



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

本期专栏 车联网与群体智能专栏

专栏主编 田大新



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



2021.1
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 Shunca	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1期 2021年1月

目次

车联网与群体智能专栏

区块链在车联网中的应用综述	01
郎平, 田大新, 林椿昞	
车联网环境下车辆协同高精度定位研究进展	08
闵海根, 宋晓鹏, 程超轶	
交通场景行人穿越检测方法进展研究	15
房建武, 贾皓, 朱晨, 王贺, 薛建儒	
基于松弛序列凸优化的轮式机器人协同轨迹规划	24
邓云山, 夏元清, 孙中奇	
节点缓存受限场景下车载自组织网络拥堵特性研究	33
邵艳敏, 张佩瑜, 周建山, 田大新	
信号时序逻辑约束下基于终点回溯的高效规划	44
田戴莹, 方浩, 杨庆凯	
无人车用智能导航技术国际态势分析	51
薛连莉, 翟峻仪, 李一鸣	

其他

面向典型任务的有人/无人机协同效能评估	62
尹昊, 侯婷婷, 李东光	
陆战分队空地一体无人作战系统装备体系构想研究	71
龚旻, 卜昭鹏, 陈梅, 王庆彪, 王鸿	
基于数据分发服务的无人机任务载荷综合仿真平台研究	79
杜越洋, 赵盾, 闫智超	

随着汽车技术的迅猛发展, 未来汽车将向网联化、智能化发展, 各种智能系统和通信技术的搭载给未来的交通带来更多的可能性。车联网已经被认为是未来智能交通的核心技术之一, 其发展已经为我们的生活提供了极大的便利。在此背景下, 本刊特邀请北京航空航天大学田大新教授担任专栏主编, 推出“车联网与群体智能”专栏。专栏收录文章7篇, 内容涉及系统综述以及车辆协同高精度定位、交通场景行人穿越检测、车载自组织网络拥堵特性等研究。希望借助本次专栏, 深入探讨车联网与群体智能的理论方法、关键技术和应用前景, 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, 推动车联网与群体智能技术进一步发展。



Unmanned Systems Technology

Vol.4 No.1 2021

Contents

Internet of Vehicles and Swarm Intelligence Column

- Review of Blockchain in Internet of Vehicles LANG Ping, TIAN Daxin, LIN Chunmian (01)
- Research on Development of Vehicle Collaborative Localization in Internet of Vehicles Environment
..... MIN Haigen, SONG Xiaopeng, CHENG Chaoyi (08)
- Research on Pedestrian Crossing Detection in Traffic Scenes
.....FANG Jianwu, JIA Hao, ZHU Chen, WANG He, XUE Jianru (15)
- Coordination Trajectory Planning of Wheeled Robot Using Relaxation Sequential Convex Programming
.....DENG Yunshan, XIA Yuanqing, SUN Zhongqi (24)
- Research on Congestion Characteristics of Vehicular Ad Hoc Networks under Limited Node Cache
.....SHAO Yanmin, ZHANG Peiyu, ZHOU Jianshan, TIAN Daxin (33)
- Efficient Planning based on Destination Backtracking under Signal Temporal Logic Constraints
.....TIAN Daiying, FANG Hao, YANG Qingkai (44)
- International Situation Analysis of Intelligent Navigation Technology for Unmanned Vehicles
.....XUE Lianli, ZHAI Junyi, LI Yiming (51)

Others

- Cooperative Effectiveness Evaluation of MAV/UAV for Typical Missions
..... YIN Hao, HOU Tingting, LI Dongguang (62)
- Construction Strategy Study on Air-ground Unmanned Operation System for Land Combat Units
..... GONG Min, BU Zhaopeng, CHEN Mei, WANG Qingbiao, WANG Hong (71)
- Research on DDS-based Integrated Simulation Platform for UAV Mission Payload
..... DU Yueyang, ZHAO Dun, YAN Zhichao (79)

[引用格式] 郎平, 田大新, 林椿昞. 区块链在车联网中的应用综述[J]. 无人系统技术, 2021, 4(1): 01-07.

区块链在车联网中的应用综述

郎平, 田大新, 林椿昞

(北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 102206)

摘要: 针对当前车联网系统面临的网络安全与可信以及数据大规模同步共享挑战, 提出利用区块链技术提升车联网系统的安全性水平与协同共享能力。首先从概念特征与技术架构两个层面对区块链技术进行了整体概述, 并结合区块链去中心化存储、共识安全防护、数据不可篡改等特点, 探讨了区块链与边缘计算协同应用的互补优势与研究现状。进而从协作同步、安全信任、数据共享三个角度分析了区块链在车联网系统中的应用方向并具体介绍了区块链在车联网数据、模型等元素共享方面的应用研究内容。最后从车联网系统中的车和路两个角度指出了未来区块链技术将推动车联网由单车智能向群体智能、由单点交通控制向区域联动控制演进发展。区块链与车联网的结合应用有效提升了车联网的安全性水平与协同共享能力, 将进一步推动汽车、交通与通信等行业深度融合, 促进车联网技术高速发展。

关键词: 智能交通; 区块链; 边缘计算; 车联网; 发展趋势

中图分类号: U491.2 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)01-01-07

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.1.001

Review of Blockchain in Internet of Vehicles

LANG Ping, TIAN Daxin, LIN Chunmian

(School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 102206, China)

Abstract: In view of the challenges of security, trustworthiness and data sharing faced by Internet of Vehicles (IoV) systems, blockchain technology is introduced to enhance the security and collaborative sharing capability of IoV. The overview of blockchain technology is given from two aspects of features and technical architecture. Combining the features of decentralized storage, consensus-based security and data immutability of blockchain, the complementary advantages and research status of the cooperative application of blockchain and edge computing are discussed. Then, the application direction and current researches of blockchain in IoV system are analyzed from the perspective of synchronization, security and data sharing. Finally, the development trend of blockchain in IoV is pointed out that the future blockchain technology will promote the evolution and development of IoV from single vehicle intelligence to group intelligence and from single point traffic control to regional linkage control from the perspectives of vehicles and roads. The integrated application of blockchain and IoV enhances the security and data sharing of IoV, which will further promote the deep integration of automobile, transportation and communication industries and accelerate the development of IoV technology.

Key words: Intelligent Transportation System; Blockchain; Edge Computing; Internet of Vehicles; Development Trend

收稿日期: 2020-11-03; 修回日期: 2020-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(61822101, 62061130221); 北京市自然科学基金(L191001, 4181002)

1 引言

伴随着新一代信息通信技术的演进发展，智能化的汽车与道路正成为汽车、交通等行业关注与研究的重点。而车与路的智能化都离不开网络通信的连接，这使得车联网系统成为融合交通、汽车、通信等多个产业发展重点的关键技术领域^[1]。车联网通过建立车-车、车-路、车-人以及车-云间的高效稳定连接，能够实现一系列提升交通安全、提高交通效率的典型应用场景，并有利于促进自动驾驶的进一步落地^[2]。但在大规模部署环境下，当前的车联网系统仍然面临网络的安全与可信以及数据大范围同步共享所带来的新挑战。区块链技术作为一种新兴的去中心化的数据共享与安全防护技术，提供了在不可信网络中进行信息传递与交换的可信机制^[3]，恰好能够满足车联网系统在安全和协作方面的新需求。

2019年10月24日，中共中央政治局就区块链技术发展现状和趋势进行第十八次集体学习。中共中央总书记习近平在主持学习时强调：“区块链技术的集成应用在新的技术革新和产业变革中起着重要作用。我们要把区块链作为核心技术自主创新的重要突破口，明确主攻方向，加大投入力度，着力攻克一批关键核心技术，加快推动区块链技术和产业创新发展。”我国在2019年印发的《交通强国建设纲要》中也明确提出“推动大数据、互联网、人工智能、区块链、超级计算等新技术与交通行业深度融合”的发展重点，将区块链作为未来车联网跨行业发展的重要技术。因此，将区块链技术应用于车联网系统中，符合国家的战略与发展需求，将有力提升车联网的安全性水平与协同共享能力，提供车联网技术发展的新动能。

针对区块链技术在车联网领域的应用问题，本文首先介绍了区块链的基本概念并给出了其具体的技术架构；其次基于区块链技术的基础资源的需求，归纳并总结了区块链与边缘计算协同应用框架；然后在协同应用的基础上综述了区块链在车联网中应用的特点与当前研究进展；最后根

