation system is proposed. Finally, through the case analysis of 31 ocean gliders, the stability of formation configuration under communication probability of 0.2, 0.4 and 0.6 and the stability considering dynamic configuration after interference are simulated. When the communication probability is 0.6, the comprehensive stability and evaluation index R are 0.822 and 0.968 respectively, which have good stability. The re-

收稿日期: 2021-04-25; 修回日期: 2021-06-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11902219); 国家重点研发计划(2019YFC0311701); 天津市自然科学基金(18JCJQC46400); “鳌山人才”培养计划(2017ASTCP-OS05, 2017ASTCP-OE01)

search content can further provide technical guidance for the formation design and mission planning of ocean glider in the actual sea trial.

Key words: Ocean Glider; Heterogeneous Network; Communication Probability; Stability Analysis; Complex Network

1 引言

海洋中蕴藏着丰富的资源和无限的奥秘,对现代人类具有十分重要的意义。海洋资源勘探和海洋安全维护,事关我国的发展利益和安全利益^[1]。海洋滑翔机是一类用于海洋观测与探测的无人飞行器。水下滑翔机和波浪滑翔机作为两种新型的海洋滑翔机,在全球海洋观测系统中发挥着越来越重要的作用。水下滑翔机是利用净浮力和姿态角调节获得前向推力的新型水下飞行器,具有运行成本低、续航能力强、探测范围广等特点,能够实现海洋四维空间有力的观测与探测^[2-3]。波浪滑翔机是依靠波浪能实现前向驱动的海洋飞行器,它通过吸收海洋中丰富的波浪能资源并转换成高效的前向动力,通过搭载海洋科学传感器,可以对外海大洋海气界面进行连续实时观测与探测^[4]。随着海洋研究的逐步深入,单一海洋飞行器无法满足海洋观探测任务的同步性和广域性,因此,海洋飞行器协同观测成为海洋探索新的发展方向^[5]。2006年欧盟组织德国、法国、西班牙等多家科研机构开展了名为“未知环境下异构无人系统的协调与控制”技术研究(2006—2009年),该研究在真实的海洋环境中采用多台水下水面无人设备进行异构组网观测,缩短了海洋无人系统异构组网从理论到实践的差距^[6]。2009年在葡萄牙海域进行的多水下(水面)无人系统异构组网协同控制海上实验获得了较好的试验结果。2012年,由德、法、葡萄牙、意大利、西班牙等多家研究机构共同实施的“自组织海洋机器人系统——逻辑连接的物理节点”项目正式启动,此项目主要研究多海洋无人系统在海洋表面及海洋底部地形多变区域的高精度定位、自适应编队以及协同观测与探测技术,进一步提高异构协同观探测的精度^[7]。2012—2013年,英国南安普敦

国家海洋学中心在北大西洋中部署了三台Seaglider水下滑翔机,利用水下滑翔机编队对北大西洋中纬度垂直水速的观测,估算了湍动能的耗散率^[8]。2013年,日本海洋学会利用16台水下滑翔机观测到在台湾附近黑潮地区上空经过的14次台风期间海面 and 海底的变化^[9]。2018年,美国海军海洋局通过卫星通信实现同时协同控制50台水下滑翔机的目标,并寻求新型、自动和高效的方式控制100台水下滑翔机。国内关于海洋飞行器编队及异构组网的研究相对较晚。2014年,天津大学在中国南海西沙海域利用三台“海燕”水下滑翔机进行协同观测,初步验证了水下滑翔机协同控制能力^[10]。2017年,青岛海洋科学与技术试点国家实验室联合天津大学等多家研究机构采用“海燕”水下滑翔机、波浪滑翔机、C-Argo浮标等多种新型海洋装备对我国南海进行协同观测,首次为海洋中尺度涡研究提供了海洋动力、气象、生物、声学、化学等多学科综合数据^[11-12]。2019年5月,青岛海洋科学与技术试点国家实验室启动我国最大规模的异构综合观测系统,初步验证了异构无人编队的控制机理和运动规律^[13]。

在海洋滑翔机异构编队试验过程中,当处于编队关键位置的海洋滑翔机发生故障或受到攻击时,往往会导致编队部分或整体发生瘫痪^[14],因此,有必要对海洋滑翔机编队的稳定性进行评估,以期为实际海上试验提供有力的理论依据。赵宝强等^[15]采用李雅普诺夫方法分析了水下滑翔机的单机稳定性,为水下滑翔机编队的设计和控制提供理论依据。薛冬阳^[10]针对“海燕”水下滑翔机在不确定海洋环境下的编队运动控制,采用李雅普诺夫方法对编队运动过程稳定性进行分析,为水下滑翔机编队队形变换及控制提供了理论指导。但目前对海洋滑翔机异构编队稳定性的研究相对较少,且少有试验进行综合性的验证分析。

采用复杂网络进行稳定性的研究近年来逐步兴起,常用于海面无人艇、无人机编队等方面,可为我们提供参考,复杂网络的稳定性本质上是网络对节点和连边的响应。海洋滑翔机异构编队网络作为异构多层复杂网络,具有多功能相关性,当节点遭受外部攻击或内部损坏时,对整个系统的影响的不确定性增加。Bilal 等^[16]提出了目标故障下的分层复杂网络的鲁棒性量化,Cheng 等^[17]模拟并分析了相互依存网络中的灾难性级联。在一般情况下,评估复杂网络的稳健性的方法需要考虑对网络结构的目标攻击的复杂网络^[18-19]。然而,这些研究并未针对特定的系统进行网络构建,且对于整个编队系统尚无统一的稳定性评价体制。在海洋观测中,海洋滑翔机之间成功建立通信并完成信息交互和共享的可能性称为海洋滑翔机之间的通信概率,其范围为 0~1。海洋滑翔机之间的通信概率通常会受到剖面位置、机间距离和复杂洋流等多种因素干扰,对海洋观测与探测具有重要影响。而多数研究在对海洋滑翔机编队建模时未考虑机间水下通信或通信趋于理想化。

因此,本文面向实际海洋观探测应用的不确定性情况,针对不同通信概率下海洋滑翔机异构编队的稳定性进行研究,建立了海洋滑翔机异构编队网络模型,考虑编队中重要节点受到攻击后的动态重构,提出编队动态演变原则,针对海洋滑翔机异构编队系统提出一套评价体系,并通过试验仿真,验证了不同通信概率下编队的稳定性。实验结果可进一步为海洋滑翔机编队队形设计和实际海上试验任务规划提供技术指导。

2 海洋滑翔机异构编队网络模型

2.1 Leader-Follower 运动学模型

为了准确地对海洋滑翔机异构编队的稳定性进行分析,根据 Leader-Follower 规则进行海洋滑翔机异构编队网络模型构建,以波浪滑翔机与水下滑翔机为例,领导者与跟随者结构如图 1 所示。其中, x_L 、 y_L 为领导者的坐标, x_F 、 y_F 为跟随者的坐标, v_L 为领导者的速度, v_{F1} 、 v_{F2} 分别为水

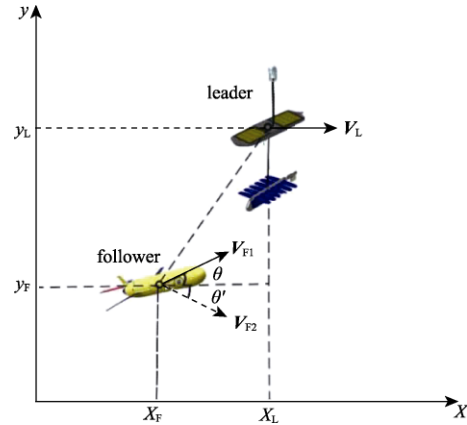


图 1 Leader-Follower 结构示意图

Fig. 1 Schematic of Leader-Follower structure

下滑翔机上浮和下潜时的速度, θ 、 θ' 为其与水平线之间的夹角。 x_δ 、 y_δ 为领导者与跟随者在两个坐标轴方向的距离, 则建立水下滑翔机上浮时 Leader-Follower 的运动表达式为

$$\begin{cases} x_\delta = x_L - x_F - (v_L t - v_{F1} t \cos \theta) \\ y_\delta = y_L - y_F - (v_L t - v_{F1} t \sin \theta) \end{cases} \quad (1)$$

2.2 模型演化原则

海洋滑翔机异构编队结构如图 2 所示。水下滑翔机之间及水下滑翔机与波浪滑翔机之间通过水声通信, 4000 Hz 左右的声波频率为远距离传递的最佳频率; 波浪滑翔机间为无线通信, 其通信频段为 840.5~845 MHz; 波浪滑翔机和水下滑翔机与岸基的通信方式为卫星通信, 具体包括铱星通信、天通通信、北斗通信等, 本文以铱星通信为例, 其通信波特率为 9600 bit/s。根据图论知识, 将海洋滑翔机异构编队网络模型视为节点和连边的集合, 即 $G=(V, E)$ ^[20]。

(1) 节点生成: 将每台海洋滑翔机视为一个节点, 波浪滑翔机由于承担水面观测和水下通信中继网关的任务, 为重要节点, 水下滑翔机为一般节点。任意两节点间如能建立通信, 则认为两节点间存在连边。一般情况下, 重要节点周围连边数大于一般节点。

(2) 连边建立: 建立三阶 Leader-Follower 网络, 前两阶为波浪滑翔机, 第三阶为水下滑翔机。第一阶波浪滑翔机作为领导者, 每台领导者

有 n 台跟随者。第二阶波浪滑翔机作为跟随者被第一阶波浪滑翔机领导，同时又作为领导者领导 n 台第三阶水下滑翔机。领导者与跟随者之间可建立连边。为避免海洋滑翔机间距离对通信概率的影响，海洋滑翔机只与其距离最近的邻居节点建立通信，即最近邻连接。因此，同阶领导者间和同领导者所属跟随者间均为最近邻连接。根据实际观测经验，波浪滑翔机间通信和领导者跟随者间通信是可靠的，同一领导者所属跟随者水下滑翔机间建立通信的概率为 p 。

(3) 演化原则：初始状态时，每台跟随者将观测到的信息上传给所属领导者，并执行领导者下达的指令。每台领导者从上阶领导者或卫星接受信息和指令并下达给跟随者，同时将观测的信息及跟随者反馈的信息上传。当领导者受到攻击或发生故障时，该领导者所属跟随者平均分配给其他领导者，并与新领导者所属跟随者建立最近邻连接，并通过动态演化使滑翔机之间的距离与初始状态相同，因此，节点损伤前后滑翔机之间的通信概率相同。当第一阶海洋滑翔机全部发生故障时，该网络变为二阶。当网络中重要节点减少为原来的 50% 时，网络达到临界稳定状态。

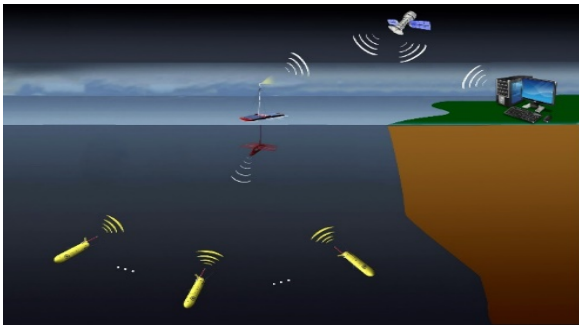


图2 海洋滑翔机异构编队示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the heterogeneous formation of ocean gliders

3 稳定性评价方法

3.1 复杂网络理论

近年来，复杂网络是自然科学领域用来研究复杂系统的热点^[21]。海洋滑翔机异构编队为多机

智能复杂系统。复杂网络拓扑和复杂网络动力学研究对理解海洋滑翔机异构编队系统具有十分重要的意义。为了便于分析，可以对海洋滑翔机异构编队进行抽象处理，将每台水下滑翔机和波浪滑翔机定义为节点，海洋滑翔机间的通信定义为连边。将海洋滑翔机异构编队抽象为一个无权无向的部分随机复杂网络。

3.2 稳定性评价指标

由于复杂网络系统结构复杂，节点数众多，因此需要借助一些统计指标来对复杂网络系统进行稳定性分析。为了综合评价海洋滑翔机编队的稳定性，选用连边数、集聚系数、平均最短路径来评估该网络的特性。

(1) 连边数

连边数，即海洋滑翔机异构编队系统中滑翔机节点间建立连边的数量，对于节点数相同的系统，它表征了复杂网络的连通性。考虑到现实水下通信约束情况，水下通信链路上可靠传输的数据字节数是有限的，连边数越大，系统连通性越高，越有利于滑翔机间对地形、湍流、障碍物等信息的共享，从而提高滑翔机的避障能力，提高编队的稳定性。

(2) 集聚系数

集聚系数，又称为集群系数，是指复杂网络中节点的邻居节点互为邻居节点的比例，用来衡量网络中节点连接的紧密程度。集聚系数越大，网络连接的紧密程度越高，鲁棒性越高，网络受损后重建能力越强。

网络的集聚系数：

$$C = \frac{3N_{\Delta}}{N_3} \quad (2)$$

其中， N_{Δ} 表示复杂网络中三角形的总数， N_3 表示网络中三元组的总数。

$$N_{\Delta} = \sum_{k>j>i} a_{ij} a_{jk} a_{ik} \quad (3)$$

$$N_3 = \sum_{k>1} (a_{ij} a_{ik} + a_{ji} a_{jk} + a_{ki} a_{kj}) \quad (4)$$

(3) 平均最短路径

平均最短路径是指任意两个节点间距离的

平均值。表征了网络中信息传递的效率, 平均最短路径越小, 效率越高。

平均最短路径:

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N+1)} \sum_{i \geq j} d_{ij} \quad (5)$$

其中, N 表示节点数量; 连接 i, j 两个节点之间路径包含的边数称为距离, d_{ij} 表示 i, j 两个节点之间的距离。

3.3 相关性分析

为了确定海洋滑翔机异构编队稳定性的综合评价指标, 需要对上述复杂网络评价指标进行相关性分析。常见的相关性分析方法包括 Delphi 法、层次分析 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 法、因子分析法、相关系数法等。通过对海洋滑翔机异构编队进行敏感性分析, 确定每个指标的权重表达式为

$$w_k = \frac{\overline{S_k^2}}{\sum_{k=1}^p \overline{S_k^2}} \quad (6)$$

采用层次分析法对每个评价指标进行相关性分析, 最后采用归一性方法确立该网络的综合评价指标 R :

$$R = \sum_{k=1}^p w_k \frac{s_k - \min(s_k)}{\max(s_k) - \min(s_k)} \quad (7)$$

R 值越大, 系统的稳定性越高。

4 仿真分析

本文在进行仿真试验时, 选择 31 台海洋滑翔机进行编队。第一阶为 1 台波浪滑翔机, 第二阶为 5 台波浪滑翔机, 第三阶为 25 台水下滑翔机。建立网络如图 3 所示。

4.1 静态拓扑分析

在真实的海洋环境中, 波浪滑翔机之间通过无线通信, 波浪滑翔机与水下滑翔机之间通过水声通信, 本文假定其通信概率为 1。水下滑翔机间也是通过水声通信, 但是通常会受到水下滑翔机机间距离和复杂洋流等多种因素干扰, 故假定通信概率小于 0.6, 在稳定性分析中, 选取通信

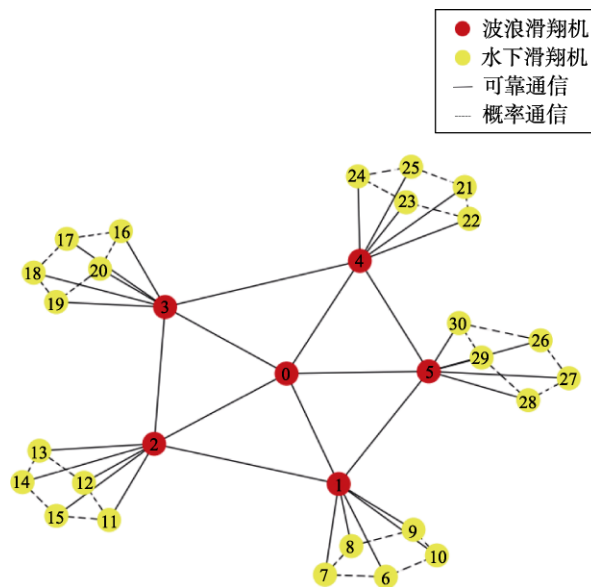


图 3 海洋滑翔机异构编队网络

Fig. 3 Heterogeneous formation network of ocean gliders

概率为 0.2、0.4 和 0.6 的海洋滑翔机编队进行研究。对海洋滑翔机异构编队网络初始状态进行了 50 次仿真实验, 得到不同通信概率下该网络的连边数、集聚系数、平均最短路径长度如图 4 所示。

由图 4(a)可知, 随着水下滑翔机通信概率的增加, 海洋滑翔机异构编队网络的连边数明显增加。连边数越多, 网络的连通性越高, 信息的共享性越强。

由图 4(b)可知, 水下滑翔机通信概率为 0.2 时, 该网络的集聚系数最小, 说明该网络的内部连接比较松散, 当关键节点发生故障或者受到外部攻击时, 内部重建的能力较差, 容易出现一些孤立节点。水下滑翔机通信概率为 0.6 时, 网络的集聚系数最大, 此时网络的连接较为紧密, 鲁棒性较高。

由图 4(c)可知, 不同通信概率下, 海洋滑翔机异构编队网络的平均最短路径差距不大, 但是, 当水下滑翔机通信概率为 0.2 时, 网络的平均最短路径较其他两种情况更小, 网络中信息的同步、流动和共享会更加容易。

另外, 当水下滑翔机通信概率为 0.4 和 0.6 时, 海洋滑翔机异构编队网络都具有较大的集聚系数和较小的平均最短路径, 这说明该网络具有小世界网络特性, 即节点之间网络效率较高, 信

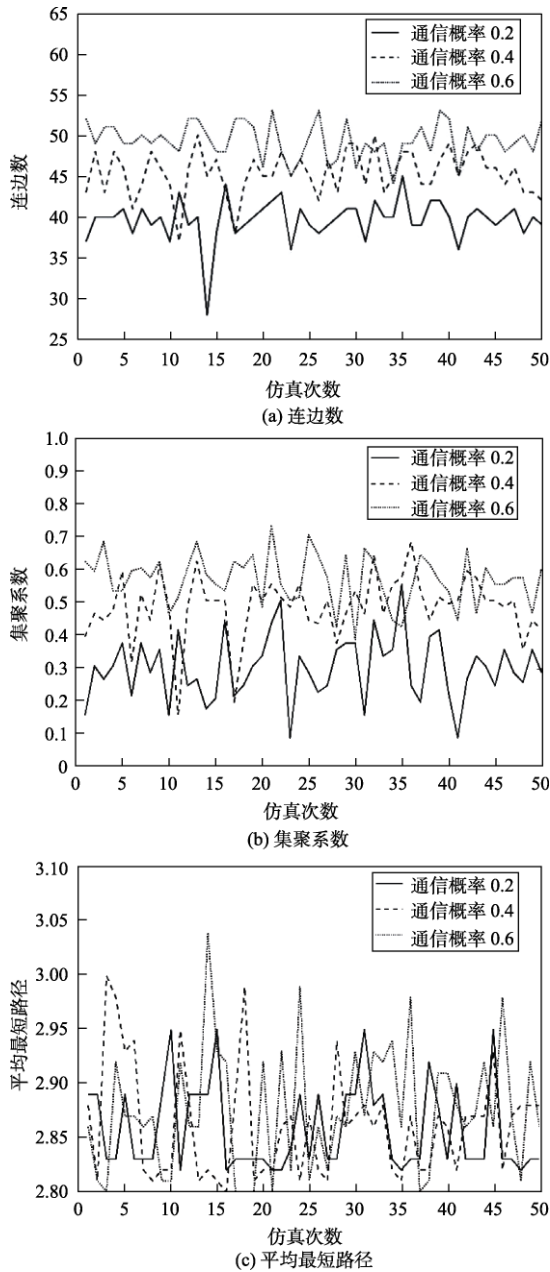


图 4 初始状态稳定性评价指标

Fig. 4 Stability evaluation index in the initial state

息传播速度较快。

对 50 次仿真实验结果取算术平均值,进行相关性分析,得到稳定性综合评价指标如表 1 所示。由表中数据可知,随着水下滑翔机通信概率增大,海洋滑翔机异构编队网络的稳定性逐渐增大。