据应用研究现状对该领域的未来发展趋势进行了分析与展望。

2 区块链技术概述

2.1 区块链的概念与特征

2009年，随着比特币^[4]这种加密数字货币的出现，区块链这项在密码学等传统技术上发展出的去中心化记账技术得到了前所未有的关注。目前来看，区块链是一种由多方共同维护，使用密码学保证传输和访问安全，能够实现数据一致存储、难以篡改的记账技术，典型的区块链以块-链结构存储数据^[3]，图1以比特币为例给出了区块链的具体结构。在区块链系统这个“大账本”中，实时产生的数据被抽象为一条条交易在节点间传输交换，为防止数据被随意篡改，当交易信息到达一定数量时，新数据将被某个节点存储到区块当中，并采用基于密码学算法的链式连接方法将不同时间产生的区块连成一条链，形成我们所说的区块链。为防范恶意节点的攻击，负责生成区块的节点将由系统按照事先约定好的规则即共识机制选择，同时，其生成的区块数据一经其他节点的确认上链，就只可进行查询访问，难以修改和删除，保证了区块链数据的难以篡改。

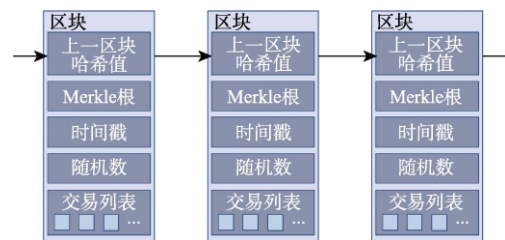


图1 比特币的区块链结构

Fig. 1 Bitcoin's blockchain structure

区块链依靠其独特的信任机制，构建了去中心化的共享数据库，与传统数据库相比，区块链技术具有以下特征^[3,5]：

- 去中心化共享存储：不同于传统分布式系统将数据分散存储在不同节点上，区块链技术在系统中每个节点均存储了完整的块-链数据，在没有中心节点的情况

下实现了数据在整个网络的共享。

- 基于共识的安全防护：区块链的共识机制保证了系统中每个区块都由全网络选出的可信节点生成，除非攻击者控制了系统中大多数节点，否则恶意节点就难以破坏系统的安全性。
- 数据不可篡改：区块链取消了传统数据库中修改和删除的操作，而是基于密码学算法，按时间顺序单项推进数据链，保证了链上数据难以篡改，同时也实现了历史数据的完整可追溯。

2.2 区块链技术架构

区块链作为一类在不可信环境中建立信任的新型计算范式和协作模式的统称，包含着多种具体的技术实现方式。为了能够更清晰地理解区块链技术的整体架构，本文结合多项已有研究^[3, 5-6]，给出如图 2 所示的区块链分层架构。

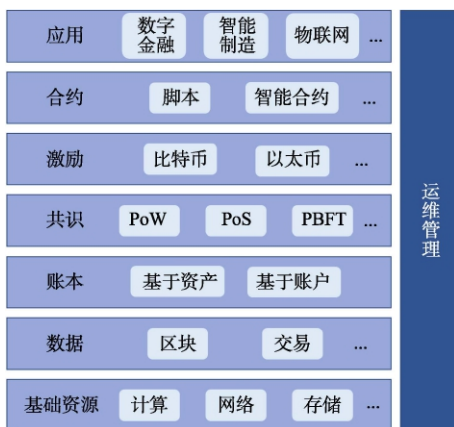


图 2 区块链技术架构

Fig. 2 Architecture of blockchain

基础资源层：基础资源层主要包括计算资源、网络资源、存储资源等区块链系统运行所必需的软硬件基础设施，以此为上层应用提供基本支撑与保障。

数据层：数据层主要用来描述区块链中数据的具体存在形式，应用产生的实时数据将被压缩抽象为交易信息。多条交易信息将通过区块链的多方共识验证打包到区块当中，每个区块都将包含其链上前一个区块的信息。

账本层：账本层根据基于资产或基于账户的

数据记录方式对区块数据进行组织管理。典型的区块链数据账本采用时间顺序将区块连接到一条链上，并以此保证数据的不可篡改与可追溯性。

共识层：共识层保证区块链系统中各节点数据记录的一致性，利用工作量证明 (PoW, Proof of Work)^[4]、股权证明 (PoS, Proof of Stake)^[7]、授权股权证明 (DPoS, Delegated PoS)^[5]和实用拜占庭容错 (PBFT, Practical Byzantine Fault Tolerance)^[8]等机制同步各区块链节点的账本信息，实现区块链的数据透明共享特性，表 1 给出了区块链典型共识算法对比^[3]。

表 1 区块链典型共识算法对比
Table 1 Comparison of typical consensus algorithms in blockchain

共识算法	交易延时	吞吐量	能耗	安全阈值	扩展性
PoW	高	低	高	恶意节点算力不超过 1/2	高
PoS	低	高	低	恶意节点权益不超过 1/2	高
DPoS	低	高	低	恶意节点权益不超过 1/2	高
PBFT	极低	高	低	恶意节点数不超过 1/3	低

激励层：激励层是维持区块链稳定运行的一种经济平衡手段，系统采用发行比特币、以太坊等经济激励的方式，为参与运算节点提供酬劳和奖励，保证系统以一种去中心化的方式持续运行。

合约层：合约层利用脚本和智能合约等技术为区块链系统带来可编程特性。合约可以以条件触发的方式自动执行，在无人为干预的情况下实现数字资产的处理。

应用层：应用层包含数字金融、物联网、智能制造等国民经济的多个领域，是区块链推动产业创新发展的重要体现，本文便是聚焦于区块链在车联网系统中的应用，探究区块链对汽车、交通、通信等行业的推动作用。

运维管理层：运维管理层贯穿整个区块链架构，服务于上述的每个层级，良好的运维管理理念与模式将有助于提高整个区块链系统的可用性。

3 区块链与边缘计算协同应用

区块链技术专注于构建一种能够有效防范安全和隐私风险的去中心化数据共享存储系统，其通过全网节点的共识与备份存储来保证数据的安全添加与完整保存，但这种全网节点的大规模高频交互需求对底层的基础资源提出了更大的挑战。首先，区块链的不可篡改与可追溯特性要求各节点存储完整的链上数据，随着区块的不断生成，节点对存储空间的需求将持续增加。其次，节点对区块的共识验证过程需要实时交互大量数据，要求网络必须具有较高的数据吞吐能力。同时，各类数据的实时性需求要求节点具有强大的计算能力以快速完成交易处理与区块验证工作。因此，区块链系统的部署应用对底层存储、计算与网络资源具有较高要求，传统的车联网基础设施难以满足其需求。

边缘计算技术作为一种新型的计算范式，将传统网络中心的计算与存储资源迁移到了网络边缘上，就近为终端应用提供高带宽、低延迟的计算和存储服务^[9]。但由于网络边缘系统的异构性与复杂性，边缘计算在系统安全和隐私方面面临着多项挑战。首先，边缘节点的分布式部署与异构特性使得其更容易遭受恶意行为的攻击，影响服务的安全与稳定。其次，边缘网络采取分布式的方式处理和存储数据，大规模网络下数据的完整性与一致性难以保证。而且，边缘计算中终端用户需要将自身应用的代码与数据卸载到边缘节点来执行处理，这也就带来了更大的安全和隐私保护挑战。因此，当前的边缘计算技术能够提供较强的底层基础资源，但需要新的安全机制来在不影响网络性能的情况下提升其安全性水平。

不难看出，将区块链与边缘计算进行协同应用，恰好能够实现二者的优势互补，有助于为区块链系统提供充足的计算、存储与网络资源，从而保证边缘节点数据的安全和一致性，并提升整个系统的隐私保护能力。这里，我们以该领域典型研究为例，探讨区块链与边缘计算协同应用方

向，相关研究情况对比如表2所示。

在系统架构层面，Yang等人^[5]确定了区块链和边缘计算协同应用的几个重要方面，即动机、框架、功能和挑战。在其中基于现有的研究，总结了区块链与边缘计算的协同应用典型框架，反映了这一协同系统的基本思想和机制，并详细讨论了该协同应用系统如何满足网络、存储和计算的要求。但由于已有的每个架构都有其独特的设计思路与应用场景，所以这一典型框架难以涵盖其所提到的所有架构。

表2 区块链与边缘计算协同应用典型研究
Table 2 Typical studies on cooperative application of blockchain and edge computing

文献	研究类型	目标	创新贡献
[5]	架构设计	集成区块链与边缘计算系统	总结了区块链与边缘计算技术的集成架构，从网络、存储、计算三个方面分析了区块链与边缘计算集成研究现状与挑战
[10]	性能优化	在区块链与边缘计算协同应用中同时保证二者的性能	考虑了时变的无线链路和边缘服务器的计算能力，将频谱分配、区块的大小和每个生产者的生产区块数量制定为一个联合优化问题并求解
[11]	计算卸载应用	利用区块链信任建立设备间中继协作卸载机制	联合优化卸载决策、功率分配、区块大小和区块间隔，实现了安全高效的协作式计算卸载

在性能优化层面，为了提高协同应用系统下区块链系统的吞吐量和边缘计算系统中用户的服务质量，Guo等人^[10]考虑了时变的无线链路和边缘服务器的计算能力，将频谱分配、区块的大小和每个生产者的生产区块数量制定为一个联合优化问题。随后基于深度强化学习技术提出了这一问题的具体求解算法。

具体到应用系统中的边缘计算卸载问题上，Feng等人^[11]利用区块链系统来解决边缘节点间交互造成的数据安全和隐私问题，提出了针对区块链与边缘计算协同应用系统的协作式计算卸载和资源分配框架。在该框架中，通过联合优化卸载决策、功率分配、区块大小和区块间隔，最大化边缘计算系统的计算速率和区块链系统的交易

吞吐量, 实现了安全高效的协作式计算卸载。

从这些典型研究中可以看出, 结合了区块链与边缘计算技术的协同应用框架已成为提升边缘计算系统安全性与数据共享能力的重要方案, 有力促进了边缘计算技术的创新应用。同时, 由于传统车联网系统的基础设施难以满足区块链系统的应用要求, 区块链与边缘计算的协同应用便成为区块链在车联网领域应用的重要抓手, 能够进一步促进车联网系统的创新与变革。

4 区块链在车联网领域应用

区块链与边缘计算协同应用系统借助区块链与边缘计算的各自优势, 在较为充足的基础资源下提供了安全高效的数据同步与共享机制。同时, 边缘协同计算服务已成为车联网系统降低终端部署成本、提升系统处理能力与效率的关键^[12]。因此, 将区块链与边缘计算协同应用到车联网领域便顺理成章地成为提升车联网系统安全性水平与协同共享能力、促进车联网产业持续稳步发展的新动能。

结合区块链与边缘计算协同应用的特点, 不难发现区块链在车联网领域的应用主要体现为三个方面。一是协作与同步: 借助叠加在边缘节点上的区块链服务, 车联网中不同边缘节点之间的信息孤岛将被连接起来, 形成异构节点的跨网合作, 为车辆提供无缝服务。二是安全与信任: 区块链的完整性保证和防篡改特性能够为车联网系统建立数据安全信任机制, 形成去中心化的身份认证, 防范恶意攻击, 实现数据安全传输。三是数据共享: 区块链可以保证多个参与者数据的一致性, 在边缘计算的组织生态中形成互联互通, 在车联网系统中实现可信传输、数据同步和资源共享, 典型的区块链在车联网中应用场景如图 3 所示。

目前, 区块链在车联网系统的应用还主要集中在理论研究层面, 因此我们同样以该领域的典型研究为例, 探讨区块链在车联网领域的应用情况, 相关研究情况对比如表 3 所示。

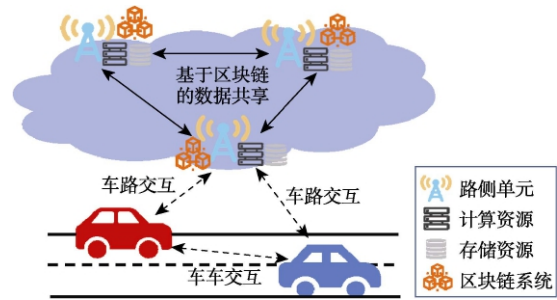


图 3 区块链在车联网中典型应用场景

Fig. 3 Typical scenario of blockchain in IoV system

表 3 区块链在车联网领域应用典型研究

Table 3 Typical studies on vehicular blockchain system

文献	研究类型	目标	创新贡献
[13]	车联网数据共享	构建车联网数据共享可信环境	提出了一种基于信用的数据共享方案, 并利用三权主观逻辑模型对车辆的信用进行精确管理, 基于车联网边缘计算网络实现了高效率和高安全性的数据共享
[14]	自动驾驶学习模型共享	在保护数据隐私的前提下提升自动驾驶学习准确率	提出了基于区块链的针对网联自动驾驶车辆的群体式学习框架, 在避免了大量的数据传输的同时应用区块链来保障模型共享过程中的安全和隐私, 提高了自动驾驶车辆的模型训练效率
[15]	车辆定位误差共享	在保证数据安全前提下实现车辆协作式定位	提出了基于区块链的车辆 GPS 定位误差演化共享框架来提高车辆定位精度, 提升了车联网定位纠错和数据共享方面的准确性与安全性
[16]	自动驾驶学习模型共享	在自动驾驶目标识别中提升分布式深度学习的可靠性	提出了基于区块链的模型共享方法来提高自动驾驶系统目标检测的跨域适应性能, 提高了自动驾驶车辆的目标检测能力, 降低其大规模部署成本

针对车联网的数据共享问题, Kang 等人^[13]结合联盟区块链和智能合约技术, 实现了车辆边缘网络的安全数据存储和共享, 有效防止了未经授权的数据共享问题。此外, 他们还提出了一种基于信用的数据共享方案, 并利用三权主观逻辑模型对车辆的信用进行精确管理, 在车辆边缘计算网络中实现了高效率和高安全性的数据共享。

为实现动态无线环境中高效和安全的学习, Fu 等人^[14]提出了一个基于区块链的针对网联自动驾驶车辆的群体式学习框架。该框架使各个分布式的自动驾驶车辆能够在本地训练机器学习模型, 并利用边缘计算节点上传到区块链网络, 以

实现所有网联车辆的“群体智能”，在避免了大量的数据传输的同时应用区块链来保障模型共享过程中的安全和隐私，提高了自动驾驶车辆的模型训练效率。

考虑网联车辆的定位校准问题，Li 等人^[15]从保证合作者和数据的安全性与可信度出发，提出了一种基于区块链的车辆 GPS 定位误差演化共享框架来提高车辆定位精度。通过对 GPS 误差的分析，在传感器丰富的车辆和普通车辆之间共享特定时间与地点的定位误差演化来实现协作。并通过运行在边缘服务器上的基于深度神经网络的预测算法获得定位误差演化。他们还设计了相应的智能合约，以自动高效地执行存储和共享任务，并解决时间尺度的不一致问题，有效提升了车联网定位纠错和数据共享方面的准确性与安全性。

进一步将区块链与自动驾驶应用结合，Jiang 等人^[16]提出了一种基于区块链的模型共享方法来提高自动驾驶系统目标检测的跨域适应性能。基于区块链和边缘计算技术，跨节点训练了一个跨域自适应的目标检测模型，可以显著降低不同对象类别的领域差异。此外，他们还开发了智能合约来高效完成数据存储和模型共享任务，并通过区块链共识保证了模型共享的可靠性。这种基于区块链的跨域模型共享方法将有助于提高自动驾驶车辆的目标检测能力，降低其大规模部署成本。

可见，结合车联网的边缘计算技术，基于区块链的安全同步与共享机制正广泛应用于车联网系统数据、模型等目标元素的安全共享研究中，用以提高车联网大规模部署下的系统协同能力与安全性水平。

5 未来发展方向

从第4章所介绍的区块链在车联网领域的应用情况可以看出，当前区块链在车联网领域的应用主要集中在理论研究上，较为纯粹地基于假设条件下的推导与仿真来验证其应用的有效性，还

处于一种纸上谈兵的阶段，缺乏系统级的实现与部署，难以支撑应用的落地实践。所以，实际应用的部署落地将成为未来区块链技术在车联网领域布局发展的关键技术挑战，也将是区块链技术与智能交通建设融合创新发展的重要方向。而在车联网乃至智能交通系统中，车与路均是促进应用创新与落地部署的核心元素，因此，我们从车联网系统中的车和路两个角度来探讨未来区块链技术在车联网领域应用的发展方向。

从车辆的角度来看，将区块链应用到车联网当中，有助于进一步整合边缘计算技术，为智能网联汽车提供一种安全、协同的计算模式。在该模式下，车辆为了解决自身计算和存储资源有限的问题，可以利用区块链技术所提供的安全共享与同步机制将本地的存储和计算任务迁移到其他邻居车辆或高性能的路侧服务节点上，实现本地-邻居-路侧多节点协同计算。同时，为了防范系统中恶意节点的攻击，各边缘节点上运行的区块链系统可以在该协同体系内建立起有效的共识与信任机制，保障协同计算的安全与可信水平。未来这种协同化的计算架构将促进车联网系统由当前的单车智能化迈向群体智能化，从而有效降低智能车辆部署成本，提高交通运行效率。

从路侧基础设施的角度来看，借助区块链和边缘计算技术，将为交通系统提供一种安全可靠的区域联动控制架构。基于路侧到云端的分层计算模式，路侧系统可以利用区块链技术将具有容时性和密集数据量计算的任务上传云端执行，并将具有低延时、高可靠性需求的控制优化任务的数据同步到区域内多个边缘节点进行协同优化计算。在这一区域联动控制架构中，区块链将利用其数据同步与不可篡改特性保证数据的一致性，建立起数据安全共享机制，并在此基础上基于全局化知识对车路行为进行协同化决策，实现区域内多个路口的合作与同步，从而使路侧交通控制单元能够快速响应区域交通流的负荷，推动交通系统由当前单点孤立的交通控制向区域联动控制转变。