4.2 动态拓扑分析

海洋滑翔机异构编队在海洋中进行观测与探测时,波浪滑翔机对整个编队的稳定性具有根本

表 1 初始状态稳定性评价指标

Table 1 Stability evaluation index in the initial state				
通信概率	连边数	集聚系数	平均最短路径	R
0.2	39.660	0.304	2.858	0.750
0.4	45.340	0.481	2.862	0.889
0.6	49.360	0.574	2.876	0.968

性意义。因此,本文研究了当波浪滑翔机受到目标攻击时编队的稳定性,同时网络进行动态重构,计算了该网络达到临界稳定状态时系统的稳定性。对该网络进行 50 次仿真实验,得到了不同通信概率下该网络的连边数、集聚系数、平均最短路径长度如图 5 所示。

当系统达到临界稳定状态时,由图 5(a~b)可知,随着水下滑翔机通信概率的增加,连边数、集聚系数均增大。这说明当网络达到临界稳定状态时,通信概率越大,网络连通性越高,连接的紧密程度越高,这与初始状态结论相同。然而,临界稳定状态平均最短路径随通信概率增大而减小,即网络效率提高,信息传播速度更快,这与初始状态相反。根据图 4 和图 5 对比,并结合表 1 和表 2,当海洋滑翔机异构编队网络中的波浪滑翔机受到目标攻击时,由于节点和连边移除,海洋滑翔机异构编队网络的连边数、集聚系数和平均最短路径均降低。其中,当通信概率为 0.4 时,连边数降低最多,与初始状态差值为 5.24;集聚系数和平均最短路径长度与初始状态差值都是随着通信概率增大而增大,在通信概率为 0.6 时达到最大。

临界稳定状态稳定性评价指标如表 2 所示。由表中数据可知,当网络达到临界稳定状态时,随着水下滑翔机通信概率的增加, R 值不断增加,系统越稳定。但与初始状态相比,差值不断增大,说明较大通信概率下,海洋滑翔机异构编队网络更难以维持原有稳定性。

考虑到网络增长的因素,进一步针对 100 台以上的编队进行仿真,则编队网络节点数目更多,网络结构变化多样,连边更具多样性,动力学更具复杂性。在仿真效率方面,编队网络的统计规律及全局特征将更为明显,有利于发挥复杂网络

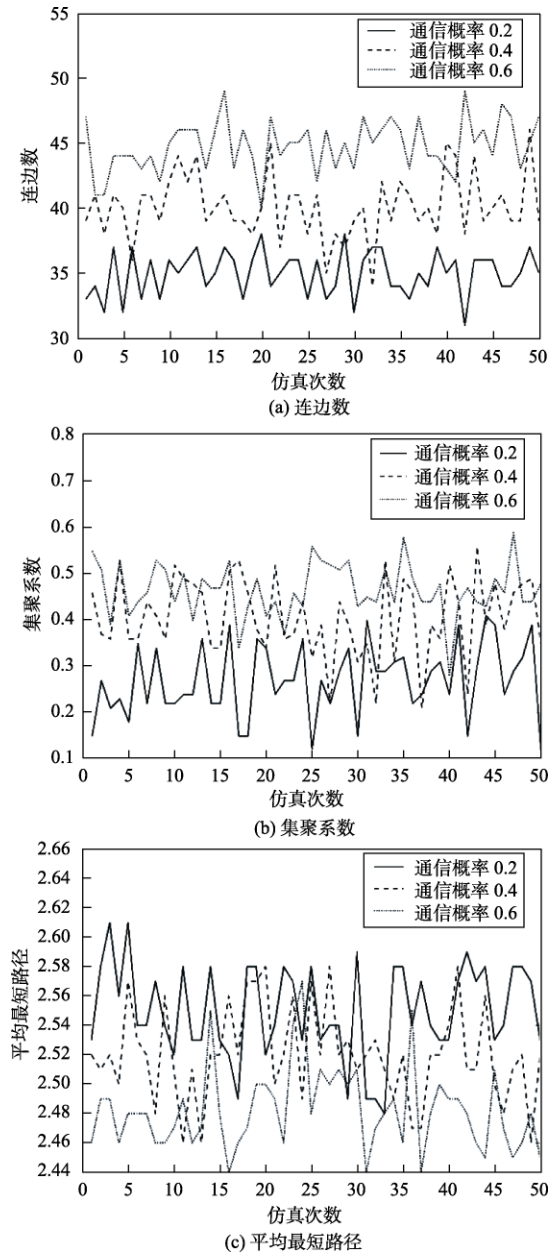


图 5 临界稳定状态稳定性评价指标

Fig. 5 Stability evaluation index in the critical stable state

表 2 临界稳定状态稳定性评价指标

Table 2 Stability evaluation index in the critical stable state

通信概率	连边数	集聚系数	平均最短路径	R	R 与初始差值
0.2	34.980	0.270	2.546	0.666	0.084
0.4	40.100	0.407	2.521	0.773	0.116
0.6	44.760	0.466	2.482	0.822	0.146

的优越性, 仿真效率可能进一步提高; 在可信度方面, 由于网络节点数众多, 影响编队稳定性的

因素也会增多, 节点故障、生物附着等不确定性因素的发生概率会有所提高, 一定程度上会降低仿真的可信度。

5 结 论

本文针对海洋滑翔机异构编队观测与探测过程中, 水下滑翔机机间建立水下通信的概率容易受到复杂因素影响的问题, 建立了不同通信概率下海洋滑翔机异构编队复杂网络及其动态演化模型, 提出了一种稳定性评价体系, 并通过对 31 台海洋滑翔机进行仿真试验, 验证了不同通信概率对海洋滑翔机异构编队稳定性的影响, 并得出以下结论。

(1) 无论是初始状态还是受到目标攻击达到稳定状态, 海洋滑翔机异构编队稳定性都随着水下滑翔机间通信概率的增加而提高, 但较高的稳定性在受到攻击时更难以维持。

(2) 水下滑翔机间通信概率为 0.4 和 0.6 时, 海洋滑翔机异构编队满足小世界网络特征, 即节点之间连接较为紧密, 鲁棒性较高; 平均最短路径长度较小, 网络效率较高, 信息传播速度较快。

(3) 初始状态时, 连边数、集聚系数、平均最短路径随通信概率增大而增大; 临界稳定状态时, 连边数、集聚系数同样随通信概率增大而增大, 而平均最短路径随通信概率增大而减小。

未来工作将进一步模拟真实海洋观测场景, 分析异构编队受到随机干扰, 如极端气象条件、外界电磁干扰等情况下的稳定性, 并进一步拓展编队系统规模, 实现百台套海洋滑翔机联合编队的稳定性, 并通过真实海上试验进行验证。

参 考 文 献

[1] 赵留平, 李环, 王鹏. 水下无人系统智能化关键技术发展现状[J]. 无人系统技术, 2020, 3(6): 12-24.
 [2] Leonard N E, Paley D A, Lekien F, et al. Collective motion, sensor networks, and ocean sampling[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 48-74.
 [3] 沈新蕊, 王延辉, 杨绍琼, 等. 水下滑翔机技术发展现状与展望[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(2): 89-106.

- [4] 孙秀军, 王力伟, 桑宏强. 波浪滑翔器水下牵引机滑翔动力分析[J]. 水下无人系统学报, 2020, 28(3): 252-258.
- [5] 张辰, 周乐来, 李贻斌. 多机器人协同导航技术综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(2): 1-8.
- [6] Kalwa J. The GREX-Project: Coordination and control of cooperating heterogeneous unmanned systems in uncertain environments[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2009, 42(18): 364-369.
- [7] Kalwa J, Pascoal A, Ridao P, et al. The European R&D-project morph: Marine robotic systems of self-organizing, logically linked physical nodes[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(27): 226-231.
- [8] Evans D G, Lucas N S, Hemsley V, et al. Annual cycle of turbulent dissipation estimated from seagliders[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(19): 10560-10569.
- [9] Hsu P C, Ho C R. Typhoon-induced ocean subsurface variations from glider data in the kuroshio region adjacent to taiwan[J]. Journal of Oceanography, 2019, 75(1): 1-21.
- [10] 薛冬阳. 水下滑翔机编队协调控制与不确定性研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [11] Li S, Wang S, Zhang F, et al. Constructing the three-dimensional structure of an anticyclonic eddy in the south china sea using multiple underwater gliders[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2019, 36(12): 2449-2470.
- [12] Zhang R, Yang S, Wang Y, et al. Regional ocean current field construction based on an empirical bayesian kriging algorithm using multiple underwater gliders[J]. Journal of Coastal Research, 2020, 99(1): 41-47.
- [13] 张润锋, 杨绍琼, 牛文栋, 等. 强扰动环境下水下滑翔机编队稳定性分析[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(23): 67-71.
- [14] 王雅琳, 刘都群, 杨依然. 2019 年水下无人系统发展综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(1): 55-59.
- [15] 赵宝强, 王晓浩, 姚宝恒, 等. 水下滑翔机李雅普诺夫稳定性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(1): 83-87.
- [16] Bilal K, Manzano M, Erbad A, et al. Robustness quantification of hierarchical complex networks under targeted failures[J]. Computers & Electrical Engineering, 2018, 72: 112-124.
- [17] Cheng Z, Cao J. Cascade of failures in interdependent networks coupled by different type networks[J]. Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications, 2015, 430: 193-200.
- [18] Simon M, Luptakova I D, Huraj L, et al. Combined heuristic attack strategy on complex networks[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017(9): 1-9.
- [19] Wang Z, Hill D J, Chen G, et al. Power system cascading risk assessment based on complex network theory[J]. Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications, 2017, 482: 532-543.
- [20] Zhou Y, Wang J. Efficiency of complex networks under failures and attacks: A percolation approach[J]. Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications, 2018, 512: 658-664.
- [21] Wang X, Zhang Y, Wang L, et al. Robustness evaluation method for unmanned aerial vehicle swarms based on complex network theory[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(1): 352-364.

作者简介:



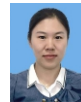
李学成 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋滑翔机组网控制技术。



张润锋 (1993-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水下滑翔机编队智能控制与应用。



杨绍琼 (1986-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为自主水下航行器水动力学外形设计及减阻技术等。本文通信作者。



苗展展 (1988-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水下滑翔机标准化、无人系统组网技术。

[引用格式] 胡艳明, 华 炜. 人在环路的机器人在线可持续示教学习[J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 67-76.

人在环路的机器人在线可持续示教学习

胡艳明, 华 炜

(之江实验室, 杭州 311121)

摘 要: 现有的机器人在未知环境下的行为能力与人类相比还有很大的差距。为了使机器人能够像人类一样持续在线地提升自身的行为能力, 提出了人在环路的机器人在线可持续学习方法。首先, 改进基于径向基函数网络的增量式学习, 将人类加入到机器人学习的环路中, 使机器人通过主动询问人类的方式获取新的学习样本, 并基于该样本在线增量式地更新自身的行为。其次, 基于贝塞尔曲线的轨迹规划方法将人类提供的高层行为转换成机器人可执行的低层动作, 降低人类示教成本, 同时提高所学行为的稳定性。然后, 借鉴大脑的工作机理, 提出类人的机器人潜意识学习方法, 使机器人在内部世界产生虚拟学习样本, 增加行为学习的鲁棒性。最后, 走廊行驶行为学习实验显示机器人能够主动地与人类交互, 并且高效、在线可持续地学习到鲁棒的行为。结果表明, 所提方法使机器人具备类人的可持续在线提升自身行为的能力。

关键词: 机器人; 在线学习; 可持续学习; 增量式学习; 人在环路; 示教学习

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)04-67-10

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.4.038

Human-in-the-loop Online Continual Robot Learning from Demonstration

HU Yanming, HUA Wei

(Zhejiang Lab, Hangzhou 311121, China)

Abstract: Compared with humans, there is still some ways to go to improve robot's behavior ability in unknown environment. Human-in-the-loop online continual robot learning from demonstration system is proposed in this paper to improve the behavioral ability of robot, continually and online like humans. Firstly, the Radial Basis Function (RBF) based incremental learning method is adjusted into learning from demonstration problem. Human is added into the loop of robot learning, then, robot can actively ask human for new demonstration and incrementally learn behavior based on the new demonstration. Secondly, a bézier curve based trajectory tracking method is proposed to reduce the teaching cost of human and improve the robust of learned behavior by convert human high level behavior to low level behavior that can be executed by robot. In the meantime, referring to human brain, the subliminal learning ability is given to robot, which enable robot to explore novel environment in internal world and learn more robustness behavior without affecting the interaction between robot and external world. Two experiments are setup based on driving behavior learning task in both virtual and real corridor like environment. Results show that the method enable robot to interact with human actively and continually learn a more robustness behavior efficiently.

Key words: Robot; Online Learning; Continual Learning; Incremental Learning; Human-in-the-loop; Learning from Demonstration

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-06-18

基金项目: 之江实验室自设项目(2019KE0AC02)

1 引言

机器人在现代社会与经济的发展中扮演着重要的角色，显著地提高了人类的工作效率与安全性，并加快了科学发展的进程。与人类相比，现有的机器人在未知环境下的行为能力还很低^[1-3]。参照人类提升行为能力的方式，研究人员通过研究基于示教学习的机器人学习方法，使机器人通过模仿示教者来获得新的行为。

示教学习是通过最小化机器人与示教者之间的行为差异来获得新行为的技术^[4]。相比基于“试错”的强化学习，示教学习的样本使用率与学习效率更高。但是，示教学习依赖示教样本的质量，所学行为鲁棒性较差，较小误差的动作会使机器人逐渐偏移正确的行为，从而在真实应用中失效。针对该问题，研究人员提出一系列经典算法，如基于搜索的结构化预测算法^[5]、随机混合迭代学习算法^[6]、数据集聚合 (Dataset Aggregation, DAgger) 算法^[7-8]、基于示教的近似策略迭代算法^[9]、用于模仿的聚合值算法 (Aggregate Values to Imitate, AggreVaTe)^[10]等 (详细介绍见文献 [11])。随着生成对抗网络 (Generative Adversarial Network, GAN)^[12]的提出，许多研究人员利用 GAN 的样本生成能力，提出了基于 GAN 的模仿学习算法，如生成对抗模仿学习^[13]、互信息生成对抗模仿学习^[14]、多智能体对抗模仿学习^[15]、奖励增广模仿学习^[16]、基于动作排序的对抗模仿学习^[17]等。

以上所示的大部分经典算法与基于 GAN 的算法由两个基本时期组成：①示教样本收集；②策略导出。对于示教学习来说，示教样本包含了机器人可能学到的行为。当机器人遇到示教样本中未包含的场景时，所学行为极有可能失效。这类填鸭式的示教学习方法使机器人不具备适应新环境的能力。为了能够适应新遇到的场景，经典算法中的 DAgger 与 AggreVaTe 采用数据增广技术在线收集更多专家的示教数据。但是，该方法需要专家一直处于关注状态，且需要时刻给机器人提供观察状态对应的示教动作。因此，

DAgger 与 AggreVaTe 的学习成本高昂。此外，以上方法都是其于深度学习的方法^[18]。但是，深度学习会出现灾难性遗忘问题^[19-20]，即学习的新行为会覆盖之前所习得的行为，深度学习的灾难性遗忘问题至今没有得到很好的解决。DAgger 与 AggreVaTe 方法会在接收到新样本后，将其混入数据集中一起对模型进行重训练，学习效率很难进一步提高，进而限制了环境适应性与行为鲁棒性的提升。综上所述，当前的示教学习方法主要存在三方面的问题：①环境适应性差；②学习效率低；③行为鲁棒性差。

基于径向基函数 (Radial Basis Function, RBF) 网络的增量式学习方法被应用于可持续强化学习任务中^[21-22]。本文融合该增量式学习方法与示教学习，将人类加入到机器人学习的环路中，使机器人能够在遇到新场景时主动向人类请求示教；并仅利用新接收的新数据增量式地学习行为，使机器人能不断适应新环境。其次，为了降低人在环路的示教学习的交互成本，利用传统优化方法^[23]将人类易示教的高层行为转换成机器人易学习的低层行为。再次，借鉴大脑基底神经节中纹状边缘区域的工作机理^[24-25]，赋予机器人潜意识学习的能力，使其能够在内部世界不断产生虚拟的数据用于学习，进一步得到鲁棒的行为。最后，通过移动机器人学习走廊通行行为实验证明了本文方法是合理有效的。

2 人在环路的可持续示教学习框架

本文提出如图 1 所示的人在环路的可持续示教学习框架。该框架由三部分组成：①基于增量式 RBF 网络的可持续示教学习；②基于贝塞尔曲线的轨迹跟踪；③机器人潜意识学习。可持续示教学习使机器人能够主动与外部世界进行交互——请求人类示教或在真实世界中利用学到的行为。因此，人类被加入到机器人学习的环路中，并在机器人的整个生命周期对其进行示教引导。轨迹跟踪方法将高层级的参考轨迹转换成低层级的状态-动作对。基于此，人类仅需要给机器人提供能

够拟合参考轨迹的稀疏引导点。潜意识学习通过在内部世界对新场景进行探索, 生成多样性的

示教数据, 使机器人学到更加鲁棒的行为。下面将分别对这三部分进行详细介绍。

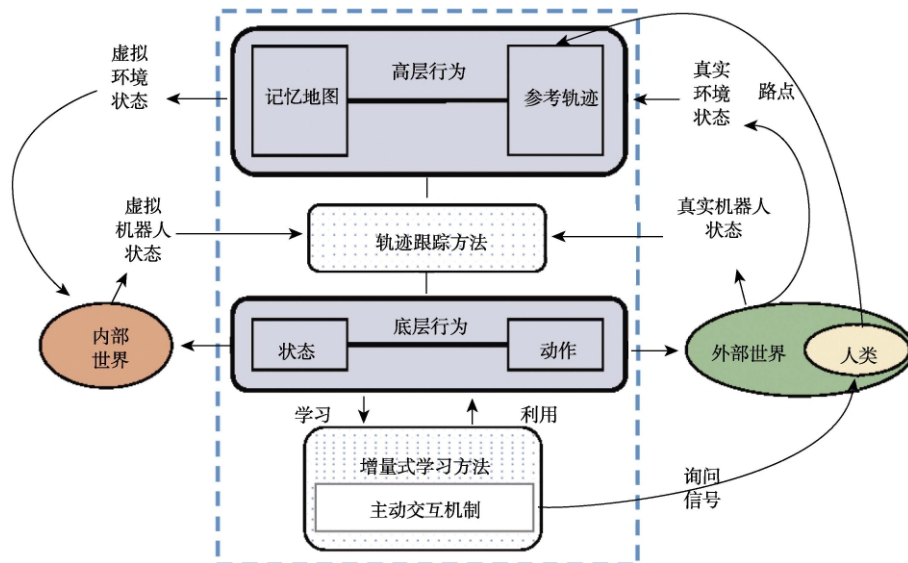


图 1 人在环路的机器人可持续示教学习框架

Fig. 1 Human-in-the-loop continual robot learning from demonstration framework

2.1 可持续示教学习

示教学习 (Learning from Demonstration, LfD) 归属于有监督学习范畴。在监督学习中, 学习系统被有标签的数据训练, 并学习近似该数据分布的函数。在示教学习中, 训练数据由示教者执行任务的示例组成。最终用于示教学习的示例是一个二元组 $\langle x, a \rangle$, 它由状态及动作组成。示教学习的目的是学习一个策略 $\pi: x \rightarrow a$ 。现有大部分示教学习方法都是一次性的学习, 即机器人基于固定的示教数据集学习, 策略会在学习完成后固定下来, 机器人可能无法适应新出现的场景与情况。本节通过融合示教学习与基于 RBF 网络的增量式学习, 提出可持续示教学习算法。