6 结束语

车联网系统利用新一代信息通信技术促进了交通系统中人-车-路的进一步耦合联动, 助力交通系统从人-车-路协调转为多尺度协同化发展。区块链作为在不可信环境下建立信任的新兴计算范式与协作模式, 能够为交通系统这一复杂的耦合联动体系提供有效的数据共享、协作同步与安全可信保障。在全球都在加快布局区块链技术发展的大背景下, 推动区块链在车联网这一交通强国与新基建重点领域的应用, 将有利于进一步促进汽车、交通与通信等行业的跨行业发展, 提升城市管理的智能化、精准化水平, 加速实现“人民满意、保障有力、世界前列”的交通强国建设总目标。

参考文献

- [1] Tian D, Zhou J, Wang Y, et al. Channel access optimization with adaptive congestion pricing for cognitive vehicular networks: an evolutionary game approach[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2020, 19(4): 803-820.
- [2] IMT-2020(5G)推进组. C-V2X 白皮书[R/OL]. 2018-06-22 [2020-07-09]. <http://www.imt-2020.cn/zh/documents/download/82>.
- [3] 中国信息通信研究院. 可信区块链推进计划. 区块链白皮书(2018年)[R/OL]. 2018-09-05[2020-12-18]. http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201809/t20180905_184515.htm.
- [4] Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system[R/OL]. 2008[2020]. <https://bitcoin.org/>.
- [5] Yang R, Yu F R, Si P, et al. Integrated blockchain and edge computing systems: A survey, some research issues and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(2): 1508-1532.
- [6] Croman K, Decker C, Eyal I, et al. On scaling decentralized blockchains[C]. *International Conference on Financial Cryptography and Data Security*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [7] Buterin V. A next-generation smart contract and decentralized application platform[R/OL]. 2014[2020]. <https://ethereum.org/en/whitepaper/>.
- [8] Cachin C. Architecture of the hyperledger blockchain fabric[R/OL]. 2016[2020], https://www.zurich.ibm.com/dcl/papers/cachin_dcl.pdf.
- [9] ETSI. Multi-access edge computing (MEC)[EB/OL]. [2020-07-10]. <https://www.etsi.org/technologies/multi-access-edge-computing>.
- [10] Guo F, Yu F R, Zhang H, et al. Adaptive resource allocation in future wireless networks with blockchain and mobile edge computing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 19(3): 1689-1703.
- [11] Feng J, Yu F R, Pei Q, et al. Cooperative computation offloading and resource allocation for blockchain-enabled mobile edge computing: A deep reinforcement learning approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(7): 6214-6228.
- [12] Wang Y, Lang P, Tian D, et al. A game-based computation offloading method in vehicular multi-access edge computing networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(6): 4987-4996.
- [13] Kang J, Yu R, Huang X, et al. Blockchain for secure and efficient data sharing in vehicular edge computing and networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(3): 4660-4670.
- [14] Fu Y, Yu F R, Li C, et al. Vehicular blockchain-based collective learning for connected and autonomous vehicles[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 197-203.
- [15] Li C, Fu Y, Yu F R, et al. Vehicle position correction: A vehicular blockchain networks-based GPS error sharing framework[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020: 1-15.
- [16] Jiang X, Yu F R, Song T, et al. Blockchain-enabled cross-domain object detection for autonomous driving: A model sharing approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(5): 3681-3692.

作者简介:



郎平(1993-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为车联网与边缘计算。



田大新(1980-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能交通、车联网、边缘计算与群体智能。本文通讯作者。



林椿昀(1993-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为自动驾驶与人工智能。

[引用格式] 闵海根, 宋晓鹏, 程超轶. 车联网环境下车辆协同高精度定位研究进展[J]. 无人系统技术, 2021, 4(1): 08-14.

车联网环境下车辆协同高精度定位研究进展

闵海根^{1,2}, 宋晓鹏³, 程超轶¹

(1. 长安大学信息工程学院, 西安 710064; 2. “车联网”教育部-中国移动联合实验室, 西安 710021;
3. 浙江省交通规划设计研究院有限公司, 杭州 310017)

摘要: 车辆位置信息是许多智能交通应用的基础, 如车辆导航、路径规划和车辆编队等。现有研究中融合单车车载多源传感器的定位方法无法有效解决城市峡谷、隧道和立交桥等卫星信号不可用条件下的车辆定位问题。围绕车辆高精度定位进行了综合评述, 主要深入研究分析了车辆协同定位技术。首先分析了单车自主定位的关键技术及其主要应用场景; 然后对车辆协同定位框架进行了研究, 并对目标关联算法和多源数据融合算法进行了分析; 最后展望了车联网环境下车辆协同定位的发展趋势。研究表明, 高精度高可靠定位研究还存在许多关键技术未突破, 车联网环境下的车辆协同定位利用无线通信实现多源定位传感器信息动态交互, 为智能汽车定位系统研发提供新思路。

关键词: 车联网; 自动驾驶; 协同定位; 目标关联; 数据融合

中图分类号: TP274+.2 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)01-08-07

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.1.002

Research on Development of Vehicle Collaborative Localization in Internet of Vehicles Environment

MIN Haigen^{1,2}, SONG Xiaopeng³, CHENG Chaoyi¹

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. The Joint Laboratory for Internet of Vehicles, Ministry of Education-China Mobile Communications Corporation, Xi'an 710021, China;
3. Zhejiang Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd, Hangzhou 310017, China)

Abstract: Vehicle localization is the basis of many intelligent traffic applications, such as vehicle navigation, path planning and vehicle platoon. The existing localization method based on multi-source with vehicle on board sensors cannot effectively solve the vehicle localization problem where satellite signals are not available, such as in urban canyons, tunnels and overpasses. A comprehensive review of vehicle cooperative localization technology is presented. Firstly, the key technologies of autonomous vehicle localization and their main application scenarios are analyzed. Then the vehicle cooperative localization framework is studied and data association and multi-source data fusion algorithm are analyzed. Finally, the future development trend of vehicle collaborative localization in the internet of vehicle environment is given. The research shows that there are still many key technologies to be broken in the research of high-precision and reliable localization, and the collaborative vehicle localization in the internet of vehicles environment uses wireless communication to realize the dynamic interaction of multi-source sensor information, which provides a new solution for the research and development of intelligent vehicle localization system.

Key words: Internet of Vehicles; Autonomous Driving; Cooperative Localization; Data Association; Data Fusion

收稿日期: 2020-11-05; 修回日期: 2020-12-23

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2020C01057)

1 引言

近年来, 全球关于智能交通系统应用的研究取得了迅速发展, 其目标是利用计算机、通信、传感等技术的进步实现更加安全、高效、节约能源、环境友好和舒适的交通系统。由此涌现了一系列新的技术, 如导航、各种驾驶辅助技术、车路协同乃至自动驾驶等^[1-2]。这些技术的实现往往需要某种定位手段来获得车辆的位置^[3]。获取实时、准确的车辆位置信息(如经度、纬度、高度等)是许多智能交通技术的重要组成部分。根据智能车辆的不同应用, 对位置信息精度要求进行了分类。其中, 导航、地图定位等对位置精度要求较低, 误差在 10~20 m 范围内即可; 协同自适应巡航、协同路口安全、车辆队列行驶等技术对位置精度要求中等, 一般要求误差在 1~5 m 范围内; 车辆碰撞预警、视觉增强、自动泊车等技术对位置精度要求高, 要求误差在 1 m 以内; 当今无人驾驶技术的迅速发展对车辆的定位需求则更高, 误差一般要控制在 20 cm 以内^[4]。这些技术日渐发展和普及的过程对车辆定位的准确性、稳定性和广泛的可达性提出了更高的要求。更好的车辆定位服务已经成为智能交通系统飞速发展大背景下的迫切需求。

随着车载测量传感器的种类不断丰富, 基于多源传感器融合的车辆自主定位方法已经有许多研究和相关成果。仅依靠单车自主定位方法仍然无法有效解决城市峡谷和长隧道等复杂环境的车辆全尺度定位问题。本文首先分析了当前单车自主定位方法及其应用, 然后深入研究了多车协同定位中的协同定位框架、目标关联算法及多车协同融合算法, 并对协同定位研究的难点和未来发展趋势进行了分析与展望。

2 车辆自主定位研究方法现状

目前全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)已经普及并且广泛用于为车辆提供位置服务, 如美国的全球定位系统

(GPS)、欧洲伽利略(GALILEO)、俄罗斯格洛纳斯(GLONASS)和中国的北斗^[5]。在 2020 年 6 月, 中国北斗三号系统最后一颗组网卫星发射成功, 标志着北斗全球导航系统星座部署完成, 共有 55 颗导航卫星在轨提供定位授时服务^[6]。GNSS 定位是一种便捷和成本低廉的定位方式, 但具有诸多的局限性: 一方面, 它的误差水平一般在 10 m 左右, 该定位精度不能满足当前自动驾驶或其他许多智能交通应用; 另一方面, 其受环境因素影响大, 比如建筑物遮挡、大气层干扰等因素都会使得 GNSS 定位的可靠性和稳定性下降。因此, 需要更多的定位手段来弥补 GNSS 定位的不足。