文献[22]提出基于 RBF 网络的增量式学习方法。图 2 显示了一个标准的 RBF 网络模型, 其由模型参数 W 与结构 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 两部分组成。L2 正则化的核递归最小二乘 (L2-norm Kernel Recursive Least Squares, L2-KRLS) 算法被用来增量式学习 RBF 网络的参数与结构 (详见文献[22]的算法 1)。其中, 近似线性独立 (Approximate Linear Dependence, ALD) 准则用来判定状态是否

需要加入 D 。具体地, 对于第 t 个遇到的状态 x_t , 计算 x_t 被 D 近似线性表示的误差 δ_t , 如果 $\delta_t > \mu$ 则将该状态加入 D , 其中 μ 为设定的阈值。ALD 准则如式(1)所示:

$$\delta_t = k(x_t, x_t) - k_{t-1}^T(x_t) K_{t-1}^{-1} k_{t-1}(x_t) \leq \mu \quad (1)$$

其中, $[K_{t-1}]_{i,j} = k(d_i, d_j)$, $k_{t-1}^T(x_t) = [k(x_t, d_1), k(x_t, d_2), \dots, k(x_t, d_n)]$, $k(x_t, x_t)$ 为核函数, 本文取径向基函数 (RBF)。

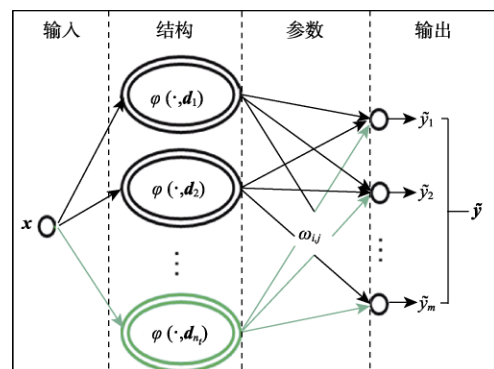


图 2 增量式 RBF 网络

Fig. 2 Incremental RBF network

本文利用 ALD 准则作为机器人与人类主动

交互的机制。对于机器人的每一个决策周期，可分以下三种情形。

情形 1: 如果机器人已经获取到期望的执行动作 \mathbf{a}_t ，则利用 $\langle \mathbf{x}_t, \mathbf{a}_t \rangle$ 输入到 L2-KRLS 算法对 RBF 网络进行更新。

情形 2: 如果机器人此时未获得期望的执行动作 \mathbf{a}_t ，并且 \mathbf{x}_t 满足 ALD 准则 ($\delta_t \leq \mu$)，则利用所学的 RBF 网络生成当前状态的可执行动作 \mathbf{a}_t 。

情形 3: 如果机器人此时未获得期望的执行动作 \mathbf{a}_t ，并且 \mathbf{x}_t 不满足 ALD 准则 ($\delta_t > \mu$)，则向人类发出请求示教信号获得执行动作 \mathbf{a}_t ，并利用 $\langle \mathbf{x}_t, \mathbf{a}_t \rangle$ 输入到 L2-KRLS 算法对 RBF 网络进行更新。

2.2 基于贝塞尔曲线的轨迹跟踪

为了使机器人能够利用人类示教的高层行为示教数据学习，本节提出基于贝塞尔曲线的轨迹跟踪算法将参考轨迹转换成状态-动作对。当人类接受机器人的示教请求信号时，便向机器人提供当前场景的稀疏引导点，假定提供五个引导点，可表示为 $R = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_5, y_5)\}$ 。利用式(2)所示的三次多项式对引导点进行拟合，得到机器人的参考路径 S 。

$$S = \begin{cases} f_x(s) = a_x + b_x s + c_x s^2 + d_x s^3 \\ f_y(s) = a_y + b_y s + c_y s^2 + d_y s^3 \end{cases} \quad (2)$$

轨迹跟踪方法规划出最优的动作使机器人跟踪上该参考路径。机器人在对参考路径进行跟踪的过程中会生成状态-动作对，并基于此对 RBF 网络模型进行更新。

本文提出的轨迹跟踪算法是文献[23]中基于贝塞尔曲线的离散优化框架。首先，利用贝塞尔曲线公式生成候选轨迹；然后，利用设计的评价函数对每条候选轨迹进行评价；最后，选出代价最低的作为当前的最优执行轨迹。

候选轨迹生成: 本文以移动机器人 Turtlebot^[22] 为实验对象，采用二阶贝塞尔曲线模拟机器人的行驶轨迹。二阶贝塞尔曲线由三个控制点 $\mathbf{B} = \langle \mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2 \rangle$ 唯一确定。假定候选轨迹的个数为 N_{PT} ，第 i 条候选轨迹可表为 $\mathbf{B}_i = \langle \mathbf{P}_0^i, \mathbf{P}_1^i, \mathbf{P}_2^i \rangle$ 。图

3 为候选轨迹各控制点的选择示意图。图中所有点均在机器人本体坐标系 XOY 下， X 轴为机器人正前方。候选轨迹的第一个控制点为机器人坐标系原点；第二个控制点为机器人正前方 $\gamma_{\text{PT}} L_{\text{PT}}$ 处的点；候选轨迹最后一个控制点是在 $[-\varphi_{\text{PT}}, \varphi_{\text{PT}}]$ 区间的圆弧上进行均匀采样获得。其中， γ_{PT} 是控制轨迹平滑程度的因子； $d_{\text{PT}} = 2\varphi_{\text{PT}}/N_{\text{PT}}$ 为圆弧上的角度采样间隔。各控制点的计算公式见式(3)。

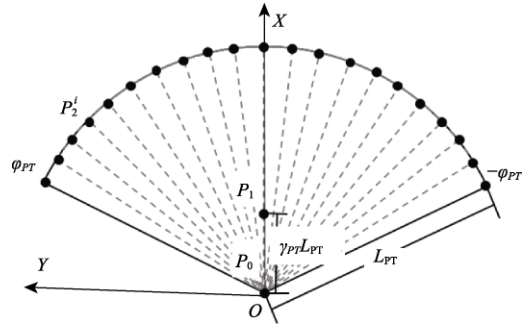


图3 候选轨迹控制点采样示意图

Fig. 3 Control points of candidate trajectories

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_0^i &= \begin{cases} x_{i,0} = 0 \\ y_{i,0} = 0 \end{cases} \\ \mathbf{P}_1^i &= \begin{cases} x_{i,1} = \gamma_{\text{PT}} L_{\text{PT}} \\ y_{i,1} = 0 \end{cases} \\ \mathbf{P}_2^i &= \begin{cases} x_{i,2} = L_{\text{PT}} \cos(-\varphi_{\text{PT}} + d_{\text{PT}} i) \\ y_{i,2} = L_{\text{PT}} \sin(-\varphi_{\text{PT}} + d_{\text{PT}} i) \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

评价函数设计: 本文采用候选轨迹与参考路径的重合度作为评价指标。第 i 条候选轨迹的代价计算公式如下：

$$C_i = \frac{1}{N_{\text{cPT}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{cPT}}} \|\mathbf{p}_j^r - \mathbf{p}_{i,j}^c\| \quad (4)$$

其中， N_{cPT} 为一条曲线上均匀采样点的个数； \mathbf{p}_j^r 为参考路径上第 j 个采样点； $\mathbf{p}_{i,j}^c$ 为第 i 条候选轨迹上第 j 个采样点；采样点 \mathbf{p} 是由二维平面上坐标值组成的二维向量 $[x, y]$ 。

最优轨迹选择: 根据设计的评价函数得到各候选轨迹的代价值后，选择代价最小的轨迹作为当前的执行轨迹。图4给出轨迹跟踪方法的示例。图中，粉红色点表示人类给出的示教路点，红色

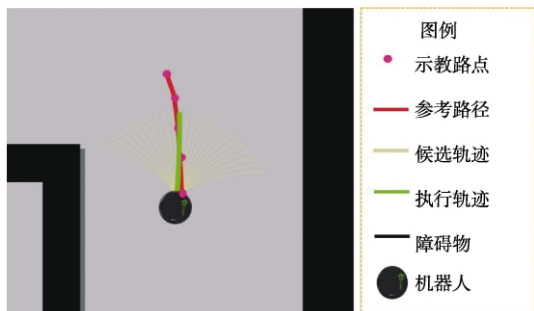


图 4 轨迹跟踪方法示例

Fig. 4 Example of bézier curve based path tracking

曲线为拟合的参考路径, 黄色曲线为生成的候选轨迹簇, 绿色曲线为最终选定的最优执行轨迹。

得到最优可执行轨迹后, 可以计算机器人的执行指令。Turtlebot 的执行指令为速度 (v) 和角速度 (ω)。由于 Turtlebot 的移动速度相对缓慢, 可以固定为常值不变, 角速度成为唯一影响轨迹跟踪的指令。根据公式(5)计算最优候选贝塞尔曲线 $B_o = \langle P_0^o, P_1^o, P_2^o \rangle$ 起点处的曲率 k_0 , 再根据 $\omega = vk$ 计算当前机器人期望的执行角速度。最后, 利用传感器数据构造机器人当前的状态 x_t , 并结合机器人的期望动作 $a_t = [\omega]$ 组成用于行为学习的示教样本 $\langle x_t, a_t \rangle$ 。

$$k_0 = \frac{2(P_1 - P_0) \times (P_0 - 2P_1 + P_2)}{3 \|P_1 - P_0\|_2^3} \quad (5)$$

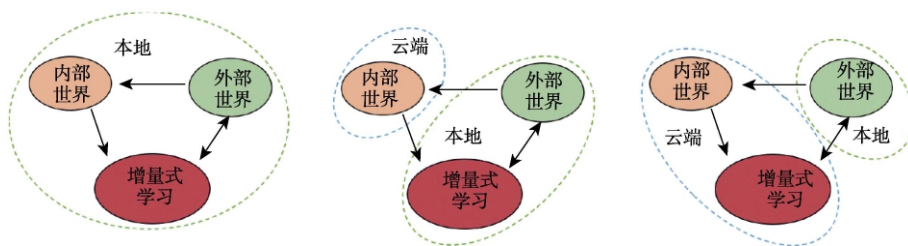


图 5 计算资源配置

Fig.5 Allocation of computing resources

数据流控制: 机器人本体在真实世界中运行以及与人类交互的同时, 系统的内部世界也在并行运行着。内部世界中, 机器人需要采样各种初始姿态以完成对虚拟环境的充分学习。外部世界不定时地会出现需要请求人类示教的场景。可能会出现这种情况: 上一个虚拟环境还未被内部世

2.3 潜意识学习

为了进一步提高机器人学习的效率, 借鉴大脑的工作机制, 赋予机器人潜意识学习的能力。所谓的潜意识学习即机器人在内部世界对外部世界遇到的新场景进行探索, 生成多样性的训练样本, 用于更新行为模型。潜意识学习使得机器人不必暂停与外部世界的正常交互, 它利用内部世界产生的多样性虚拟样本提升机器人在真实世界的行为能力。本文将潜意识学习分成三个子问题: 内外世界计算资源配置、内部世界与外部世界的

计算资源配置: 本文框架按计算资源解耦可得三个独立的模块: 内部世界探索、外部世界交互、行为可持续学习。这三个模块可以进行并行计算, 并且三个模块之间的计算允许异步进行。因此, 根据不同的情况, 存在如图 5 所示的三种配置情况:

(1) 在相对简单的任务时, 如果机器人配置的计算资源充足, 甚至配备多台计算的情况下, 三个模块可以都放于本地; (2) 如果任务复杂, 存在大量的内部世界片段需要被探索, 可将内部世界模块置于云端计算, 缓减本地计算的压力, 同时这也是一种降低机器人硬件成本的途径; (3) 如果任务的复杂性再增加, 可以将增量式学习与内部世界模块都置于云端计算, 这种方式需要以合适的频率更新机器人本地的策略模型。

界利用完成, 就接收到新的虚拟环境。针对该情况, 有两种应对策略: (1) 虚拟环境队列, 记为 E , 如图 6 所示; (2) 内部世界列表, 记为 I , 如图 7 所示。前者只需要维持一个内部世界, 待处理的虚拟环境被暂存在队列中, 按先进先出的顺序依次输入到内部世界被学习。后者是存在多个并行

处理器（或多个计算机）的前提下，新到来的虚拟环境被随机分配到当前空闲的处理器/计算机，此处的每个处理器/计算机就是机器人各个内部世界的载体。

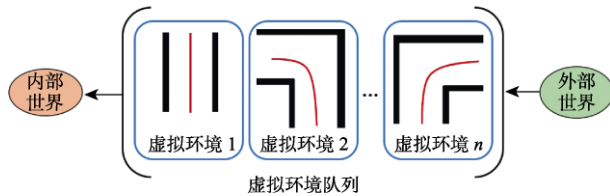


图 6 虚拟环境队列

Fig.6 Virtual environment queue

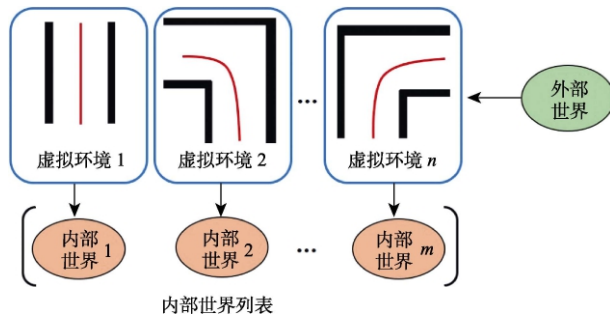


图 7 内部世界列表

Fig.7 Internal world list

新场景探索：潜意识学习的核心思想就是在不干扰机器人在外部世界运行的前提下，利用内部世界对陌生的环境进行系统的学习，使机器人学到更加鲁棒的行为。为了达到该目的，机器人在内部模拟时，需要获得多样化的样本。机器人以某一初始姿态跟踪上参考轨迹，这一过程可作为一个场景。机器人需要在同一虚拟环境模拟足够多的初始姿态，从而完成对该局部环境的探索。图 8 给出一个在内部世界探索左转角场景的例子。首先，从参考轨迹（粉红色曲线）上采样一系列带方向的点（青色箭头）作为虚拟参考初始位姿点；然后，对各虚拟参考初始位姿点按式(6)添加确定扰动，分别得到左、右两个探索初始位姿点。

$$\begin{cases} p_{\text{left}} = (x - A_{\text{lat}} \sin(\varphi), y + A_{\text{lat}} \sin(\varphi), \varphi + A_{\text{ang}}) \\ p_{\text{right}} = (x + A_{\text{lat}} \cos(\varphi), y - A_{\text{lat}} \sin(\varphi), \varphi - A_{\text{ang}}) \end{cases} \quad (6)$$

其中， A_{lat} 为横向扰动量， A_{ang} 为角度扰动量。

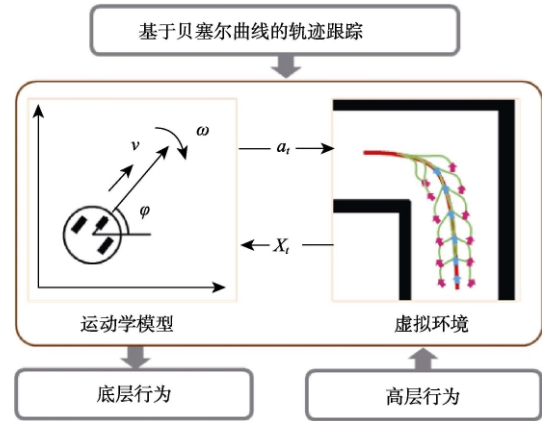


图 8 内部世界探索新场景示例

Fig.8 Example of exploring new scene in internal world

在确定计算资源的配置与数据流控制方案后，根据内部世界探索新场景的方法获得若干探索初始位姿点。对于每个探索初始位姿点都构建一个用于探索的虚拟场景实例。在虚拟场景实例中利用基于贝塞尔曲线的路径跟踪方法获得最优执行动作，利用运动学模型更新下一步的状态，这样迭代若干周期得到一系列用于行为学习的虚拟状态-动作对。

3 人在环路的可持续学习系统

由第 2 节介绍的人在环路的可持续学习框架，可实例化人在环路的可持续学习系统。该系统由三个并行运行的线程组成，分别为：（1）外部世界线程；（2）内部世界线程；（3）增量式学习线程。图 9 给出三个线程之间的数据交互关系图。共享队列变量 Q_H 与 Q_L 分别存储高层行为与低层行为，它们在三个线程间共享。外部世界推进新的高层行为，并将当前得到的低层行为推进 Q_L 。内部世界线程接收从 Q_H 中推出的高层行为，并将得到的低层行为推进 Q_L 。增量式学习线程接受 Q_L 推出的低层行为增量式更新策略模型。得到的策略模型在增量式学习线程与外部世界线程间共享。下面分别对三个线程进行介绍。

3.1 外部世界线程

外部世界线程主要负责机器人与真实世界的交互，包括获取环境的信息、自身的状态、与人

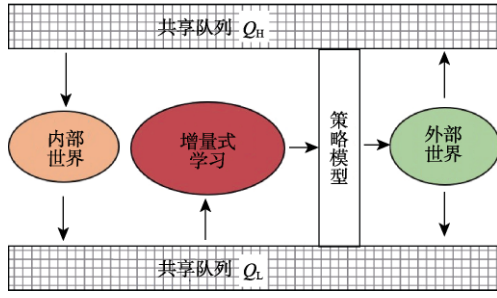


图 9 各线程之间的数据流

Fig.9 Data stream between each threads

类进行交互以及执行动作作用于环境。该线程基于增量式学习线程学习到的策略模型信息判定当前机器人是否需要请求示教, 因此, 存在两种状态: (1) 利用学习到的行为; (2) 请求示教获得行为。如果为前者, 则利用学习到的策略模型生成当前期望动作; 否则调用轨迹跟踪方法得到当前的期望动作。在每一个运行步, 机器人都要发布期望动作到底层控制器, 对环境作出响应。外部世界线程具体步骤如下。

步骤 1: 初始化 $s_{\text{robot}} \leftarrow \text{利用}$, $t \leftarrow 1$;

步骤 2: 使用传感器获得机器人当前的状态 x_t 与位姿 r_t ;

步骤 3: 如果 $s_{\text{robot}} == \text{利用}$, 执行步骤 4; 否则, 执行步骤 5;

步骤 4: 如果 x_t 满足 ALD 准则, 则利用 RBF 网络输出当前状态的期望动作 a_t ; 否则, 从人类示教者获取引导点 R , 并利用式(2)拟合参考路径 S , 然后将 S 存入高层行为队列 Q_H 末尾, 置 $s_{\text{robot}} \leftarrow \text{示教}$; 跳至步骤 6;

步骤 5: 如果轨迹未跟踪结束, 则基于轨迹跟踪方法获得执行动作 a_t , 并将 (x_t, a_t) 存入低层行为队列 Q_L 末尾; 否则, $s_{\text{robot}} \leftarrow \text{利用}$;