在车辆自主定位方法中, 基于视觉和激光的即时定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)技术的研究和发展^[7-8]推动了室内移动机器人、封闭园区低速物流配送车和无人驾驶观光车应用的发展和产业化落地。在视觉 SLAM 研究领域, 出现了许多杰出的工作。Mur-Artal 等人^[9]提出了一种基于特征的单目 ORB-SLAM 系统, 该系统选择特征点和关键帧并获得良好的性能, 该系统可在小型和大型室内和室外环境中实时运行。LSD-SLAM^[10]和 DSO^[11]放弃使用图像特征检测过程, 而直接使用传感器在特定时间段内从某个方向接收的光度值来计算相机的移动, 依靠图像像素的一致性, 包括角落、边缘和高纹理区域, 利用光照不变性方法消除了亮度变化的影响。激光测量具有更好的稳定性和精确性, 当前有许多实际产品基于激光 SLAM 来实现定位和导航。Zhang 等人^[12]利用曲率值来区分激光数据的边缘点和平面点, 对提取的激光特征点进行匹配和筛选, 通过正态分布变换(Normal Distribution Transform, NDT)^[13]算法来寻找点云之间的最佳匹配关系并计算运动信息, 但是该方法累积误差较大, 对环境要求较为严格。在前期工作的基础上, Zhang 等人^[14]融合图像和激光数据构建环境地图, 得到了在剧烈运动情况下仍可以高精度定位的结果。Ye 等人^[15]提出了一种激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)和惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)紧

耦合融合方法，即使在快速运动或特征不足的情况下，该方法也能获得很好的表现。Shan 等人^[16]提出了一种轻量级的 SLAM 方法，可以在低功耗嵌入式系统上实现实时姿态估计。随着计算机视觉中深度学习（Deep Learning, DL）的发展，一些研究人员已将 DL 引入 SLAM 系统中用来完成语义分析、重定位或深度特征检测等工作，如文献所提到的系统所示^[17-18]。基于 SLAM 技术的定位，要求环境中要有丰富的可检测特征。对于空旷的环境，如空旷的广场，会因为缺少有效特征而出现匹配失败；对于高度重复单一的环境，如长隧道，会出现匹配错误。

研究者认识到，单一的传感器无法克服复杂环境下定位不稳定和精度差的问题，引入性能互补的 GPS、IMU、轮速、相机、激光雷达等多模态传感器的融合^[19-21]，用低精度的传感器实现了厘米级定位，且在没有 GPS 信号的隧道、地库等场所，定位系统也能正常运行，摆脱了对 RTK 的依赖，如图 1 所示。面向自动驾驶的高精度地图采集与制作，正是利用了多传感器性能互补的特点，按照数据采集、数据处理、元素识别和人工验证的流程进行制作^[22]。基于高精度地图的车辆定位，结合卫星定位和特征定位互为冗余与补充的特性，实现车辆高精度高可靠定位^[23-24]。

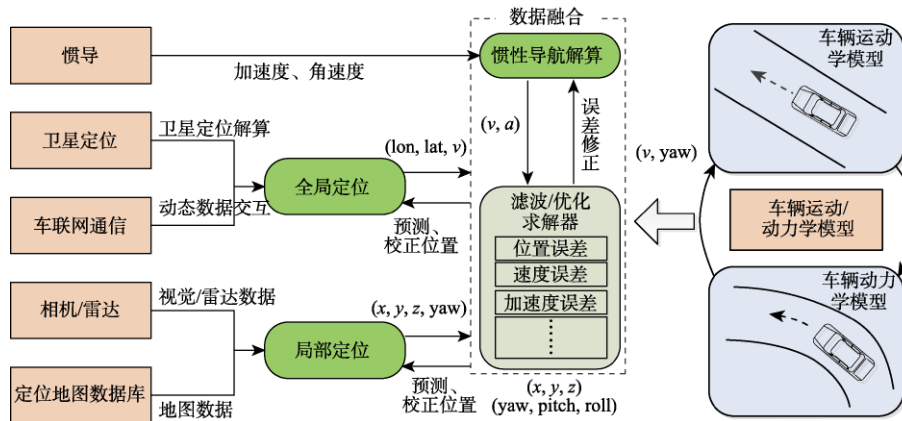


图 1 多源信息融合的车辆自主定位框架

Fig. 1 Localization framework based on multi-source data fusion

3 车辆协同定位技术研究现状

车辆自主定位方法仅依靠单车车载传感器有限的观测信息，实现高动态、复杂环境下的车辆高精度定位仍存在挑战。随着无线通信技术的发展，利用长期演进技术-车辆（Long Term Evolution-Vehicle, LTE-V）通信或专用短程通信（Dedicated Short Range Communication, DSRC）可实现车-车和车-路 V2X 通信^[25]。5G 基站建设的完善，推动了下一代移动通信技术在智能交通中的应用。利用 5G 低延时、大带宽的通信特点，可实现车联网环境下大数据量的即时传输。这些无线通信技术为车辆协同定位提供了信息交互管道，更多的观测信息量有助于提高车辆定位精度。

3.1 协同定位框架研究

车辆协同定位系统主要由传感器数据获取、车-车/车-路通信、测量目标关联和协同数据融合四大模块组成。协同定位框架如图 2 所示。

(1) 传感器数据获取模块：目前用于车辆定位的传感器主要有 GNSS、惯性导航系统、激光雷达、毫米波雷达、相机和轮速传感器。GNSS 用于获得车辆的绝对位置坐标，利用惯性导航系统弥补卫星信号短时间内不可用的缺点，在特征丰富的环境下基于激光雷达、相机、毫米波雷达进行相对定位可以获得较高的定位精度，轮速传感器提供辅助定位信息可提高系统稳定性^[20,26]。

(2) 车-车无线通信系统：通过 LTE-V、

DSRC 或第五代无线通信系统 (5G), 车辆之间可以进行信息的传递^[27-28], 通过车-车通信向附近环境车辆发送本车的绝对位置和本车车载传感

器测量得到的环境车辆相对位置信息; 通过车-路通信接收到路侧分享的绝对位置和路侧传感器检测的车辆目标相对位置信息。

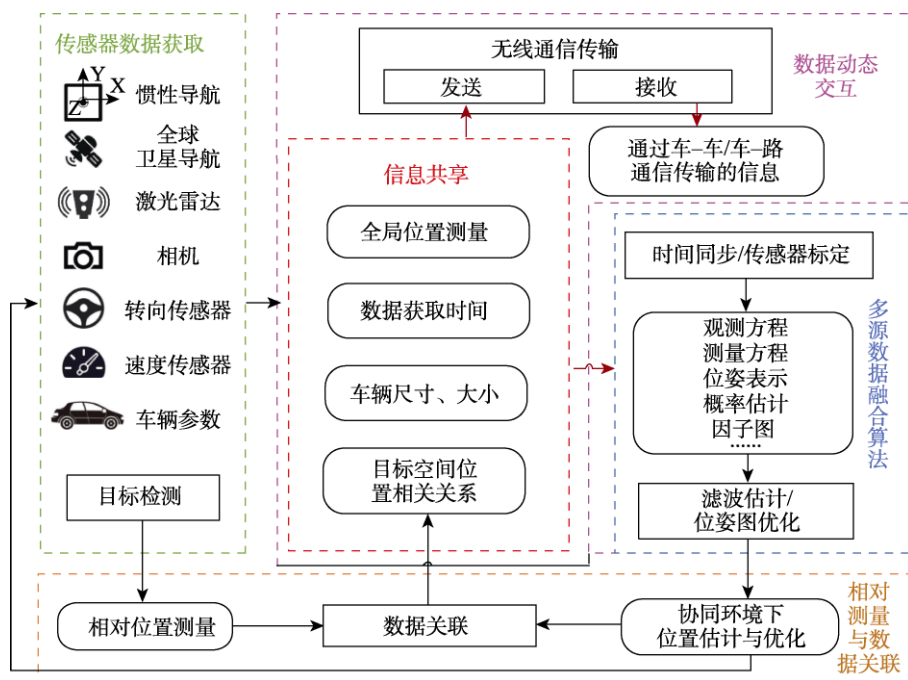


图 2 协同定位总体框架图

Fig. 2 Cooperative localization framework

(3) 测量目标关联模块: 该部分主要解决的问题是确定通信接收到的车辆目标与车载传感器探测到的车辆目标之间的对应关系^[29-30]。在关联过程中, 一方面可以利用检测的目标特征, 另一方面可以结合目标自身的位置、航向等属性。根据车辆周围环境, 自适应调整参与数据共享的邻居车辆或路侧节点数。