步骤 6: 将期望动作 a_t 发布给底层控制器执行, $t \leftarrow t+1$, 跳转至步骤 2。

3.2 内部世界线程

内部世界线程主要负责从共享队列 Q_H 中获取虚拟环境, 构成内部世界, 从而模拟得到低层的行为, 并存储到共享队列 Q_L 。线程中主要分为两个部分: (1) 对机器人的初始位姿进行采样,

得到一系列虚拟实例, 并存入队列 Q_{temp} ; (2) 从队列 Q_{temp} 中获取虚拟实例, 并调用轨迹跟踪方法得到低层行为。内部世界线程具体步骤如下。

步骤 1: $t \leftarrow 1$, $Q_{\text{temp}} \leftarrow \emptyset$;

步骤 2: 如果 $Q_{\text{temp}} == \emptyset$ 并且 $\neg Q_H == \emptyset$, 弹出, 并获取 Q_H 队首的参考路径 S , 并在 S 采样若干探索初始位姿 $\{r_1, r_2, \dots\}$, 依次构造 (S, r_i) , $i=1, 2, \dots$ 存入 Q_{temp} ; 弹出, 并获取 Q_{temp} 队首单元 (S, r) , 赋值 $S_{\text{now}} \leftarrow S, r_{\text{now}} \leftarrow r$;

步骤 3: 如果 S_{now} 跟踪未结束, 则基于 S_{now} 与 r_{now} , 用轨迹跟踪方法获得 a_t , 获取虚拟状态 x_t , 将虚拟状态动作对 (x_t, a_t) 存入低层行为队列 Q_L 末尾, 基于机器人运动学模型更新 r_{now} ; 否则, 弹出, 并获取 Q_{temp} 队首单元 (S, r) , 赋值 $S_{\text{now}} \leftarrow S, r_{\text{now}} \leftarrow r$;

步骤 4: $t \leftarrow t+1$, 跳转至步骤 2。

3.3 增量式学习线程

增量式学习线程的任务相对简洁, 它只负责从 Q_L 获取训练样本, 增量式地更新机器人的策略网络。当队列为空时, 便暂停学习; 当队列有数据时, 便开启学习。增量式学习线程具体步骤如下。

步骤 1: $t \leftarrow 1$;

步骤 2: 如果 $\neg Q_L == \emptyset$, 则弹出, 并获取 Q_L 队首的状态-动作对 (x, a) , 并利用 (x, a) 增量式更新 RBF 网络;

步骤 3: $t \leftarrow t+1$, 跳转至步骤 2。

4 实验结果及分析

4.1 仿真环境实验

本实验基于移动机器人平台 Turtlebot^[26]与基于 ROS^[27]与 Stage^[28]的回形仿真走廊环境验证人在环路的可持续示教学习方法的有效性。机器人需要在搭建的回形走廊仿真环境中, 通过与人类的交互, 逐步学习通道行驶行为。本实验包括三组实验。

(1) 人直接示教低层行为, 不包含轨迹跟踪与潜意识学习模块, 简称为 simpleLfD; 具体地, 机器人主动地向人类请求示教; 然后, 人类利用游戏手柄直接给出期望动作控制机器人运行一段距离, 并产生一系列状态-动作对 (x, a) ; 同时用在线产生的 (x, a) 增量式更新行为模型。

(2) 人示教高层行为, 包含轨迹跟踪模块, 但不包含潜意识学习模块, 简称为 BZPTLfD; 具体地, 机器人主动地向人类请求示教, 然后, 人类通过点击地图界面给机器人提供五个稀疏引导点, 紧接着拟合得到参考路径, 然后基于轨迹跟踪算法跟踪该路径一段距离, 产生一系列状态-动作对 (x, a) , 同时用在线产生的 (x, a) 增量式更新行为模型。

(3) 本文完整框架; 具体地, 机器人主动向人类请求示教, 然后, 人类通过点击地图界面给机器人提供五个稀疏引导点, 紧接着拟合得到参考路径, 然后基于轨迹跟踪算法跟踪该路径一段距离并收集一系列状态-动作对存入低层行为队列 Q_L , 同时, 潜意识学习对新场景进行探索获得一系列状态-动作对也存入 Q_L , 增量式学习依次从 Q_L 中取 (x, a) 更新行为模型。

图 10 显示了最终的实验结果。图中绿色曲线为机器人依靠所学策略行驶的轨迹, 红色箭头记录了每次机器人请求示教时的位姿。如果机器人能够仅依赖学习到策略完整运行一圈, 期间没有出现需要请求示教的状态, 就说明机器人对该环境学习完成。三种方式下, 机器人依靠人类的示教增量式地更新策略模型, 最终都能够利用所学行为在该回形走廊环境中正常行驶。图 10(a) 为 simpleLfD 的结果, 机器人总共向人类请求了 53 次示教; 图 10(b) 为 BZPTLfD 的结果, 人类示教 23 次; 图 10(c) 为本文完整框架, 所需示教次为 13 次。仔细观察图 10 中, 三张图中记录的示教位姿分布以及学习完成后的行驶轨迹。

图 10(a) 显示 simpleLfD 在走廊拐角处的红色箭头与绿色轨线存在许多不一致的情况, 这说明机器人在学习过程中, 由于人类很难直接控制机

器人按照期望的轨迹运动, 因此机器人所学行为不断变化。BZPTLfD (图 10(b)) 与完整框架 (图 10(c)) 的红色箭头与绿色轨线基本重合, 即示教轨迹与所学行为基本一致。这说明基于贝塞尔曲线的轨迹规划方法将人类更加易于给出的高层稀疏路点转换成更加稳定的机器人行为, 提高行为学习的稳定性。simpleLfD 与 BZPTLfD 在走廊拐角处存在许多重叠或相近的示教位姿 (重叠的红色箭头), 这种红色箭头重叠现象在本文完整框架 (图 10(c)) 中明显减少。这说明, 当机器人不具备潜意识学习能力时, 遇到历史场景时会陷入故障状态, 需要重复向人类请求示教; 然而, 使机器人在内部世界对新场景进行探索的潜意识学习能够提高行为学习的鲁棒性与效率。

实验结果表明: (1) 融合增量式学习方法与示教学习方法, 将人类加入到机器人学习的闭环中, 的确能够使机器人自主地向人类请求示教, 并且能够增量式地学习不同的行为; (2) 将传统规划 (轨迹跟踪) 方法与机器人学习方法结合, 使人类仅需要向机器人提供高层的行为, 降低了人类交互的成本, 并提高了机器人学习的效率与稳定性; (3) 具有潜意识学习能力的机器人, 可在内部世界中进行模拟, 生成大量虚拟的样本,

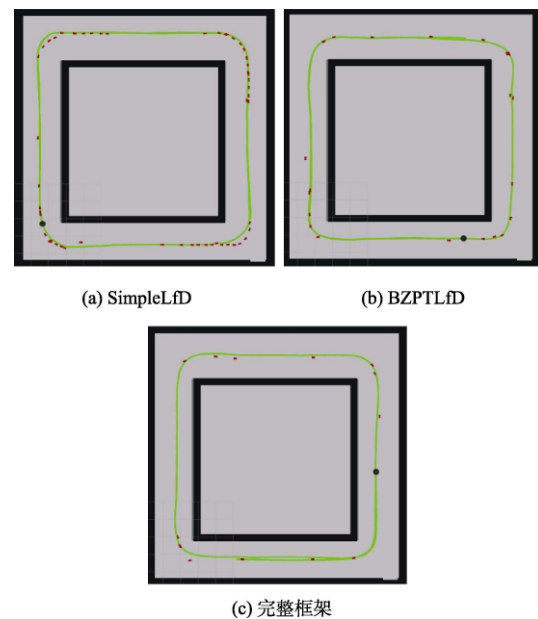


图 10 仿真实验结果。

Fig.10 Experiment results in virtual environment

进一步提高机器人学习的效率, 并提高了所学行为的鲁棒性。

4.2 真实环境实验

为了验证本文方法在真实环境中的有效性, 本节在真实环境中搭建了如图 11 中间所示的回字形走廊环境。Turtlebot 被随机置于该环境中某位置, 然后基于本文提出的人在环路的机器人在线可持续学习框架主动向人类请求示教, 基于示教数据在线可持续地学习走廊通行行为。

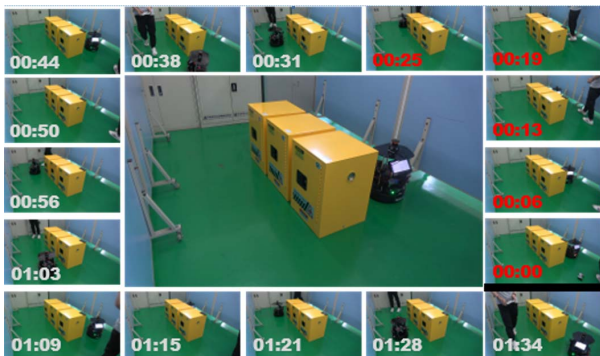


图 11 真实环境实验结果

Fig.11 Experiment results in real environment

图 11 中周围一圈实景图片显示了机器人在对应时间的状态, 红色时间表示请求示教, 白色表示自主运行。最后, 机器人只向人类请求了 5 次示教, 便学会了在该走廊通道正常行驶的行为。图 12 (a) 显示了该实验, RBF 网络的神经元个

数随着学习的进行, 在线增长的情况; 图 12(b) 显示了随着学习的进行, 机器人请求示教的频次 (次/秒)。结果显示, 随着学习的进行, RBF 网络的节点个数从零开始增加, 学习也能够快速收敛。

5 结论

本文融合基于 RBF 网络的增量式学习方法与示教学习方法, 提出人在环路的增量式学习方法。为了降低人类交互的成本以及人类示教的不确定性, 将传统规划方法加入机器人学习方法中, 使人类只需要向机器人提供高层的行为 (路点或路径)。然后, 利用基于贝塞尔曲线的路径跟踪方法将人类示教的高层行为转换为机器人的可执行动作 (低层行为)。低层行为可以直接被机器人学习到策略模型中。另外, 赋予机器人潜意识学习的能力, 使其在内部世界不断模拟出虚拟数据, 丰富机器人的知识储备, 从而提高所学行为的鲁棒性。综合各模块, 得到最终的人在环路的在线可持续学习系统。本文通过回形走廊环境的通道行驶行为学习实验验证了人在环路的增量式学习框架的有效性。实验结果表明: 人在环路的增量式学习方法能够使机器人通过与人类的主动交互, 高效率、增量式地学习到鲁棒的行为。同时, 真实环境中的回形走廊实验验证了本文方法在真实应用中的有效性。

参考文献

- [1] 陈智伟, 胡劲文, 赵春晖, 等. 野外无人车路径规划与轨迹规划技术[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 40-48.
- [2] 徐广通, 邹汝平, 王祝, 等. 基于滚动规划框架的多无人机协同轨迹快速生成方法[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 33-39.
- [3] 李芳, 祝翠琴. 2020 年仿人智能技术发展综述[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 8-13.
- [4] Argall B D, Chernova S, Veloso M, et al. A survey of robot learning from demonstration[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2009, 57(5): 469-483.
- [5] Daumé H, Langford J, Marcu D. Search-based structured prediction[J]. Machine Learning, 2009, 75(3): 297-325.
- [6] Ross S, Bagnell D. Efficient reductions for imitation learning[C]. The 13th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS 2010), Sardinia, Italy, May 13-15, 2010.

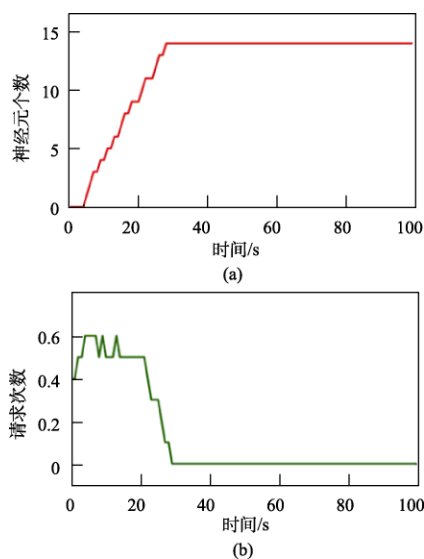


图 12 仿真实验结果

Fig.12 Experiment results in simulation

- [7] Ross S, Gordon G J, Bagnell J A. No-regret reductions for imitation learning and structured prediction[C]. The 14th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS 2011), Fort Lauderdale, USA, April 11-13, 2011.
- [8] He H, Eisner J, Daume H. Imitation learning by coaching[C]. Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2012 (NeurIPS 2012), Lake Tahoe, Nevada, USA, December 3-6, 2012.
- [9] Kim B, Farahmand A, Pineau J, et al. Learning from limited demonstrations[C]. Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2013 (NeurIPS 2013), Lake Tahoe, Nevada, USA, December 5-8, 2013.
- [10] Ross S, Bagnell J A. Reinforcement and imitation learning via interactive no-regret learning[J]. arXiv preprint arXiv:1406.5979, 2014.
- [11] Attia A, Dayan S. Global overview of imitation learning[J]. arXiv preprint arXiv:1801.06503, 2018.
- [12] Goodfellow I, Pouget-Abadie J, Mirza M, et al. Generative adversarial nets[C]. Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2014 (NIPS 2014), Montreal, Quebec, Canada, December 8-13, 2014.
- [13] Ho J, Ermon S. Generative adversarial imitation learning[C]. Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2016 (NIPS 2016), Barcelona, Spain, December 5-10, 2016.
- [14] Li Y, Song J, Ermon S. Infogail: Interpretable imitation learning from visual demonstrations[J]. arXiv preprint arXiv:1703.08840, 2017.
- [15] Song J, Ren H, Sadigh D, et al. Multi-agent generative adversarial imitation learning[C]. The 6th International Conference on Learning Representations (ICLR 2018), Vancouver, Canada, May 20-24, 2018.
- [16] Bhattacharyya R P, Phillips D J, Liu C, et al. Simulating emergent properties of human driving behavior using multi-agent reward augmented imitation learning[C]. International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2019), Montreal, Canada, May 20-24, 2019.
- [17] Xu D, Zhu F, Liu Q, et al. ARAIL: Learning to rank from incomplete demonstrations[J]. Information Sciences, 2021, 565: 422-437.
- [18] 王亚坤. 2020 年深度学习技术发展综述[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 1-7.
- [19] Kirkpatrick J, Pascanu R, Rabinowitz N, et al. Overcoming catastrophic forgetting in neural networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(13): 3521-3526.
- [20] Tang B, Matteson D S. Graph-Based Continual Learning[C]. The 9th International Conference on Learning Representations (ICLR 2021), Vienna, Austria, May 4-8, 2021.
- [21] 胡艳明, 李德才, 何玉庆, 等. 基于增量式 RBF 网络的 Q 学习算法[J]. 机器人, 2019, 41(5): 562-573.
- [22] Hu Y, Li D, He Y, et al. Incremental learning framework for autonomous robots based on q-learning and the adaptive kernel linear model[J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2019.
- [23] Hu Y, Li D, He Y, et al. Path planning of UGV based on Bézier curves[J]. Robotica, 2019, 37(6): 969-997.
- [24] Shanahan M. A cognitive architecture that combines internal simulation with a global workspace[J]. Consciousness and Cognition, 2006, 15(2): 433-449.
- [25] Weng J. On developmental mental architectures[J]. Neurocomputing, 2007, 70(13-15): 2303-2323.
- [26] Kniss J, Jin K, Ivans R, et al. Robotics Research with Turtlebot 2016[D]. Boise: Boise State University, 2016.
- [27] Joseph L, Cacace J. Mastering ROS for robotics programming: design, build, and simulate complex robots using the robot operating system[M]. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2018.
- [28] Vaughan R. Massively multi-robot simulation in stage[J]. Swarm Intelligence, 2008, 2(2): 189-208.

作者简介:



胡艳明 (1991-), 男, 博士, 高级研究专员, 主要研究方向为未知、不确定性环境下移动机器人路径规划。



华炜 (1972-), 男, 博士, 研究专家, 主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实、智能驾驶。本文通信作者。

[引用格式] 王开宇, 张弘瑞, 李 聪, 等. 基于 IDL 通用接口的人机语音交互协同控制系统设计研究[J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 77-84.

基于 IDL 通用接口的人机语音交互协同 控制系统设计研究

王开宇^{1,4}, 张弘瑞^{1,2}, 李 聪^{1,2}, 王献昌^{1,3,4}

(1. 吉林大学计算机科学与技术学院, 长春 130012; 2. 吉林大学软件学院, 长春 130012;
3. 吉林大学符号计算与知识工程教育部重点实验室, 长春 130012; 4. 成都凯斯人工智能研究院, 成都 611730)

摘 要: 无人战争将会成为未来主流战争形式, 跨平台异构协同也将成为作战指挥系统控制核心理念。现有的指控平台通常为传统的键盘输入, 对指令员的专业要求高, 且无法实现对跨平台异构设备的协同控制。基于这两点问题, 运用日趋成熟的语音识别技术, 为无人作战控制系统设计了基于语音控制的人机交互模式, 为实现跨平台异构设备的协同控制, 采用平台无关的标准接口描述语言 (IDL) 作为系统的输出指令。对于语音控制平台的设计, 首先确定了可用于跨平台异构协同的目标指令的输出形式为标准化 IDL, 并基于实验范围与 IDL 标准确定了语音识别边界; 其次采用科大讯飞语音识别技术作为语音命令向文本指令的转化工具; 然后将文本化的指令利用 ddpaser 进行断句分析; 最后, 经过语言支撑集数据库、标准化指令数据库、IDL 指令数据库进行标准化匹配, 获得边界范围内的标准化 IDL 作为指令输出。研究将为作战指控系统的开发设计, 实现人机语音交互与跨平台异构控制提供思路。

关键词: 跨平台异构; 集群协同; 自然语言识别; 断句分析; 标准接口描述语言; 模糊匹配

中图分类号: TP39 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2021)04-77-8

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.4.039

Design and Research of Human-machine Speech Interaction Cooperative Control System Based on IDL Universal Interface

WANG Kaiyu^{1,4}, ZHANG Hongrui^{1,2}, LI Cong^{1,2}, WANG Xianchang^{1,3,4}

(1. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China;
2. College of Software, Jilin University, Changchun 130012, China; 3. Key Laboratory of Symbolic
Computation and Knowledge Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012, China,
4. Chengdu Kestrel Artificial Intelligence Research Institute, Chengdu 611730, China)

Abstract: Unmanned war will become the mainstream form of war in the future, and cross-platform heterogeneous cooperation will also become the core concept of battle command system control. The traditional keyboard input is usually used in the existing accusation platform, which requires high professional qualities of the command operator, cannot realize the cooperative control of cross-platform heterogeneous devices. Based on these two problems, the speech recognition technology, which becoming mature in recent years, is used in this paper to design a human-computer interaction mode based on voice control for the unmanned combat control system. In order to achieve the collaborative control of cross-platform heterogeneous devices, Interface Description Language (IDL), a platform-independent standard, is used

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-06-16

基金项目: 国防科技创新特区“跨异构平台互联互通互操作关键理论与支撑项目”

as the output instruction of the system. For the design of the speech control platform, the output form of the target instruction which can be used for cross-platform heterogeneous collaboration is determined as standardized IDL, and the boundary of speech recognition is determined based on the experimental range and IDL standard. Secondly, the speech recognition technology of iFlytek is used as the conversion tool from speech command to text command. Then, the textual instruction is analyzed by using DDPASER. Finally, standardized matching is carried out by language support set database, standardized instruction database and IDL instruction database to obtain the standardized IDL within the boundary range as instruction output. The ideas for the development and design of combat command system and the realization of speech human-computer interaction and cross-platform heterogeneous control are provided.