(4) 协同数据融合算法: 在协同定位中, 融合结合多车间带噪声的绝对位置和相对位置信息, 融合估计出更加准确的本车和环境车辆绝对位置^[31-32]。在数据融合中, 需要考虑多模态传感器同步问题和传感器标定关键问题。数据时间不同步问题会影响每一级信息融合结果的精度, 从而影响车辆定位的可信度。传感器标定是融合的基础, 实现各传感器坐标系之间的快速转换, 统一描述。

3.2 目标关联算法研究

在目标关联算法研究方面, 已经有许多成熟的算法可以利用, 如最近邻数据关联算法

(NNDA)、概率数据关联算法(PDAF)、联合概率数据关联算法(JPDAF), 基于深度学习的数据驱动目标关联算法在近几年也被广泛关注。目标关联算法流程如图 3 所示。

NNDA^[33]主要解决关联门^[34]的大小和关联门内目标匹配这两个问题, 关联门就是以上一帧的跟踪目标为中心划分的空间区域。最近邻数据关联的基本思想是把关联门作为图像搜索空间的子空间, 在关联门内选用与关联门中心最近的目标作为匹配, 其他所有的目标都不予考虑, 把它们当作其他跟踪目标的匹配。PDAF^[35]的主要思想是将关联门中所有量测进行概率意义上的加权平均作为滤波输出, 主要限制在于只能对单个目标进行关联。JPDAF^[36]在关联概率的计算过程中考虑到了因噪声引起的误检、虚检等因素, 因此目标跟踪的准确度有所提升, 但是当场景中需要关联的目标数量较多时, 该算法计算量呈指数增长。近年来, 出现了基于深度学习方法的目标关

联方法研究。Li 等人^[37]推广的网络流方法从深度学习的角度重新审视目标关联问题。通过深度神经网络，可以有效地学习一元和成对链路代价的参数，将原线性规划转化成两级优化问题。Philippe 等人^[38]通过深度匹配算法获得特征，通过逻辑回归学习边缘成本，深度匹配使用经过训练的卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）来提取关联特征，在 DeepFlow^[38]算法中得到了应用，用于学习大位移光流，计算输入特征之间的时间相关性。

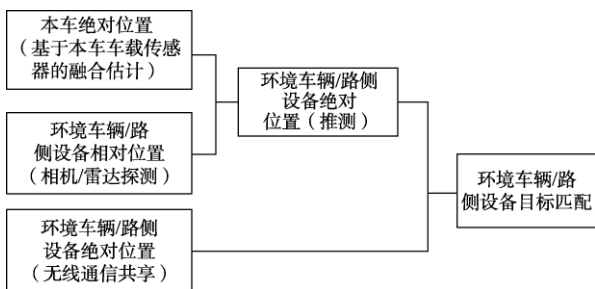


图 3 目标关联算法流程

Fig. 3 Data association algorithm flowchart

3.3 多车协同融合算法研究

利用融合算法实现多传感器信息互补，从而实现高精度和稳定的定位系统。Li 等人^[39]对路侧单元（Road Side Unit, RSU）通过 Wi-Fi 发布局部

地图信息，配备 GPS 接收器的车载单元（On Board Unit, OBU）和 Wi-Fi 设备接收地图，并利用地图匹配算法在地图上进行定位，得到精确的位置信息。Qian 等人^[40]使用扫描栅格地图的方法实现相对定位，结合实时动态载波相位差分技术（Real Time Kinematic, RTK）提出了一种相对定位联合绝对定位的融合定位方案。文献[41]和[42]中引入了基于 EKF 的协同定位算法，当环境中节点数目较多时，对于每个获取数据的时间点，每个节点测量值数量高达 $N(N-1)$ ，其中 N 是环境中的节点数目，集中式协同定位方法数据处理的计算复杂度可达到 $O(n^4)$ 。Zhou 等人^[43]表明，通过使用 Householder QR 算法的改进版本，基于 EKF 的协同定位的计算复杂度可以从 $O(n^4)$ 降低到 $O(n^3)$ 。分散式系统将数据处理的分配给多个系统节点，以减少系统融合中心的压力。文献[44]在[41]的基础上给出了同步的分布式扩展方法。Arambel 等人^[45]提出了一种基于协方差交集的同步多中心算法，用于未知相关估计的一致性融合。

融合定位系统不是简单地对各种定位传感器输出叠加，需要深入研究智能融合技术，综合实现最优的定位性能。图 4 展示了基于卡尔曼滤波的多源信息融合框架。

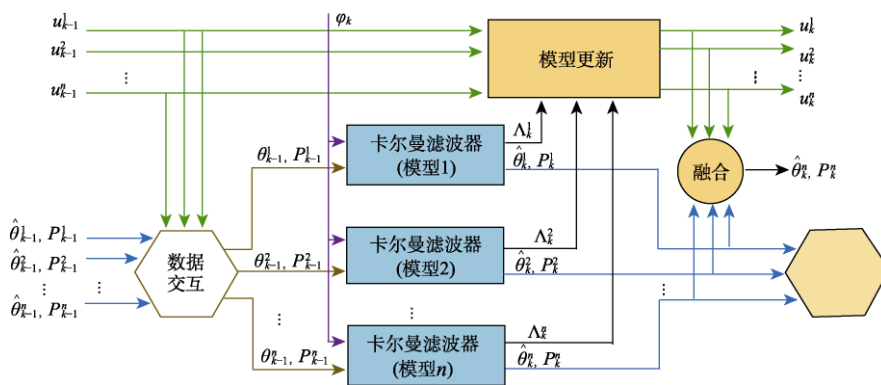


图 4 基于卡尔曼滤波的多源信息融合框架

Fig. 4 Multi-source data fusion based on Kalman filter

在实际融合方案中，可以将位置估计分为两个阶段。首先进行基于本车位置信息的粗估计，将粗估计的结果通过车-车通信进行分享，然后进行综合多车位置信息的融合估计。相比于直接

通过车-车通信分享观测信息，在通信前先进行粗估计（预处理）的方法有利于提高通信获得的他车信息准确性，进而也有利于改善融合估计的效果。

4 结 论

在城市环境下, 建筑物、立交桥的遮挡会产生多径信号, 影响卫星信号直射径的提取精度, 从而影响定位的准确性。车辆高精度高可靠定位是智能汽车发展的核心关键技术, 利用多模态传感器融合可实现一般场景下的高精度定位, 协同定位为复杂场景下的车辆定位提供了技术支撑。随着通信技术的快速发展, 5G 凭借其大通信带宽、高数据传输速率的特点得到关注和研究。5G 不仅可为车辆协同定位提供了数据交互的通道, 其本身还具有定位能力。随着 5G 基站建设的加快, 可充分利用 5G 网络的通信管道和平台优势, 融合多种异构定位技术, 实现多模态信息优势互补, 完成通信和定位一体化。

在协同定位系统中, 除了本文中所述的目标关联和数据融合算法关键技术外, 还需要考虑诸如传感器测量不确定性、通信延时、传感器故障诊断和容错控制等对系统精度和稳定性的影响^[46]。还可以结合人工智能 (AI) 技术, 在协同网络环境中采用多径信号辅助的 AI 建图与定位, 从多径信号中提取环境静态特征为定位提供更多的参考基准点, 或者利用多车协同进一步提高静态特征的提取精度, 从而提高定位精度。