Key words: Cross-platform Heterogeneity; Cluster Collaboration; Natural Language Recognition; Sentence Breaking Analysis; Standard Interface Description Language; Fuzzy Matching

1 引言

语音识别技术在近年来得到了广泛的应用并逐渐趋于成熟。在民用方面，语音识别与控制广泛应用于家用电器中，目前小米已有了一个较为完善的具有语音识别的家用电器生态。在军用方面，语音识别技术也在控制系统中占据着一席之地。在未来战场中，无人战场将会成为未来战争的主流形式。无人战斗机、无人装甲车、无人运输车、无人舰队等将会成为未来战场中的主角。由此将会引申出一系列的协同问题，不同的无人机、无人车有着不同的指令输入系统，在战场实际操作中，将会有多种不同型号的作战单位协同作战。如此繁多的系统控制，对作战控制人员提出了极高的要求，首先要求控制人员具有对多种不同型号的无人作战单位收发、处理命令信息的能力；其次，繁杂的控制系统会导致参与命令下达的控制人员人数较多，命令传递产生的偏差，以及个体之间对语言理解的不同产生的指令的改变，都严重影响着无人作战系统的协同配合；最后，在作战的极端环境下，当某个单位的指令员因故不能再发布指令时，其他的人员无法代替其控制的作战单位导致部分瘫痪。

本文将研究一种基于接口描述语言（Interface Description Language, IDL）通用接口的跨平台协同语音控制作战系统，目的在于将自然语言进行分词、匹配，最终转换为通用的 IDL，从而控制各种无人设备。

IDL 是对象管理组织（Object Management

Group, OMG）提出的 CORBA（Common Object Request Broker Architecture）规范的一部分，是一种与平台无关的顶层描述语言，用于描述对象中接口的声明^[1]，在跨平台应用开发领域有着广泛的应用。IDL 描述了接口或结构类型，其语法结构定义用客户、对象、运行时刻三部分^[2]。IDL 提供了一套通用的规范数据类型，并可用此数据类型定义更为复杂的数据类型，从而映射到实现语言中，实现跨平台应用的开发^[2]。基于 IDL 语言接口描述的通用性，将本系统的落脚点设计为 IDL 命令控制语言，从而控制异构设备，实现跨平台异构设备的协同控制。

2003 年，美国国防预先研究计划局（DARPA）和美国空军组织联合开展了软件使能控制（Software Enabled Control, SEC）研究计划，并通过验证。波音首次验证开放式控制平台 OCP 转换软件用于无人机控制以及 F-15E 与无人战机协同飞行。研究完成了有人机和无人机的通信接口设计并进行了试验，选用 F-15E 有人战斗机与无人机进行通信，二者最终通过自然语言（英语）成功传达和接收了控制指令，完成了控制任务，最终实现有人机/无人机协同编队飞行^[3]。

目前，江苏自动化研究所邢向向等在面向作战指挥的语音智能交互技术研究中，提出了一种面向作战指挥的语音智能交互模式，采用基于 M-UserCF 的协同过滤算法计算作战场景相似度，利用情景语义建模获得作战过程上下文信息，通过基于内容的推荐算法，将战场实时指挥情况与核心知识库中已经过验证的作战过程进行比较，

检索出相似的最优指挥过程集作为推荐集合^[4]。但并未实现异构设备间的控制。在对基于跨平台异构控制的语音指控系统的研究中, 尚未有合适的解决方案。

在过去两年, 我们采用 CORBA 规范下的接口描述语言, 规范、定义了异构无人系统在地面编队中的通用互操作需求、描述、落地、测试和评估。针对混合超过四类异构无人系统(含机器人、后台控制)的动态协同编队案例, 展开了基于平台无关的通用集群互操作合规性测试和评估^[5]。本项目基于已有的工作, 提出了一套基于 IDL 通用接口的跨平台协同语音控制作战系统, 实现人机交互的扩展。

2 IDL 的选择使用

2.1 软件复用

在 NATO 的软件工程会议上, Mallroy 第一次提出了软件复用的概念, 1983 年, Freeman 对软件复用给出了详细的定义^[2]“在构造新的软件系统的过程中, 对已存在的软件人工制品的使用技术”^[6]。软件复用是成熟工程领域的一个基本特征, 是实现系统通用性的基本要求, 只有软件可被复用才能体现其通用性。本文的语音控制系统, 是基于 IDL 的通用性可复用系统, 任何可以解析 IDL 命令的系统都可复用语音控制接口。软件复用可以提高系统间的互操作性^[6], 这个特性完美契合跨异构互操作无人系统的需求, 因此我们基于 IDL 命令来实现。

2.2 集群系统协同

群体智能是人工智能自主性的高级阶段^[7], 集群系统协同是一类重要的群体智能, 是人工智能未来发展的必然趋势, 也是新一代人工智能的核心研究领域^[8]。任务的复杂性与环境的不确定性决定了集群系统协同控制势必朝着智能化和自主化的方向发展, 作为新一代人工智能的核心研究领域, 集群协同控制技术已成为世界各国经济和国防发展的强大驱动力。美国《2011—2036 年无人系统综合路线图》中明确把有人机/无人机

编队飞行技术列入未来重点发展技术, 《2017—2042 年无人系统综合路线图》对互操作性、人机协作等协同技术进行了深入的探讨和规划, 协同作战的能力等级逐渐提升, 牵引着技术更加向前发展^[9]。区别于当前大多数机构研究对单一物体实现的语音控制, 本文的语音控制系统面向集群系统协同控制, 通过控制台实现、调度协同作战。基于本文所述语音控制系统的通用性, 其应用范围可扩展到所有基于 IDL 命令交互的集群协同系统中。随着集群协同系统的涌现, 语音控制系统将得到广泛应用。

2.3 IDL 的选择

使用 IDL 标准化指令进行无人协同设备的控制, 其特点概括如下: 一是 IDL 对于设备控制的通用性; 二是 IDL 在适应不同控制场景下的可扩展性。IDL 作为一种标准化的接口描述语言, 对跨平台异构的无人设备有着规范的接口要求, 凡是符合 IDL 接口标准的设备, 均可接受 IDL 指令。因此通过定义规范的 IDL 接口, 实现跨平台异构设备的协同控制。IDL 有着较为完善的指令控制集, 基本可以满足在异构设备的命令控制需求。IDL 的可扩展性主要表现在基于一个标准化的指令库, 每一条 IDL 的指令都能映射到一条标准化的控制命令, 而控制命令可以使用不同种类的语言, 按照同一标准规范化后获得。基于这样的架构, 命令控制语言将可以扩展到世界各种语言, 而不仅仅囿于单类语言的束缚。

在本项目中, IDL 的基本边界是对无人系统的控制需求, 而无人系统的指令来源又由 IDL 规范进行约束, 这就形成了一个闭环。基于 IDL 的规范, 定义了一个面向跨平台异构协同系统的标准化指令库, 用于与 IDL 标准化指令库进行匹配。与标准化指令库相对应的是一个命令库, 命令库中包含有在 IDL 边界内有定义的自然语言词汇语句, 每个标准化指令库中的指令词汇都映射一个语言支撑集数据库的同义词集, 在该同义词集中, 将命令分词后与命令库进行匹配, 映射到标准化指令库后, 生成一条标准化词语的命令, 再进行相似度匹配, 从而匹配到相似度最高的

标准指令语句。

3 语音控制系统的整体架构

构建协同作战语音控制系统，需要实现自然语言的识别、文本断句分析、词库词法匹配、IDL 匹配、语音合成。语音控制系统的运行具体包括以下步骤：指令唤醒，语音输入命令，语音命令识别，文本命令的断句与分析，命令规范化，标准命令匹配，指令员确认标准命令，IDL 标准命令匹配与发布。具体运行模式如图 1 所示。

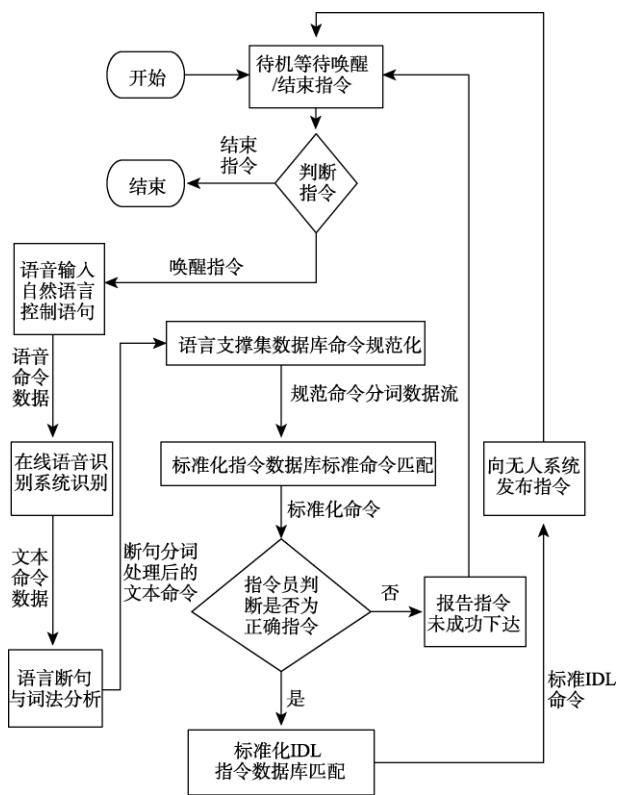


图 1 语音控制系统运行模式

Fig. 1 Operation mode of voice control system

根据属性与组成系统的作用，语音控制系统主要分为三层结构：应用层、支撑层和基础层。

应用层：为用户提供语音控制服务，主要包括语音采集、语音唤醒、指令接收的人机交互设备。

支撑层：为整个系统提供所需的支撑，包括语音传递、文本分词、词法分析、指令传递，主要承担应用层与基础层的信息加工与信息传递的工作。

基础层：为系统提供网络通信，并有规范化数据库支持，包括命令词库、标准化指令词库、标准化 IDL 库等。

语音控制系统组成如图 2 所示。

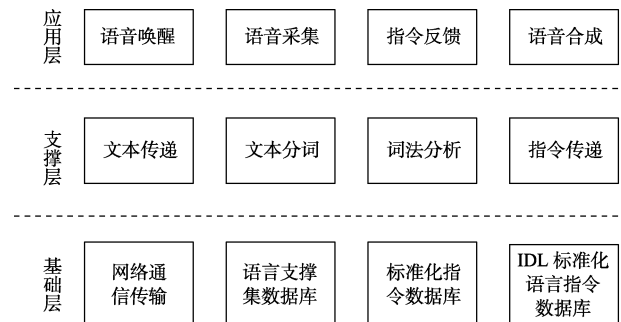


图 2 语音控制系统组成

Fig. 2 Composition of voice control system

4 自然语言命令识别与处理

4.1 自然语言命令定义

汉语语句主要是由词和短语构成，能表达一个相对完整的意思，完成一次简单的交际任务，在语音上有语调，表示陈述、疑问、祈使、感叹的语气，在书面上用句号、问好、感叹号表示，句子结构一般为：(定)主+[状]谓<补>+(定)宾^[10-11]。

在协同作战语音控制系统中，通常下达的命令主要以祈使句为主，句子的结构主要为“代号名词+行动命令”，“代号名词+行动命令+代号名词”或“行动命令+代号名词”的形式，在词法分析的过程中，将运用 ddpaser python 包将名词与动词进行分词解析，将解析后的不同类型的词汇分别与语言支撑集数据库中的词语进行匹配。

4.2 自然语言-IDL 标准化匹配技术的实现

自然语言-IDL 标准化匹配技术是实现自然语言控制无人系统的关键性步骤。本技术分为三个阶段，第一个阶段将输入的文本进行预处理，分词及词性标注，分析命令的预参数以及动作指令。第二个阶段将动作指令经过处理得到标准化指令，同时检查上一步得到的预参数数量以及类型是否正确。第三个阶段得到标准化指令在 IDL 中对应的函数调用以及预参数在无人系统内部

IDL 语言表达。最后将得到的 IDL 函数以及参数返回给控制台, 由控制台调用函数完成对无人系统的控制, 实现协同作战。

4.2.1 指令数据库系统设计

指令数据库系统是本系统设计的核心工程, 自顶向下地构建了三个重要的数据库。顶层为语言支撑集数据库, 中层为标准化指令数据库, 底层为 IDL 标准化接口语言指令数据库。自顶向下的三层指令数据库设计如图 3 所示。

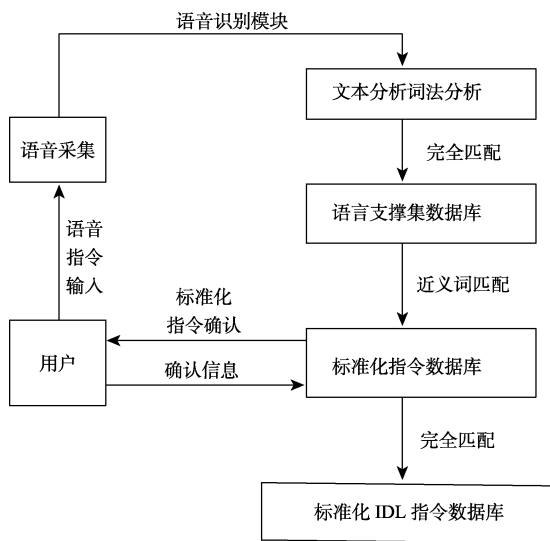


图 3 自顶向下的三层指令数据库设计
Fig. 3 Top-down three-tier instruction database design

语言支撑集数据库指令集主要针对特定场景, 进行指令集的构建, 并随着适用场景的改变进行指令集扩充。在协同作战系统中, 主要由设备名词与指令动词构成, 每种设备名词与指令动词将会有等价词汇集与其相对应。

标准化指令数据库是连接语言支撑集数据库与标准化 IDL 指令数据库的核心。标准化指令数据库接收由语言支撑集数据库发送的标准指令流, 一条指令流中包含了多个匹配的标准化的名词与动词, 系统将运用此字符流与标准化指令集中的指令进行匹配, 匹配到相似度最高的标准化指令进行输出。

标准化 IDL 指令数据库(后文简称 IDL 指令库), 主要存储的是界定范围内的标准化 IDL 指令, 用于向无人设备发布指令。

4.2.2 DDParse 依存句法分析技术介绍

依存句法分析是自然语言处理的核心技术之一, 旨在通过分析句子中词语之间的依存关系来确定句子的句法结构^[12], 其分析实例如图 4 所示(分析句子:“设置 A 点为目标点”)。对文本进行依存句法分析, 可以对文本进行断句, 并且得到句子成分之间的修饰关系以及单词词性。

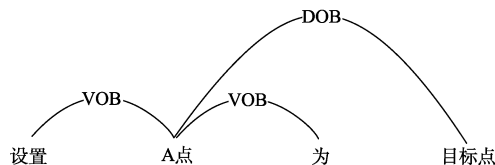


图 4 DDParse 的词法分析
Fig. 4 Lexical analysis of DDParse

4.2.3 命令文本预处理

预处理针对已转换为命令文本所存在的发音不准导致识别不准, 指令噪声词较多等情况, 进行的命令词纠错、剔除噪声词。指令噪声词指在语音命令中出现的频率较高但含义或区分能力较低的词, 如“那么”“吧”“儿”等, 过滤掉这些噪声词有助于提高解析精度和效率^[4]。

对于预处理, 采用利用正则表达式进行字符串匹配的方法, 找到噪声词将其过滤, 并将因指挥员口音不标准或识别系统不完善导致的多次识别错误的词汇修改为正确的表达方式。

4.2.4 分词及语言支撑集数据库匹配

将预处理后的命令文本利用依存句法分析技术分词并且进行词性标注, 如命令文本“让一车跟着二车”, 其分词结果是“让/一/车/跟着/二/车”, 词性标注的结果是[v,m,n,v,m,n], 其中 v 代表动词, m 代表数字, n 代表名词。将分词得到的单词序列分别在语言支撑集数据库中匹配, 相应的单词对应为语言支撑集数据库中的标准词。这一过程可以实现近义词的标准化, 如将一系列近义词“跟着”“尾随”“跟从”“追随”等全部匹配成标准动作指令“跟随”, 以及将表示数字的汉字标准化为数字, 例如“一”匹配成为“1”。除了上面举例的标准动作指令, 语言支撑集数据库中还拥有名词库, 亦可将句中的名词匹配成为标准名

词，作为参数输出。对于上文的文本命令例子，其匹配结果是“设置 1 车跟随 2 车”。由于指令言简意赅，结构相对简单，因此匹配到标准动作指令后，取其两侧的名词（若存在）以及修饰名词的数字（若存在）等，作为预参数。随后对预参数进行处理，匹配成无人系统内部相应的参数标识符并与标准动作指令相对应的 IDL 函数调用返回给无人系统。

4.2.5 模糊匹配及正确性检测

在一个系统中，拥有一定的纠错机制是必不可少的，以期达到让人感到舒适的人机交互体验。在语音识别、文本解析以及匹配中，难免会出现错误，如语音识别出现的文本错误、解析出的参数类型错误或者数量错误等，都会造成系统无响应的问题。

将标准动作指令在标准化指令库中进行模糊匹配，匹配到相似度最高的标准化指令进行输出。采用 Levenshtein 距离算法计算两字符串的相似度，通过计算从原字符串 S 转换到目标字符串 T 所需要的最少的插入、删除和替换的数目即 Levenshtein 距离来计算相似度^[13]。

文本相似度计算^[14]： $L_Distance$ 为两字符串之间的 Levenshtein 距离， $Length1$ 与 $Length2$ 分别表示两字符串长度， Max 指取较大值，则

$$\text{相似度} a = 1 - \frac{L_Distance}{\text{Max}(Length1, Length2)} \quad (1)$$

相似度阈值设置为 80%，如果最高相似度低于阈值，则认为匹配失败。如果匹配失败则表明标准化指令库中不存在该指令，标准化指令生成错误，语音合成模块提示命令无效，需重新等待命令下达。标准化指令库中还为每个标准指令指明了参数的数量以及参数的类型，如果匹配成功则得到一个规范化的标准指令，判断一阶段得到的预参数是否数量符合、类型符合。若不符合，则语音合成模块提示命令无效，需重新等待命令下达。

如果均没有出现问题，语音合成模块发出语音重复整条命令，等待指令员确认。若确认正确，则执行下一步；若确认错误，需等待命令重新下达。

4.2.6 标准指令与参数的 IDL 转化

只有将指令以及参数转化为无人系统接口所支持的 IDL 指令，才能做到直接对无人系统的控制。IDL 指令库中，标准化自然语言指令与 IDL 指令是一一映射的关系。IDL 指令库需要接收两个指令才能进行指令调用与指令发布，一个是中层模块的标准化指令，另一个是用户的指令确认信息，当两个指令成功输入时，标准化指令将映射到 IDL 指令库的指令集，得到指令所对应的 IDL 函数。同样地，将参数转换为无人系统内部的标识符，等待返回给系统。

4.2.7 返回函数及其参数

将 IDL 函数以及参数的 IDL 表示返回给无人系统控制台，控制台进行函数调用以实现对于无人系统的控制，实现协同作战。

5 应用实例

5.1 语音唤醒功能与语音文本转化的实现

LD3320 提供的语音识别技术，基于“关键词语列表”的识别技术，语音识别芯片完成的工作就是^[15]：把通过 MIC 输入的声音进行频谱分析→提取语音特征→和关键词语列表中的关键词语进行对比匹配→找出得分最高的关键词语作为识别结果输出，系统的主控 MCU 反复启动识别过程^[15]。

囿于 LD3320 模块有限的存储能力，该模块只能存储 50 条预先设置好的指令进行识别，根据其简单准确快速且能在不同平台环境下离线稳定识别的特点，将这个模块使用作为整个系统的唤醒装置。为 LD3320 模块通电后，该模块将处于待机状态，对外界语音进行实时循环识别，当收到约定唤醒指令时，模块向控制台主程序以字符串的形式发送指令识别信号，并进入循环等待结束信号。当指令发布完毕时，以一个单片机约定词如“OVER”结束，单片机将会向主程序发送终止信号，主程序终止录音功能并开始连接网络，对录音频段进行语音识别。

主程序在录制音频结束后，将会通过科大讯飞提供的 API，将录音文件传递到科大讯飞语音

识别平台上,科大讯飞语音识别平台将把识别后的文档传入主程序中。

5.2 标准化指令应用实例

基于本项目的应用场景,设定了指令边界,以下是部分指令边界定义:

名词类: 当前,位置,目标,车头,尾号,速度,米,秒,时间,前,后,左,右

动词类: 设置,移动,跟踪

指代类: 当前,上一个,下一个

环境类: 地面,室内地面,操场,野外,点,路线

对象类: 车,单元,(具体的车)车号,前车,后车

角色类: 跟随者,领队者

后台: 控制,自主,编队

命令类: 加入,撤出,暂停,恢复,设置

序号类: N 号($N=1,2,3\cdots$)字母集 $A(A=A,B,C\cdots)$

直接选取识别后的指令进行分词及匹配过程。

实例一:

假定已经有命令“设置目标点为 A”,

识别指令“设置目标点为 A”

分词后指令“[‘设置’,‘目标点’,‘为’,‘A’]”

匹配语言支撑集数据库“[‘设置’,‘目标点’,‘A’]”

匹配标准化指令数据库“设置 A 点为目标点”

匹配 IDL 命令数据库 “consoleObject.setGoalPoint(consoleObject.getUnitPoint("A"))”

实例二:

识别指令“设置当前编队为目标跟踪模式”

分词后指令“[‘设置’,‘当前’,‘编队’,‘为’,‘目标’,‘跟踪’,‘模式’]”

匹配语言支撑集数据库“[‘设置’,‘当前’,‘编队’,‘目标’,‘跟踪’]”

匹配标准化指令数据库“设置当前编队跟踪模式为目标跟踪”

匹配 IDL 命令数据库

“consoleObject.setTrackMode(SRIO_Console::TrackMode.ObjectTrack)”

6 结束语

协同作战将会成为未来战场的主要形式,而协同作战指令下达的简化,将极大地简化指令员的指令下达过程,并将指令标准化、精准化下达到跨平台跨系统的无人设备上。本文提出了一种基于 IDL 通用接口,面向协同作战系统的中文语言控制平台的解决方案,让语言指挥跨平台设备协同作战成为可能。本文基于自然语言向标准化接口语言转化的思路,也将为自然语言编程提供基础。

后续仍需继续完善的工作包括两个方面:一是语音识别系统的本地化处理,即在极端网络条件下,离线语音的识别处理;二是词库数据库的完善与扩充,在应对不同场合下对词库边界的重定义,对上层词库语言类型进行扩展等。

参考文献

- [1] 王献昌,王开宇,吕家兴. 基于平台无关描述的无人系统集群互操作性能力验证平台[C]. 第一届无人自主系统试验鉴定高端学术论坛,北京,2020.
- [2] Martin G. IDL 精髓[M]. 宋亚,译. 北京:中国电力出版社,2002.
- [3] 樊洁茹,李东光. 有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J]. 无人系统技术,2019,2(1): 39-47.
- [4] 邢向向,陈希,朱德法,等. 面向作战指挥的语音智能交互技术研究[A]. 2019 第七届中国指挥控制大会,北京,2019.
- [5] 王献昌,王开宇,吕家兴. 跨异构无人系统通用互操作能力合规性测试试验[C]. 第一届无人自主系统试验鉴定高端学术论坛,北京,2020.
- [6] 张驰. 异构组件互操作技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.
- [7] 符文星,郭行,闫杰. 智能无人飞行器技术发展趋势综述[J]. 无人系统技术,2019,2(4): 31-37.
- [8] 谷海波,刘克新,吕金虎. 集群系统协同控制:机遇与挑战[J]. 指挥与控制学报,2021,7(1): 1-10.
- [9] 张旭东,孙智伟. 未来有人机/无人机智能协同作战顶层概念思考[J]. 无人系统技术,2021,4(2): 62-68.
- [10] 熊志恒,闵华松. 基于自然语言的分拣机器人解析器技术研究[J]. 计算机工程与应用,2017,53(8): 113-119.
- [11] 刘月华. 实用现代汉语语法[M]. 北京:外语教学与研究出版社,1983.
- [12] Wu T Z. Improving AMR parsing by exploiting the dependency parsing as an auxiliary task[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020: 1-12.
- [13] Levenshtein V I. Binary code capable of correcting deletions, insertions and reversals[J]. Doklady Akademii Nauk SSSR,

1966, 163(4): 708-710.

- [14] 牛永洁, 张成. 多种字符串相似度算法的比较研究[J]. 计算机与数字工程, 2012, 40(3): 14-17.
- [15] 洪家平. LD3320 的嵌入式语音识别系统的应用[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2012, 12(2): 47-53.

作者简介:



王开宇 (1997-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为人工智能、集群协同、互操作中间件。



张弘瑞 (1998-), 男, 本科生, 主要研究方向为人工智能、集群协同、自然语言处理。本文通信作者。



李聪 (2000-), 男, 本科生, 主要研究方向为人工智能、集群协同、自然语言处理。



王献昌 (1966-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为人工智能、集群协同、无人系统、协同互操作系统。

[引用格式] 张洛溪, 谷丰, 何玉庆, 等. 空中-水面子母无人平台系统设计与协同控制[J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 85-96.

空中-水面子母无人平台系统设计与协同控制

张洛溪^{1,2}, 谷丰^{1,2}, 何玉庆^{1,2}, 狄春雷^{1,2}, 褚玲玲^{1,2,3}, 聂虹宇^{1,2,3}

(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, 沈阳 110016;
2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110169; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 微小型固定翼无人机和水面无人船组成的子母型无人系统是一种典型的跨域异构协同实现方式, 开展有针对性的相关研究可快速提升我军现有无人装备技术水平。首先, 介绍了国内外空中-水面子母无人平台系统的研究进展; 其次, 针对舰载固定翼无人机难回收的问题提出了一种全新的跨域异构协作的实现方式: 利用可变柔性机械臂配合拦阻索的机构辅助实现在狭小空间和恶劣条件下对微小型固定翼无人机平台的自主释放与回收, 并详细介绍了该子母系统; 然后, 搭建半物理仿真平台、开发原理样机, 分别在实现了半物理仿真以及真实水面环境下实现了空中-水面子母无人平台系统的协同控制以及全自主循环释放与回收试验; 最后, 该试验验证了该空中-水面异构平台系统作为一种跨域协作实现方式的可行性。该空中-水面子母无人平台以高成功率的方式实现了全自主循环释放与回收, 对未来大型舰载固定翼无人机与无人船实现跨域协同具有借鉴意义。

关键词: 子母系统; 跨域协作; 协同控制; 自主起降; 微小型固定翼; 异构

中图分类号: TP249 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)04-85-12

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.4.040

Air-to-surface Unmanned Platform System Design and Coordinated Control

ZHANG Mingxi^{1,2}, GU Feng^{1,2}, HE Yuqing^{1,2}, DI Chunlei^{1,2}, CHU Lingling^{1,2,3}, NIE Hongyu^{1,2,3}

(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. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The cluster-type unmanned system composed of small fixed-wing UAVs and surface unmanned ships is a typical cross-domain heterogeneous collaborative realization method. And targeted related research can quickly improve the existing unmanned equipment of our army technique level. Firstly, the research progress of domestic and foreign air-to-surface unmanned platform systems is introduced. Secondly, a new cross-domain heterogeneous cooperation implementation method is proposed for the problem of difficult recovery of ship-borne fixed-wing UAVs. The way is that using the mechanism of the variable flexible manipulator and the arresting cable assists in realizing the autonomous release and recovery of the micro-small fixed-wing UAV platform. Then, a semi-physical simulation platform for the development of the principle prototype is built. In the realization of semi-physical simulation and real water surface environment, the coordinated control of the air-to-surface unmanned platform system and the fully autonomous circulation release and recovery test are realized. Finally, the test verified the air-to-surface the feasibility of heterogeneous platform system as a way to realize cross-domain collaboration. This unmanned aerial-to-surface unmanned platform achieves a

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-06-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0810100)

fully autonomous cycle release and recovery with a high success rate, which is of reference significance for future large-scale shipborne fixed-wing UAVs and unmanned ships to achieve cross-domain coordination.

Key words: Parent-child System; Cross-domain Collaboration; Collaborative Control; Autonomous Take-off and Landing; Micro Fixed Wing; Heterogeneous

1 引言

跨域异构协同是解决现有无人装备能力瓶颈的有效手段之一，也是未来无人化战争的主要作战模式，这一概念在过去几年已经得到了美国军界和学术界的持续高度关注。所谓跨域异构协同是指空中、地面、海洋无人平台之间通过互联互通，实现高效协作，从而组成有机的整体、协同作战的一种无人平台新系统、新模式。通过跨域异构协同，可充分利用不同种类平台在感知能力、移动性能等方面存在的明显能力互补性，有效弥补单类型平台存在的固有缺陷，实现使命能力和执行效率的显著提升。这种跨域异构协同的概念已经得到了欧、美等军事、科技强国的高度重视：美国《2016 美国机器人发展路线图—从互联网到机器人》^[1]和无人系统综合路线图^[2-4]中都明确提出了对于跨域协作的发展规划；欧盟机器人技术发展路线图中也将跨域协作列为其中期（10 年）发展目标之一。跨域异构平台协作已经成为当今智能化无人装备发展的一个明显趋势。

微小固定翼无人机和水面无人船组成的子母型无人系统是一种典型的跨域异构协同实现方

式，同时其协同控制也面临着极大的技术挑战，有针对性地开展相关研究可快速提升我军现有无人装备的技术水平。近年来，随着无人机集群概念和相关技术的快速发展，微小型固定翼无人机平台得到了诸多关注，如果能实现在水面等母载体上的灵活释放与回收并与母体形成协同，则可大大提升其所能达到的作战效能，因此也得到了广泛关注。但是，固定翼飞行器的飞行特点决定了在复杂环境（水面的风扰、水面船的纵横摇等因素）中实现对其自主释放与回收面临着极大的技术挑战，从而为其形成灵活、可循环的跨域子母平台带来了巨大的困难。

进入 21 世纪后，利用不同种类的空中-子母平台跨域协作系统的设想和研究得到了欧美等国的高度关注。

美国方面：SPAWAR 中心，曾在美国国防预先研究计划局（DARPA）的资助下开展过空中（旋翼无人机）-地面（无人车）-水面（无人船）平台跨域协作的研究，并于 2005 年 12 月进行了针对“入侵人员”监控与打击的演示（图 1）。

美国（极光飞行科学公司，Aurora）公布了一种新的固定翼无人机自主释放与回收装置，如



图 1 美国圣迭戈 SPAWAR 中心进行的空中-地面-水面跨域协作演示^[5]

Fig. 1 Air-ground-water cross-domain collaboration demonstration conducted by SPAWAR Center in San Diego, USA^[5]

图 2 所示, 并于 2017 年测试成功, 这被称为 SideArm 的系统, 由起重机、滑轨和滑动回收器三部分组成, 通过高精度无人机飞行控制, 使飞机上端主钩以一定高度挂至回收器的绳缆上, 以达到减速的目的。另外, 美国“扫描鹰”(ScanEagle)无人机和“整合者”(RQ-21A)无人机采用“天钩”(Skyhook)回收系统如图 3 所示。该回收系统用一根垂直悬挂在吊杆上的拦阻绳捕获无人机翼尖锁钩来实现回收, 结构组成简单、收放机动灵活, 可在陆基地面/车载、海基舰载/岛礁等各种狭小回收空间使用^[6-9]。

欧盟方面: 2007 年, 在法国国防部的支持下, 法国多家研究机构联合开展了多平台跨域协作问题的研究 (PEA-Action 项目)。该项目以边界巡逻与监控为背景, 针对跨域协作中的“数据融合”和“态势评估与决策”两个科学问题, 旨在研究不同平台 (空中、地面、水面、水下) 之间的跨

域协作方法及其实现技术^[10-12] (图 4)。



图 2 SideArm 系统
Fig. 2 SideArm System



图 3 “天钩”(Skyhook)回收系统
Fig. 3 Skyhook recycling system

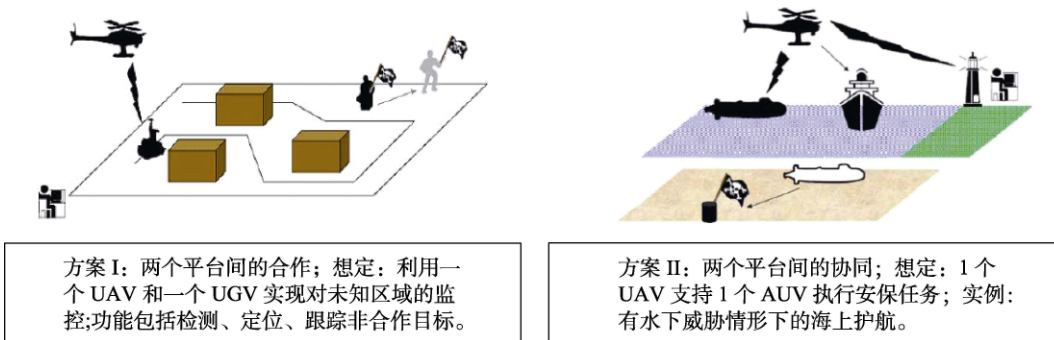


图 4 法国 PEA-Action 项目中的跨域协作

Fig. 4 Cross-coordination in the French PEA-Action project

国内方面: 2018 年南京航空航天大学李春涛研究团队实现了小型舰载无人机弹射起飞与天钩回收的空中-水面子域跨域协同的方式, 并对其无人机弹射与起飞进行了详细的动力学分析^[13-14], 如图 5 所示。

国外关于跨域异构无人系统的研究始于 21 世纪初, 但纵观相关技术发展, 大部分将目光停留在松协同模式, 即不同平台之间并无物理连接, 只是通过编队控制等行为协同实现任务合作。即使对于为数不多的子母平台研究, 也更多地集中在旋翼无人机和地面、水面等平台组成的子母平

台, 直接研究固定翼无人机和其他平台组成子母系统的并不多见, 其中重要原因之一是固定翼无人机的自主释放与回收技术尚不成熟^[15-19]。

如图 6 所示, 本文提出了一种全新的跨域异构协作的实现方式: 利用可变柔性机械臂辅助实现在狭小空间和恶劣条件下对微小型固定翼无人机平台的自主释放与回收。以此为基础, 借鉴前期在多无人平台跨域协作方面的大量研究成果和研发经验, 对异构智能系统自主协同控制技术开展系统深入的研究工作, 以期构建跨域异构协同技术体系; 同时, 研发由微小型固定翼无人机和

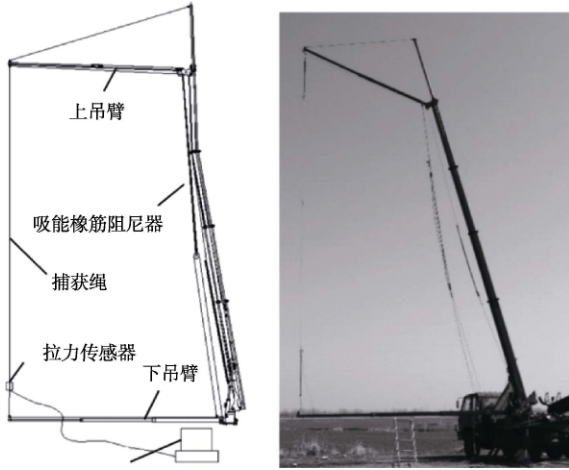


图 5 南航“天钩”回收系统

Fig. 5 Skyhook recovery system of nanjing university of aeronautics and astronautics

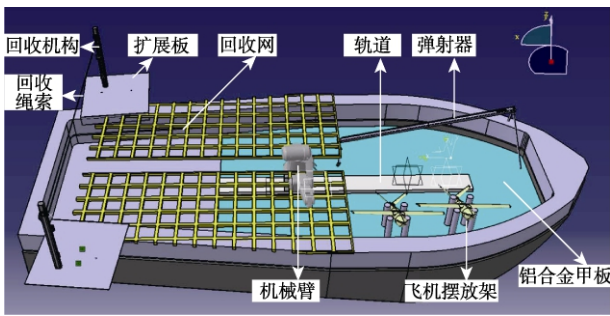


图 6 跨域异构子母平台的自主回收过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the autonomous recovery process of the cross-domain heterogeneous parent-child platform

水面无人船组成的跨域异构子母平台原理样机，系统性地开展跨域协同试验研究，为后续形成子母型跨域异构智能无人系统装备奠定技术基础。

2 系统组成与设计

固定翼无人机在舰船甲板上的自主收放主要面临以下几方面挑战：一是甲板面积有限，无法给固定翼无人机的起飞和降落提供较大的滑跑空间；二是无人船平台甲板的摇摆和浮沉给无人机的收放控制带来安全的风险；三是完成收放的空间狭小，给无人机的收放过程的控制精度提出了更高的要求；四是该系统需要实现全自主化，收放系统具有较高的自动化水平。针对上述问题，设计了小型固定翼无人机自主收放系统，系统总体构成及功能如图 7 所示。

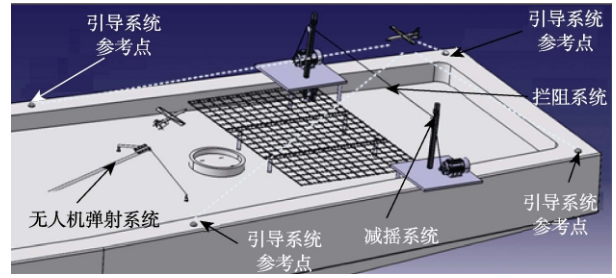


图 7 系统总体构成及功能图

Fig. 7 Overall system structure and function diagram

(1) 拦阻子系统：实现无人机回收过程中的柔性减速和能量的吸收，缩短无人机溅落滑行的距离，降低对无人机本体的冲击。

(2) 减摇子系统：补偿甲板横纵摇及浮沉运动，实现拦阻绳索的姿态平稳。

(3) 引导子系统：实现收放过程中，无人机相对甲板的高精度定位与定姿以及甲板运动状态的预测，为无人机的降落提供导航信息。

(4) 气动弹射子系统：通过高速气压释放，实现无人机在甲板上短距离弹射起飞。

系统总体方案如图 8 所示，减摇子系统通过对甲板运动的补偿实现拦阻绳索期望姿态的保持，完成对无人机回收的准确拦阻，并引导无人机安全降落于着陆网上；拦阻子系统通过对拦阻电机的扭矩控制实现对无人机的柔性减速，使无人机安全降落；气动弹射系统通过快速释放气压，为无人机提供起飞的初速度；引导系统布置于甲板上，实现机-船相对状态的高精度测量和甲板的运动预测，为上述三个子系统提供实时和预测的