参 考 文 献

- [1] 王雅琳, 杨依然, 王彤, 等. 2019 年无人系统领域发展综述[J]. 无人系统技术, 2019, 2(6): 53-57.
- [2] 张朝阳, 李星宏. 5G 在无人驾驶汽车中的应用前景分析[J]. 无人系统技术, 2019, 2(2): 65-68.
- [3] 董文轩, 陈建国, 黄宇, 等. 基于无人小车嗅觉的混合型气体溯源定位算法[J]. 无人系统技术, 2019, 2(5): 30-38.
- [4] Reid T G, Houts S E, Cammarata R, et al. Localization requirements for autonomous vehicles[J]. ArXiv Preprint ArXiv, 2019.
- [5] Ren X D, Zhang X, Xie W, et al. Global ionospheric modelling using multi-GNSS: BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 33499.
- [6] 魏航. 北斗三号顺利完成全球组网[J]. 环球飞行, 2020(7): 50-57.
- [7] Huang B, Zhao J, Liu J. A survey of simultaneous localization and mapping[J]. ArXiv Preprint ArXiv, 2019.
- [8] Zhao X, Min H, Xu Z, et al. An ISVD and SFSD-based vehicle ego-positioning method and its application on indoor parking guidance[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019(108): 29-48.
- [9] Mur-Artal R, Tardos J D. ORB-SLAM2: An open-source slam system for monocular, stereo, and RGB-D cameras[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(5): 1255-1262.
- [10] Engel J, Stuckler J, Cremers D. Large-scale direct SLAM with stereo cameras[C]. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg, Germany, September 28 - October 02, 2015.
- [11] Engel J, Koltun V, Cremers D. Direct sparse odometry[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 40(3): 611-625.
- [12] Zhang J, Sanjiv S. LOAM: Lidar odometry and mapping in real-time[C]. Robotics: Science and Systems, Berkeley, USA, July 12-16, 2014.
- [13] Biber P. The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching[C]. 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Nevada, USA, October 27-November 1, 2003.
- [14] Zhang J, Sanjiv S. Visual-lidar odometry and mapping: Low-drift, robust, and fast[C]. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Washington, USA, May 26-30, 2015.
- [15] Ye H, Chen Y, Liu M. Tightly coupled 3d lidar inertial odometry and mapping[C]. 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, Canada, May 20-24, 2019.
- [16] Shan T, Brendan E. Lego-loam: Lightweight and ground-optimized lidar odometry and mapping on variable terrain[C]. 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018. Madrid, Spain, October 1-5, 2018.
- [17] Tateno K, Tombari F, Laina I. CNN-SLAM: Real-time dense monocular SLAM with learned depth prediction[C]. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)[C], Honolulu, HI, USA, July 21-26, 2017.
- [18] Xiao L, Wang J, Qiu X, et al. Dynamic-SLAM: Semantic monocular visual localization and mapping based on deep learning in dynamic environment[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019(117): 1-16.
- [19] Andreas S, Daniela E S M, Thomas P. Precise positioning through a loosely-coupled sensor fusion of GNSS-RTK, INS and LiDAR for autonomous driving[C]. 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Portland, Oregon, USA, April 23-26, 2020.
- [20] Min H, Wu X, Cheng C, et al. Kinematic and dynamic vehicle model-assisted global positioning method for autonomous vehicles with low-cost GPS/camera/in-vehicle sensors[J]. Sensors, 2019, 19(24): 5430.
- [21] Chang L, Niu X, Liu T, et al. GNSS/INS/LiDAR-SLAM integrated navigation system based on graph optimization[J]. Remote Sensing, 2019, 11(9): 1009.
- [22] 曹波. 基于多传感器的高精度地图生成技术研究[J]. 内燃机与配件, 2019(16): 133-135.

- [23] Zheng S, Wang J. High definition map-based vehicle localization for highly automated driving: geometric analysis[C]. 2017 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), Gothenburg, Sweden, June 27-29, 2017.
- [24] Kang J M, Yoon T S, Kim E, et al. Lane-level map-matching method for vehicle localization using GPS and camera on a high-definition map[J]. *Sensors*, 2020, 20 (8): 2166.
- [25] 段续庭, 田大新, 王云鹏. 基于 V2 X 通信网络的车辆协同定位增强方法[J]. *汽车工程*, 2018, 40(8): 947-951.
- [26] Le C, Niu X, Liu T. GNSS/IMU/ODO/LiDAR-SLAM integrated navigation system using IMU/ODO pre-integration[J]. *Sensors*, 2020, 20 (17): 4702.
- [27] Xu Z, Li X, Zhao X, et al. DSRC versus 4G-LTE for connected vehicle applications: A study on field experiments of vehicular communication performance[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2017.
- [28] Zhang P, Lu J, Wang Y, et al. Cooperative localization in 5G networks: A survey[J]. *ICT Express*, 2017, 3(1): 27-32.
- [29] 孙寒涛. 基于状态和属性的多目标联合关联算法[J]. *应用科技*, 2020, 47 (3): 74-79.
- [30] 赵丰, 王利辉, 陈俊吉, 等. 基于卡尔曼滤波的多特征加权最近邻数据关联与跟踪算法[J]. *河北科技大学学报*, 2020, 41(3): 218-224.
- [31] Hoang G M, Denis B, Härrä J, et al. Robust data fusion for cooperative vehicular localization in tunnels[C]. 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). June 11-17, Los Angeles, USA, 2017.
- [32] Lofgren I, Ahmed N, Frew E, et al. Scalable event-triggered data fusion for autonomous cooperative swarm localization[C]. 2019 22th International Conference on Information Fusion (FUSION), Ottawa, ON, Canada, July 2-5, 2019.
- [33] Singer R A, Stein J J. An optimal tracking filter for processing sensor data of imprecisely determined origin in surveillance systems[C]. *IEEE Conference on Decision and Control*, Florida, USA, December 15-17, 1971.
- [34] 刘沛鑫. 基于数据关联的视频多目标跟踪关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [35] Bar-Shalom Y, Daum F, Huang J. The probabilistic data association filter[J]. *IEEE Control Systems*, 2010, 29(6): 82-100.
- [36] Svensson L, Svensson D, Guerriero M, et al. Set JPDA filter for multitarget tracking[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(10): 4677-4691.
- [37] Li Z, Yuan L, Ramakant N. Global data association for multi-object tracking using network flows[C]. 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, Alaska, USA, June 24-26, 2008.
- [38] Philippe W, Jerome R, Zaid H, et al. Deep flow: Large displacement optical flow with deep matching[C]. 2013 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Sydney, Australia, December 1-8, 2013.
- [39] Li H, Chen X, Huang L, et al. A GPS/Wi-Fi integrated system for positioning in cooperative vehicle and infrastructure system[C]. 2012 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES 2012), Istanbul, Turkey, 24-27 July, 2012.
- [40] Qian C, Zhang H, Li W, et al. Cooperative GNSS-RTK ambiguity resolution with GNSS, INS, and LiDAR data for connected vehicles[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12 (6): 949.
- [41] Roumeliotis S I. Robust mobile robot localization: From single-robot uncertainties to multi-robot interdependencies[D]. Los Angeles: University of Southern California, 2000.
- [42] Martinelli A, Pont F, Siegwart R. Multi-robot localization using relative observations[C]. 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, April 18-22, 2005.
- [43] Zhou K X, Roumeliotis S I. A sparsity-aware QR decomposition algorithm for efficient cooperative localization[C]. 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minnesota, USA, May 14-18, 2012.
- [44] Roumeliotis S I, Bekey G A. Distributed multirobot localization[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(5): 781-795.
- [45] Arambel P O, Rago C, Mehra R K. Covariance intersection algorithm for distributed spacecraft state estimation[C]. 2001 American Control Conference, Virginia, USA, June 25-27, 2001.
- [46] 鲁光泉, 潘日佩. 考虑定位信息不确定性的多车协同定位算法[J]. *交通信息与安全*, 2018, 36(5): 59-66.

作者简介:



闵海根 (1990-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为智能网联汽车高精度定位、协同控制及故障诊断。本文通讯作者。



宋晓鹏 (1987-), 男, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为智能网联汽车环境感知及协同控制。



程超轶 (1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为车辆高精度定位及导航技术。

[引用格式] 房建武, 贾皓, 朱晨, 等. 交通场景行人穿越检测方法进展研究[J]. 无人系统技术, 2021, 4(1): 15-23.

交通场景行人穿越检测方法进展研究

房建武¹, 贾皓¹, 朱晨¹, 王贺¹, 薛建儒²

(1. 长安大学交通视觉安全实验室, 西安 710064; 2. 西安交通大学视觉认知计算与智能车实验室, 西安 710049)

摘要: 随着自动驾驶和计算机视觉技术的飞速发展, 人们对交通安全的重视程度越来越高。其中, 交通场景中行人穿越检测问题是研究的热点与难点之一。对行人穿越检测这一领域进行了综合评述, 并对未来研究进行了展望。按照行人试图穿越、正在穿越及穿越预测三个阶段进行分析, 首先分析了基于行人姿态穿越意图的研究进展(试图穿越), 包括人体姿态、数据驱动和高斯动力学模型三个方面; 其次讨论了基于轨迹跟踪的穿越行为检测方法(正在穿越); 然后概括了基于轨迹预测的行人穿越检测方法(穿越预测); 最后总结了现阶段比较新颖的多传感融合、车路协同、车联网等研究角度, 并对未来该领域需重点发展的方向提出建议。

关键词: 穿越行人; 穿越意图; 轨迹跟踪; 轨迹预测; 注意力机制; 车路协同

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)01-15-09

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.1.003

Research on Pedestrian Crossing Detection in Traffic Scenes

FANG Jianwu¹, JIA Hao¹, ZHU Chen¹, WANG He¹, XUE Jianru²

(1. Lab of Traffic Vision Safety Research (LOTVS), Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Visual Cognitive and Intelligent Vehicles Lab, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the rapid development of autonomous driving and computer vision, more and more efforts are being made for traffic safety research, among which pedestrian crossing detection in driving environment is one of the most prominent problems. The field of pedestrian crossing detection is reviewed, and its future research is prospected. According to the three stages of pedestrian crossing process-crossing intention, crossing behavior and crossing prediction, firstly, the crossing intention including three aspects: human posture, data-driven and Gaussian dynamic model is reviewed. Secondly, the tracking frameworks in crossing are discussed. Then the pedestrian crossing prediction works based on trajectory prediction is summarized. Finally, some new research perspectives including multi-sensor fusion, vehicle road cooperation and vehicle Internet are summarized, and some suggestions for the future development of this field are put forward.