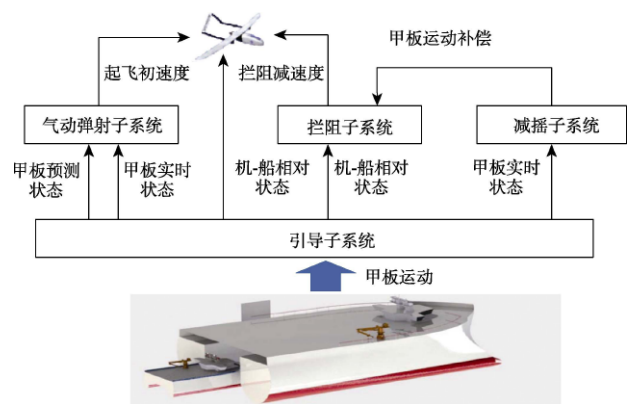


图 8 系统总体方案设计图

Fig. 8 System overall scheme design drawing

甲板运动状态, 同时还能提供机船间的高精度相对状态。

2.1 减摇子系统

减摇子系统的核心功能是实现拦阻绳索的姿态不受甲板运动影响, 保持稳定的姿态对无人机进行拦阻。减摇子系统原理如图 9 所示, 采用两套移动滑轨并联而成, 滑轨上安装有减摇电机驱动的运动滑块, 一方面, 两套运动滑块通过同向运动能够补偿船身的纵摇与垂向运动; 另一方面, 通过运动滑块的相对运动补偿船身的横摇, 通过上述功能配合可以保持拦阻索有效的拦阻状态。

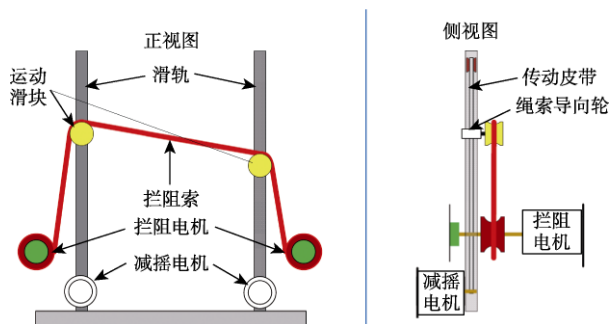


图 9 减摇子系统原理图

Fig. 9 Schematic diagram of anti-rolling subsystem

该系统通过引导系统获取高频率的船身相对无人机的姿态变化, 采用快速傅里叶变换将数据进行频域分析, 通过卡尔曼滤波器筛选低频大幅值信号, 然后通过补偿机构的运动学模型解算出期望位置, 最终控制各关节电机运动, 达到快速准确补偿的目的。

甲板补偿系统机械结构如图 10 所示, 减摇电机布置与系统底部, 垂直安装, 通过换向和传动

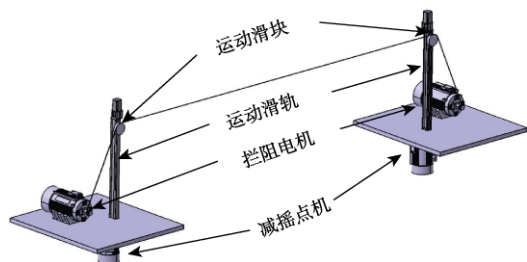


图 10 甲板补偿系统机械结构图

Fig. 10 Mechanical structure drawing of deck compensation system

实现对运动滑块的运动驱动。运动滑轨是运动滑块的载体。拦阻电机主要实现拦阻索的张紧和拦阻减速度的控制。

基于上述原理设计, 根据系统 5 级海况下回收的任务要求, 构建了仿真模型, 对系统的主要功能和参数进行了仿真分析。系统的主要设计输入参数如表 1 所示。

表 1 系统主要设计输入参数
Table 1 System main design input parameters

指标	参数
风速	10.8~13.9 m/s
波高	3~4 m
波浪周期	3.8~13.6 s
甲板摇摆幅度	横滚角: $\beta \in [-6^\circ, 6^\circ]$ 俯仰角: $\gamma \in [-3.5^\circ, 3.5^\circ]$
无人机降落速度	22.2 m/s
无人机重量	15 kg

根据上述参数, 构建系统仿真模型, 通过仿真计算分析可得, 船身随海浪运动的同时, 海浪补偿机构可进行补偿运动。运动滑块的位移如图 11 所示, 补偿过程中只有沿绳索轴向的运动, 航向、横滚、纵向及垂向均可以保持初始状态。通过仿真最终计算出滑块位移距离不大于 6.77 m。

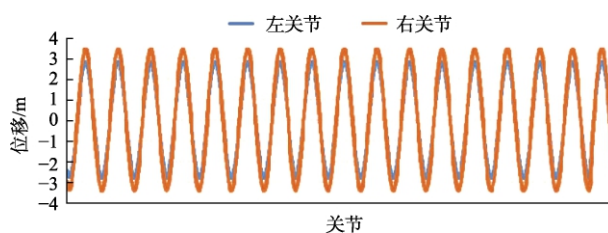


图 11 运动滑块的位移

Fig. 11 Displacement of the moving slider

图 12 显示该点处的力与加速度均近似为 0, 表明该点处除了沿绳索轴向运动之外无其他方向的运动趋势。右侧链接点处的运动情况与之相似, 可说明该机构补偿的可行性。

为了实现模块功能, 所要使用的模块包括通信交互模块, 如图 13 所示: 具备协议拆解功能, 通过无线通信获取无人机的位姿数据; 减摇控制器: 将通信得到的相对姿态数据进行变换、分解、

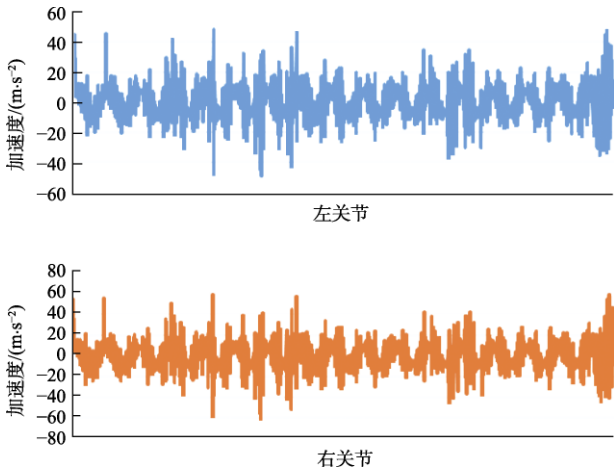


图 12 链接点处的加速度

Fig. 12 Acceleration at the link point

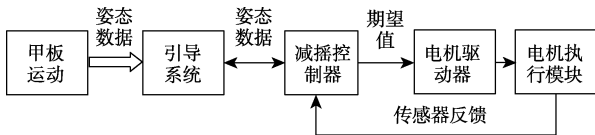


图 13 减摇子系统控制框图

Fig. 13 Control block diagram of anti-rolling subsystem

滤波等处理，通过运动学模型计算出各关节期望位置值；传感器反馈模块：实时获取电机运动信息，为控制器提供反馈，形成闭环；电机控制模块：根据期望值、传感器反馈值，准确控制电机达到机构执行的目的。

甲板补偿运动控制采用基于自适应 FFT 预测算法与模糊-PID 相结合的控制策略，能够根据船身姿态变化进行实时姿态补偿，实现运动滑块的快速响应，补偿作动器延迟，自适应补偿母船与无人机之间的相对运动，算法解算模块包括欧姆龙 CPU、上位机；电机控制模块包括欧姆龙 NX 单元、电机、电机驱动器。系统主要设计参数如表 2 所示。

表 2 减摇子系统主要设计参数

Table 2 Main design parameters of anti-rolling subsystem

指标	参数
拦阻绳索长度	15 m
滑轨长度	7 m
运动滑块运动速度	6 m/s
滑块运动加速度	59 m/s ²

2.2 拦阻子系统

拦阻子系统主要通过柔性拦阻吸收无人机回收过程中的能量，逐步减小无人机的速度，实现无人机的安全回收。主要由拦阻电机、拦阻绳索和绳索导向轮组成，如图 14 所示。拦阻绳索向两侧延伸，通过一组导向滑轮连接至拦阻电机上。整个工作流程主要分为待命阶段、拦阻阶段和回收阶段。在待命阶段，拦阻电机需要克服减摇子系统中运动滑块的减摇运动带来的滑块间的距离的变化，始终保持拦阻绳处于张紧状态；在拦阻阶段，根据无人机的速度、姿态和位置控制电机扭矩，从而为无人机提供恒定的减速度，吸收拦阻能量；在回收阶段，电机不输出力矩，待飞机回收完毕，电机加载力矩，回收绳索重新进入待命状态。

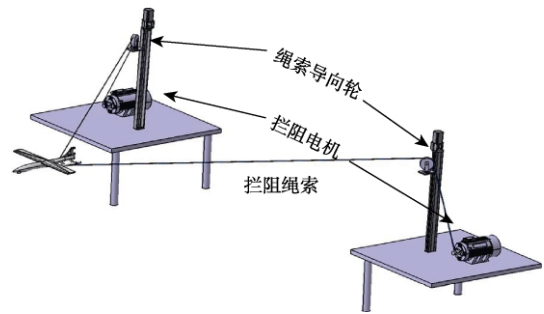


图 14 拦阻子系统示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the arresting subsystem

拦阻系统控制框图如图 15 所示，根据引导系统提供的机-船相对状态，以及期望的无人机回收位置和状态，分别解算两个电机的期望转速、扭矩等变量，然后根据电机状态的实时反馈，采用柔性控制方法实现对电机输出的控制，通过两个电机的配合实现无人机的拦阻的降落位置的控制。

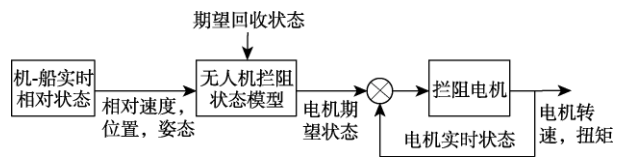


图 15 拦阻系统控制框图

Fig. 15 Arresting system control block diagram

拦阻子系统与减摇子系统使用相同的控制系统。在控制拦阻子系统时, 需要用到两个电机的扭力数据, 因此软件系统主要分为接口软件和控制软件, 接口软件中串口主要是嵌入于 CDHD 控制单元, EtherCat 总线主要是嵌入于 NX1P2 控制单元, 其中串口有两个: 一个用于接收舰载控制子系统的电机控制信息并将电机的实时扭力发送给舰载控制子系统, 另一个用于控制电机和接收电机的实时扭力信息, EtherCat 总线用于接收电机编码器信息而得到电机位置。控制软件主要是嵌入于 NX1P2 控制单元, 用于控制电机。这两部分软件都是通过对控制单位的配置来实现的。基于上述设计, 设计拦阻系统的主要参数指标如表 3 所示。

表 3 拦阻系统主要参数指标

Table 3 Main parameters of the arrest system

指标	参数
导向轮之间的距离	15 m
飞机减速距离	≤ 13 m
拦阻减速度	≥ 25 m/s ²
电机扭矩	≥ 1.4 N·m

2.3 引导子系统

引导子系统如图 16 所示, 主要包含两方面的功能: 一是预估甲板运动的静息期, 获取最佳回收窗口; 二是实现无人机与甲板的高精度高频率的相对定位。因此, 引导子系统主要由多站测距模块和组合导航模块构成。多站测距模块主要通过测量无人机的距离解算出无人机相对甲板的定位。组合导航模块主要用于测量甲板的位置和姿态, 提供甲板的俯仰、横滚、航向、浮沉等数据。

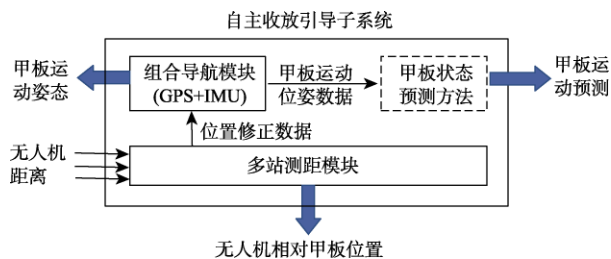


图 16 自主收放引导子系统主要构成及功能

Fig. 16 Main composition and function of the autonomous retractable guidance subsystem

舰船受风浪影响, 存在六自由度运动: 纵摇、横摇、艏摇、纵荡、横荡和垂荡, 如何预测甲板的运动状态是无人机实现回收决策的重要依据。舰船的运动由海浪所驱使, 虽然某一时刻或者某一次海浪运动可以看成一种纯随机过程, 然而从长期的统计来看, 可以认为是一个平稳随机过程, 鉴于此, 可以进行舰船甲板运动状态的预估工作。本项目拟采用时间序列法对甲板运动状态进行预测。如图 17 所示, 该方法依据甲板运动的历史数据进行预估, 不依赖甲板运动本身的数学模型, 在采集到 N 个历史数据后, 建立自回归 (Autoregressive, AR) 模型, 采用最小二乘法对模型参数进行辨识, 通过 AIC 准则 (Akaike Information Criterion) 对模型进行定阶, 从而得到预报模型, 进而可进行递推预报。

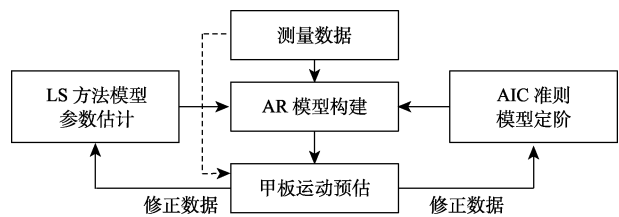


图 17 甲板运动预测技术方案

Fig. 17 Deck motion prediction technology scheme

多站测距模块主要基于多站测距定位原理实现无人机相对甲板的高精度和高频率定位, 如图 18 所示。多站测距系统拟采用超宽带 (UWB) 测距模块构建, 其中, UWB 参考点 (RN) 按照一定的几何布局安装在舰船的降落平台上, 其相对坐标通过标定获取。UWB 目标站点 (TN) 安装在待定位的无人机上。采用基于 TOA 的多站测距定位方式。通过双向飞行时间测距获得 TN

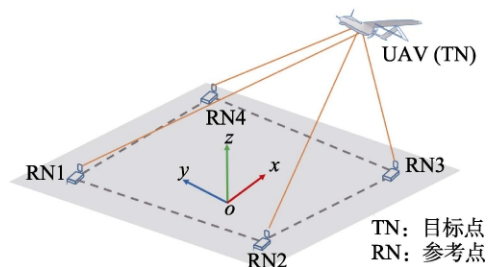


图 18 基于多站测距定位的引导原理

Fig. 18 Guidance principle based on multi-station ranging and positioning

到每个 RN 的距离，由于测量误差的存在，定位结果是一个包含 TN 真实位置的三维区域。根据一定的误差准则，常用的如平方差之和最小准则，可以获得 TN 的位置估计^[20-21]。

为了提高位置跟踪的准确性，这里将采用加权最小二乘（Weighted Least Squares, WLS）定位算法和扩展卡尔曼滤波（Extended Kalman Filter, EKF）相结合的策略，如图 19 所示。通过 UWB 测距模块获得的一组距离测量值输入 WLS 定位算法，解算出 TN 的粗略位置，然后将原始的距离测量值与上一步得到的粗略位置估计一起作为系统的观测值，并作为扩展卡尔曼滤波器的输入；最后，对每个 RN 分别执行扩展卡尔曼滤波处理，对得到的多个 RN 的位置估计进行加权平均，得到最终的位置估计。

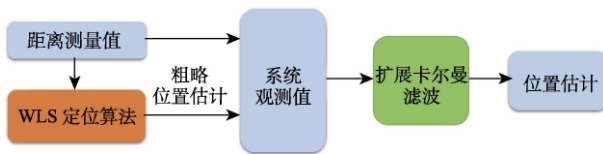


图 19 WLS 与 EKF 相结合的动态位置估计策略
Fig. 19 Dynamic position estimation strategy combining WLS and EKF

主要系统设计参数如表 4 所示。

表 4 引导子系统设计指标
Table 4 Guidance subsystem design index

指标	参数
数据频率	≥ 100 Hz
相对定位精度	≤ 20 cm
UWB 参考点数量	4 个
UWB 目标数量	1 个
甲板状态测量精度	$\leq 0.1^\circ$
甲板状态预测精度	$\leq 1^\circ$

2.4 气动弹射子系统

气动弹射子系统的主要功能是通过快速气压释放将飞机以足够的初始速度弹出，同时要保证初始姿态稳定。其系统构成主要包括气泵推进系统、飞机弹射导轨、飞机支撑托架、减振弹簧及其他支撑构件。其中，气泵推进系统由充气泵、气压监测装置、弹射触发继电器组成，如图 20 所示。

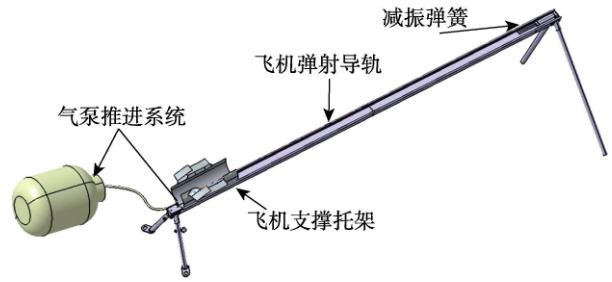


图 20 弹射机构结构设计图
Fig. 20 Structure design drawing of ejection mechanism

弹射子系统的工作过程主要包括弹射过程和复位过程。弹射过程：首先根据释放控制指令将发射信号输入至弹射触发继电器中，控制气泵泄压，气泵的气压将装载无人机的支撑托架推出，飞机支撑托架沿弹射导轨运行至末端，接触气弹簧后减速至停止，置于飞机支撑托架的无人机弹出，进入飞行状态，弹射过程完毕。复位过程：通过换向阀反向加压，将飞机支撑托架复位，气泵闭合，换向阀方向归位，复位过程完毕。气动弹射子系统主要设计参数如表 5 所示。

表 5 气动弹射子系统主要设计参数
Table 5 Main design parameters of aerodynamic ejection subsystem

指标	参数
弹射器导轨长度	4.6 m
气泵及气瓶质量	65 kg
供电电压	220 V
供电功率	700 W
气瓶原始气压	0.6 MPa
末端速度	25 m/s

气动弹射控制系统如图 21 所示，主要包括气泵的气压控制模块和弹射控制模块。气压控制模块通过监测气泵本体的压强，实现气泵的充气功能。弹射控制模块实现接收控制指令，完成气泵的瞬间泄压，实现无人机的弹射起飞。气泵控制模块采用 PID 控制气泵气压，为了克服在大偏差情况下的严重超调，使系统出现振荡现象，影响正常运行，在增量型 PID 算法基础上又采用了积分分离式 PID 调节方法，即偏差较大时取消积分作用，当偏差较小时才将积分作用投入。此外，对运算出的控制量限幅，防止积分饱和。

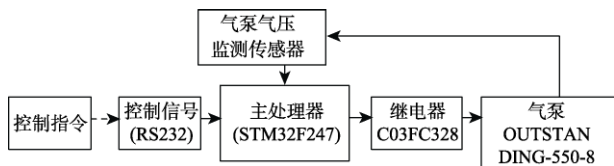


图 21 弹射器子系统硬件系统结构图

Fig. 21 Hardware system structure diagram of the catapult subsystem

另外, 无人机释放过程中所面临的主要困难在于: 母体平台存在的不规则晃动将导致被释放平台离开的瞬间具有非零姿态与速度以及由耦合效应引起的动力学异常, 这将严重影响平台的运行安全。因此, 在选择甲板静息期的发射窗口外, 无人机的起飞控制拟采取如下方案: 首先, 利用非线性可达集分析方法结合具体飞行测试实验来研究无人机能够实现稳定飞行的初始条件; 然后, 研究释放控制策略, 通过甲板预测方法估计释放的最佳甲板状态窗口, 保证释放后瞬间无人机平台运动的速度和姿态达到要求; 最后, 研究鲁棒飞行控制策略, 实现无人机从释放瞬间的非常规飞行模态向稳定飞行模态的快速、安全过渡。其中可达性分析的研究拟采取鲁棒控制的方法, 结合无人机本体的动力学模型 (依据试验飞行数据), 通过离线优化反解技术得到无人机的最大可达状态区域 (针对特定稳定飞行模态); 飞行控制则采用基于加速度反馈增强的控制策略, 该策略能够保证在原有常规飞行控制器的基础上, 通过对不确定因素的补偿, 实现对风扰等外部影响的抑制, 保证飞行安全性。

3 仿真与实验

为了充分验证本文设计的空中-水面子母无人平台系统的效果, 本文采用两种不同方式循序渐进地对该系统进行验证, 分别为半物理仿真实验以及真实水面实验。

3.1 半物理仿真实验

设计并完成了半物理仿真与测试平台的研制, 并开展了释放回收系统的半物理仿真验证。半物理仿真与测试平台方案如图 22 所示, 包括六自由度平台、回收网系统、升降台、固定翼无人

机、拦阻机构和控制系统。回收网系统设置于六自由度平台的中部位置, 主体结构为设置在这四个支柱上的回收网。在六自由度平台前方的设置有一对对称安置的升降台, 在每一个升降台上都固连着拦阻机构。回收过程概括为: 当固定翼无人机接近六自由度平台, 发出准备降落的信号, 并放下挂钩时, 升降台根据探测到的固定翼无人机的位置单独调节每一个升降台的高度, 以匹配固定翼无人机的飞行姿态。固定翼无人机的挂钩挂上拦阻索时固定翼无人机会在拦阻机构的作用下减速, 并能以一个相对较低的速度撞上回收网完成回收过程。回收网系统设置于六自由度平台中部位置, 回收网系统包含四个支柱及回收网。两组升降台设置于六自由度平台尾部, 两组升降台对称放置。升降台主要由支架和升降运动机构组成。固定翼无人机是前拉式无人机, 机身后部设有角度可调的连接钩。

在六自由度平台上设有控制系统, 且控制系统包括六自由度平台控制子系统、无人机控制子系统和通信系统等。

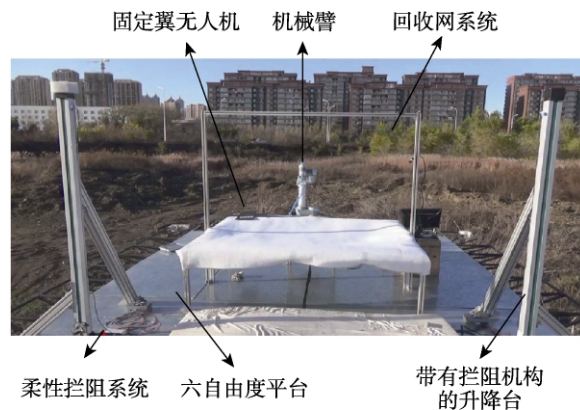


图 22 半物理仿真与测试系统

Fig. 22 Semi-physical simulation and test system

海浪是一种由海风作用而生成的不规则波浪, 长期对海浪的研究表明: 已经充分成长的海浪能用平稳随机过程的理论知识来分析。本文采用 ITTC 双参数谱作为海浪仿真谱密度函数。其公式如下^[22-23]:

$$S_{\xi}(\omega) = \frac{0.78}{\omega^5} \exp\left(-\frac{3.12}{\xi_{w/3}^2 \omega^4}\right) \quad (1)$$

其中， $\xi_{w/3}$ 表示三一平均波高， ω 表示各谐波对应的频率。最终在三级海风情况下单点长峰波海浪仿真，如图 23 所示。

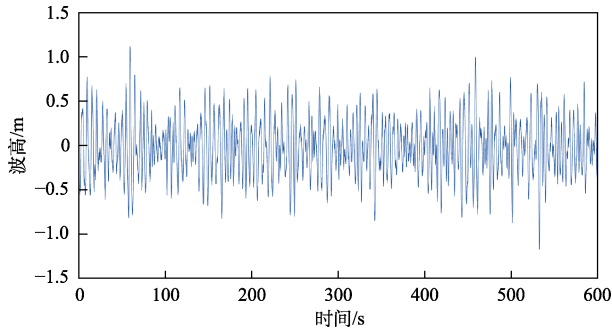
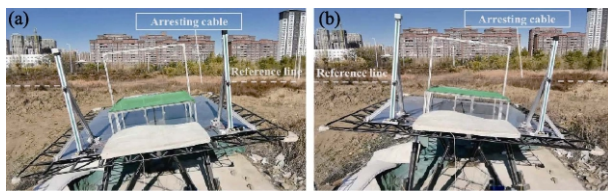


图 23 ITTC 海浪谱模拟三级海浪

Fig. 23 ITTC wave spectrum simulates three-level waves

在物理系统上进行验证试验，如图 24 所示，可以看出，在不同的无人船运动姿态下，海浪补偿机构均可以使拦阻索保持姿态稳定。



(a) 船体向左后倾斜时拦阻索姿态保持情况
(b) 船体向右前倾斜时拦阻索姿态保持情况

图 24 海浪补偿动态测试中两种典型无人船姿态情况下的拦阻索姿态保持情况

Fig. 24 Retention of the arresting rope attitude under two typical unmanned ship attitudes in the sea wave compensation dynamic test

经测量，实验所用小型固定翼无人机的重量为 1.618 kg。

回收过程中，无人机能够成功撞线并落入安全网中，进行 10 次以上拦阻测试实验，计算得到回收成功率不小于 80%。无人机回收测试过程如图 25 所示。

3.2 真实水面实验

搭建图 26 所示真实水面环境下空中-水面子母无人平台系统，系统包括拦阻机构、机械臂、机械臂滑轨、弹射器以及固定翼无人机。在 2 级风环境下，实现了重量为 1.88 kg 的固定翼无人机船载自主起降试验。

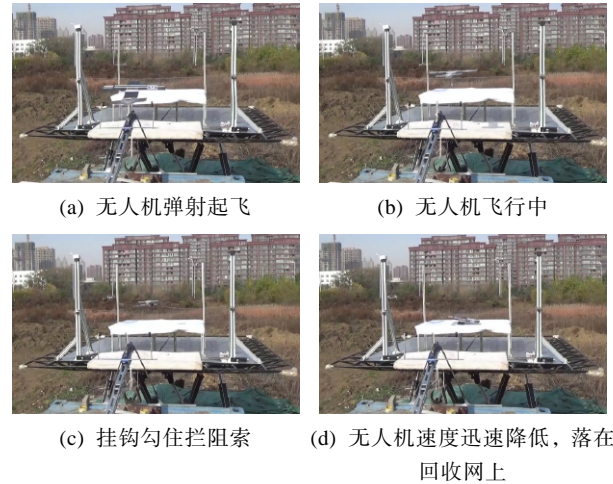


图 25 无人机自主回收实验过程

Fig. 25 Experimental process of autonomous recovery of UAV



图 26 空中-水面子母无人平台系统

Fig. 26 Air-to-surface unmanned platform system

试验全过程中无人机以及回收系统前向线速度曲线图，如图 27~29 所示。

回收全过程中，由无人艇俯仰角以及横滚角曲线图可以看出，该空中-水面子母无人平台能够完成 3 级海况下自主释放与回收。

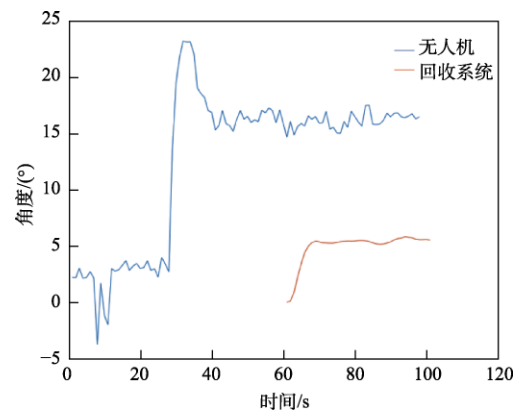


图 27 前向线速度曲线图

Fig. 27 Forward current speed curve

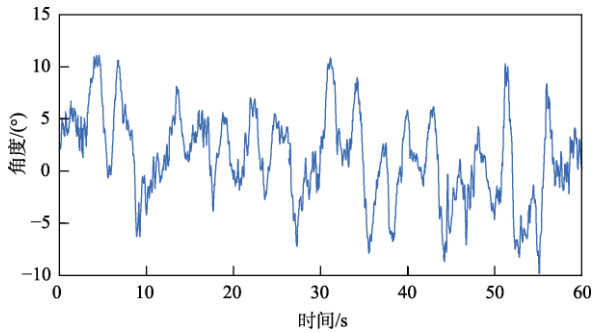


图 28 无人艇俯仰角度曲线图

Fig. 28 Curve of pitch angle of unmanned boat

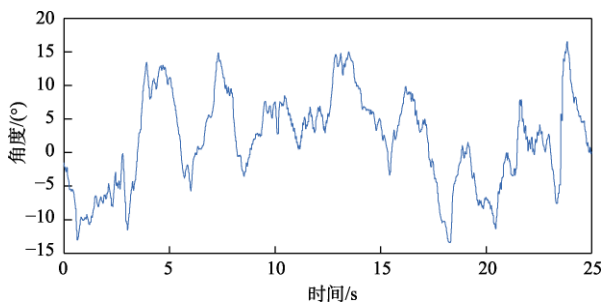


图 29 无人艇横滚角度曲线图

Fig. 29 Unmanned boat roll angle curve diagram

如图 30 所示,本文研制了一套应用于固定翼无人机在水面运动平台的自主回收技术,包括动平台自主起降引导技术、应用于自主释放回收系

统的自主控制技术和无人艇自主起降及机船协同控制技术,并且还开发了一套空中-水面子母无人系统原理样机,实现了固定翼无人机在水面无人平台的自主释放和回收。

4 结 论

本文通过借鉴国际上最新的自主回收的小型舰载固定翼无人机研究方案,提出了拦阻减摇和高精度引导相结合的固定翼无人机回收系统,可以降低甲板摇摆对回收的影响,同时提升无人机回收过程中的控制精度,并辅以甲板转运系统,可以极大地提升回收过程的自主性、安全性和适应性。在此基础上,建立了系统的物理仿真平台,通过物理实验进行了开发和验证,该实验表明本系统能够有效提高小型舰载固定翼无人机短时间内自主回收成功率。该空中-水面子母无人平台系统为异构无人系统的实际应用奠定了基础。接下来将继续深入研究非常规初始条件下的稳定飞行控制技术,提高子母无人系统的耦合性。此外,将进行更复杂环境下的应用测试,提高回收机构在强风扰、海浪等不确定因素下的回收稳定性。



图 30 实验全流程

Fig. 30 Whole process of the experiment

参 考 文 献

- [1] Robotics V O. A roadmap for US robotics: From internet to robotics-2013 edition[EB/OL]. [2013][2016-04-14]. <http://www.robotics-vo.us/node/332>.
- [2] 张旭东, 孙智伟, 吴利荣, 等. 未来有人机/无人机智能协同作战顶层概念思考[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 62-68.
- [3] DARPA. Cross domain maritime surveillance and targeting [R]. DARPA-BAA-16-01, Virginia: DARPA, 2015.
- [4] 李磊. 国外典型有人机/无人机协同作战项目发展分析[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 83-90.
- [5] 李磊, 王彤, 蒋琪. 从美军 2042 年无人系统路线图看无人系统关键技术发展动向[J]. 无人系统技术, 2018, 1(4): 79-84.
- [6] Tan L, Wu J, Yang X, et al. Research on Optimal Landing Trajectory Planning Method between an UAV and a Moving Vessel[J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 3708.
- [7] Keddie I. SideArm undergoes successful testing[J]. Jane's International Defense Review, 2017, 50: 29.
- [8] Hsieh M A, Cowley A, Keller J F, et al. Adaptive teams of autonomous aerial and ground robots for situational awareness[J]. Journal of Field Robotics, 2007, 24(11-12): 991-1014.
- [9] Robotics 2020: Multi-annual roadmap for robotics in Europe, Initial Release B, 2014[EB/OL]. [2020][2020]. http://www.eu-robotics.net/cms/upload/PDF/Multi-Annual_Roadmap_2020_Call_1_Initial_Release.pdf.
- [10] Thamke S, Ax M, Kuhnert L, et al. Control Strategies for Heterogeneous, Autonomous Robot Swarms[C]. The 1st International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications (RiTA), Gwangju, Korea, 2012.
- [11] Langerwisch M, Wittmann T, Thamke S, et al. Heterogeneous teams of unmanned ground and aerial robots for reconnaissance and surveillance-A field experiment[C]. IEEE International Symposium on Safety, Irvine, California, USA, 2013.
- [12] 杜聪聪, 李武军, 陈朝浪, 等. 固定翼无人机回收与发射系统发展综述[J]. 科技传播, 2016, 8(7): 113-115.
- [13] 裴锦华, 何成, 王陶, 等. 小型固定翼无人机绳钩回收过程动力学分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(5): 693-698.
- [14] 李凯. 小型舰载无人机弹射起飞与天钩回收技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [15] 贾新强, 林鹏, 王敏文, 等. 舰载机着舰甲板运动误差及其补偿仿真研究[J]. 航空计算技术, 2010, 40(1): 114-118.
- [16] Kosmatka J. Development of a Long-Range Small UAV for Atmospheric Monitoring[C]. AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, & Materials Conference, Waikiki, USA, 2007.
- [17] 卢伟, 马晓平, 周明, 等. 无人机绳钩回收系统的动力学特性仿真分析[J]. 航空学报, 2015, 36(10): 3295-3304.
- [18] Dennis B D. Methods and apparatuses for capturing and recovering unmanned aircraft, including a cleat for capturing aircraft on a line[P]. United States:US7059564, 2006-06-13.
- [19] Neupert J, Mahl T, Haessig B, et al. A heave compensation approach for offshore cranes[C]. American Control Conference, Washington, USA, 2008.
- [20] 方洋旺, 邓天博, 符文星. 智能制导律研究综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(6): 36-42.
- [21] 白俊强, 昌敏, 汪辉, 等. 飞机导航系统中多套惯导融合方案仿真分析研究[J]. 无人系统技术, 2020, 3(6): 79-91.
- [22] 曾光奇, 胡均安, 王东. 模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
- [23] 金鸿章. 长峰波随机海浪的实时仿真和频谱分析[J]. 船舶工程, 1987(1): 24-30.

作者简介:



张洺溪 (1993-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为指挥控制系统、控制与决策。本文通信作者。



谷 丰 (1982-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为移动机器人系统、多机器人协作。



何玉庆 (1980-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为移动机器人系统、机器人控制方法。



狄春雷 (1989-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为无人机系统研发及局部导航定位。



褚玲玲 (1985-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为适应极端条件的新概念无人机设计与控制。



聂虹宇 (1991-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为移动机器人的导航、控制与规划。



征稿启事

《无人系统技术》期刊

《无人系统技术》期刊是由中国航天科工集团有限公司主管，北京海鹰科技情报研究所主办，中国无人系统产业联盟（筹）、西北工业大学无人系统发展战略研究中心、西北工业大学无人系统技术研究院联合协办的学术期刊。现诚挚地向无人系统技术研究领域的专家学者、学术带头人以及致力于无人系统理论与技术创新研究的科技工作者约稿。

◆ 约稿方向

稿件内容以综述、研究论文、技术报告、专题研讨和科技评述等形式为主，广泛报道无人空中系统、无人地面系统、无人水面水下系统、智能机器人等研究领域的理论研究成果、技术创新、学术见解和经验总结。主要包括无人系统平台技术、自动控制技术、信息技术以及人工智能、通信、传感器等技术在无人系统领域的新应用。同时，也包括无人系统自主技术、协同技术、跨域同步技术、智能无人系统伦理及其与有人系统的关系等。

◆ 投稿方式

通过期刊采编系统进行投稿，网址：<http://umst.cbpt.cnki.net/>，或直接搜索“无人系统技术”。

◆ 投稿要求

1. 本刊选录稿件主要视其是否有创新点及其价值大小，并综合考虑：立题的科学 / 工程意义；对科研进展的了解和引用；方法或其应用的创新性；方法和论证的科学性；结论 / 结果的合理可信性和写作质量。
2. 投稿时须提交电子版“保密审查证明”，稿件正式录用后请将“保密审查证明”“版权转让协议”原件邮寄至：北京 7254 信箱 4 分箱《无人系统技术》编辑部，邮编：100074，电话：010-68191488。

◆ 写作要求

1. 来稿应含中英文题目、中英文摘要（说明研究目的、创新试验方法、研究成果和最终结论等，重点是方法创新和成果结论。中英文摘要对应，英文摘要要在 250 个实词左右）、关键词（5 ~ 8 个）。引言应说明课题的背景，引述该领域的国内外同行已经取得的进展，以说明本文的选题意义和创新点所在。
2. 量和单位应符合国家规定。外文字符要分清大小写、正斜体，上下角字符的位置高低应区别明显。图、表应提供中英文图题、表题。
3. 参考文献引用应遵循“最新、关键、必要和亲自阅读过”的原则；在正文中顺次引述；数量以不少于 20 篇为宜，未公开发表的资料一般不宜引用。
4. 需提供全部作者简介，内容包括：姓名、出生年、性别、学位、职称、研究方向、照片等。

◆ 关于稿酬

暂不收取版面费、审稿费，稿件一经录用，将按照字数和文章质量情况，向作者一次性支付稿酬。

无人系统技术

WUREN XITONG JISHU

(双月刊 2018年创刊)

第4卷第4期 2021年7月

UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY

(Bimonthly)

(Started in 2018)

Vol.4 No.4 July 2021

主管单位: 中国航天科工集团有限公司

主办单位: 北京海鹰科技情报研究所

协办单位: 中国无人系统产业联盟(筹)

西北工业大学无人系统发展战略研究中心

西北工业大学无人系统技术研究院

主 编: 张冬青

副 主 编: 蔡顺才 孙柏原 李东光 陈少春

执行主编: 王一琳

编辑出版: 《无人系统技术》编辑部

地 址: 北京7254信箱4分箱(100074)

电 话: 010-68191488(编辑部)

010-68375084(发行部)

邮 箱: chinauas310@163.com

网 址: <http://umst.cbpt.cnki.net>

国内发行: 北京海鹰科技情报研究所

印刷单位: 北京博海升彩色印刷有限公司

Administrated by: China Aerospace Science & Industry Corporation Limited

Sponsored by: Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute

Co-organized by: Association for Unmanned Vehicle Systems of China

Research Center for Unmanned System Strategy

Development, NWPU

Unmanned System Research Institute, NWPU

Editor-in-Chief: ZHANG Dongqing

Associate Editor: CAI Shuncaï SUN Baiyuan LI Dongguang CHEN Shaochun

Executive Editor: WANG Yilin

Edited & Published by: Editorial Office of Unmanned Systems Technology

Add: P.O. Box 7254-4, Beijing 100074, China

Tel: (8610) 68191488 (Editorial office)

(8610) 68375084 (Circulation office)

E-mail: chinauas310@163.com

Website: <http://umst.cbpt.cnki.net>

Distributed by: Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute

Printed by: Beijing BOHS Colour Printing Co., Ltd.

本期责任编辑: 籍云方

ISSN 2096-5915
CN 10-1565/TJ

国内定价: 30元/期