Key words: Crossing Pedestrians; Crossing Intention; Trajectory Tracking; Trajectory Prediction; Attention Mechanism; Vehicle-to-Infrastructure Cooperation

1 引言

据统计, 由于“车辆未按规定避让行人”这

一因素造成的交通事故伤亡占据中国交通事故发生的最大比重^[1], 因此, 行人穿越检测是智能驾驶车辆面临的重要感知任务之一。同时, 由于长

收稿日期: 2020-12-03; 修回日期: 2020-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(61773311, 61806022); 长安大学中央高校基金(300102320202)

期以来人类在驾驶中积攒的大量经验，类人驾驶是目前智能驾驶技术研究的主要途径之一。所以，面对行人穿越检测这一问题，如果智能车辆系统能够像人一样理解行人的穿越意图、感知行人穿越的运动状态、预测其运动趋向，则可以有效地减少交通事故的发生，从而提高驾驶的安全性，促进智能交通领域发展。

近些年伴随深度神经网络理论研究的深入和计算力的不断提升，深度学习得到了前所未有的关注与发展，在计算机视觉领域催生并推动了许多应用场景，在一些诸如物体检测、图像分类等任务中都取得了超过人类检测的水平。因此，在需要感知系统的多种无人系统平台中，例如机器人、智能驾车、无人机等，被广泛使用^[2-5]。在驾驶环境中，行人是最重要的交通要素，所以，许多学者及研究机构着力研究如何检测行人穿越^[6-10]。发展到现在，由于行人目标的高机动性、主观意图不明确性、场景交互的多样性，这个问题现在仍然面临许多挑战^[11]。本文主要综述当前驾驶环境行人穿越检测的发展现状及主要技术线路，从试图穿越、正在穿越、穿越预测三个阶段分别以穿越意图理解角度、穿越轨迹跟踪角度及穿越行为预测角度进行分析。最后对行人穿越检测问题可能的新思路及挑战因素进行探讨，希望为无人驾驶领域的发展提供一些新思路。

2 基于行人穿越意图的方法：试图穿越

2.1 基于人体姿态意图的行人穿越检测研究

近年来，一些关于穿越行人检测的方法利用行人的轮廓、姿态^[12-13]等信息来进行穿越意图检测，这些方法的目的是在人体姿态发生细微变化时进行穿越与否的判断。比如，当某个行人要发生穿越行为时，首先会左右观望交通状况，此时尚未发生穿越动作，只是头部进行了细微的转向。一般而言，如果路侧行人与车辆存在视觉注意的交互，则其穿越意图比未发生眼神交互的行人更加明显。因此路侧的行人头部朝向和眼神的交互是行人穿越可能发生的重要线索。此外，当一个

行人站在道路边缘时，其比站在距离路边较远的行人更有意发生穿越。在行人的穿越意图理解中，头部和躯干的特征是最主要的特征。

在计算机视觉领域内，行人的特征通常是从视觉影像中获取能够充分表征行人区分性的高纬度表征。基于此，采用若干机器学习算法进行识别与分类，比如支持向量机^[14]，神经网络^[15]概率决策树^[16]、k-NN^[17]和卷积神经网络^[18]等。在这些工作中有一类方法结合头部和腿部的特征来预测行人是否具有穿越意图，比如文献[19]中的工作，首先利用头部图像进行头部朝向的估计，而腿部（躯干部分）用于估计行人的运动。图1是这类方法的一种典型示例，描述了这种特征提取的体系结构。

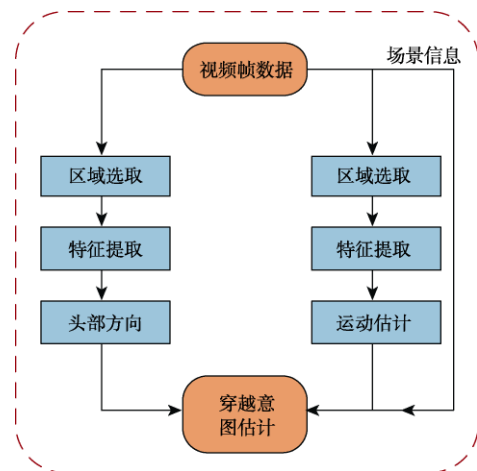


图1 基于人体特征识别穿越意图的框架
Fig. 1 Framework of intention estimation of pedestrian crossing

2.2 基于高斯动力学模型的穿越意图研究

高斯动力学模型在计算机视觉、模式分析及多媒体处理领域已经得到了大量的应用，并在很多具体应用中取得了突出进展。究其根本，高斯动力学模型的研究重点集中于如何将时空高维信息转换到低维空间来求解。在行人穿越意图估计中，高斯过程动力学模型将行人身体的关键点或肢体关节提取的三维时空信息约简到一个由位置和位移表征的低维高斯空间。例如 Minguez 等人^[20]提出的平衡化的高斯动力学模型（Balanced

Gaussian Process Dynamical Models, B-GPDM) 可以提前 1 秒预测未来行人的意图, 该方法将行人骨架或者关节点提取的三维位置和低维度隐空间上分布的位移关系融合进模型中, 使其具有推断未来的可能位置和预测位置的特性。在此工作中, 专门提出了 4 种基础模型: 行走 (walking)、停止 (stopping)、开始 (beginning)、站立 (standing)。

这种基于高斯运动学过程模型进行意图检测的核心过程是匹配一个训练好的行人识别模型来估计每个目标的意图, 此类方法的示意如图 2 所示, 将行人执行不同活动的运动序列数据集进行训练。首先将几种类型的行人穿越序列分成若干子集, 然后对视频内包含某一个活动的短时序列建模一个高斯过程动力学模型。对于持续到来的新视频输入不断选择最佳行为模式匹配的模型, 这种匹配的方法精度取决于模型的训练准确度。最后所选模型用于预测行人意图是否具有四种意图属性中的一种从而完成意图检测, 为自动驾驶车辆提供信息。本质上来讲, 此工作是一种行人运动意图的分类方法。

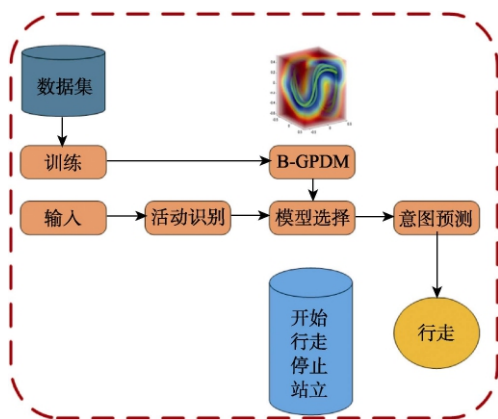


图 2 行人穿越行为训练及匹配示意图^[20]

Fig. 2 Schematic of model training and evaluation process for pedestrian crossing detection^[20]

2.3 基于数据驱动的穿越意图研究

随着大规模自动驾驶数据的不断涌现, 深度学习逐渐在行人穿越任务中发挥作用。基于此, 产生了一类数据驱动的行人穿越意图估计方法。

当然, 根据自动驾驶车辆配置传感器数据的模式差异, 将有若干工作将不同传感数据引入穿越意图估计, 比如, 采用三维激光点云数据。

在数据驱动下, 多种深度学习网络结构被提出, 其中, 文献[21]将深度神经网络的时间序列分类体系结构进行比较, 专门创建了预测路旁行人的穿越意图的多尺度密集记忆网络 (multi-scale dense neural networks) 和长短时记忆网络 (Long-Short-Term-Memory, LSTM), 并验证了其效果。多尺度密集记忆网络包含两个全联接层、两个 dropout 层以及一个 sigmoid 激活层, 用于直接将卷积神经网络提取的行人特征进行分类。而 LSTM 结构进一步在时序上进行关联, 捕捉行人运动特征。基于此, 可以推断出行人的运动意图, 比如行人未来姿势和移动方向。

由于图像坐标系是一种透视变换, 在行人穿越意图估计上存在偏差, 因此文献[21]采用三维点云数据进行意图估计, 其将三维点云数据映射成一个二维图像, 图像分辨率为三维点云采样点的范围, 图像数值为三维点云的远近。这些图像可以收集行人姿态信息。对于每个独立的行人, 记录下点云集合组成的点阵编号, 以及点阵本身的旋转角度。这样, 卷积神经网络卓越的图像处理分类能力就可以得到利用。

2.4 小结

本节显示出文中提到的几种典型方法的特征。这些方法是在行人还未发生穿越行为时, 或者说行人将要进行穿越时意图的检测, 从而避免可能发生的事故。

3 基于轨迹跟踪的方法: 正在穿越

3.1 行人穿越检测中跟踪方法的特性

在驾驶环境中, 由于交通参与者种类多样, 行人的轨迹跟踪问题需要克服动态场景变化的干扰。同时, 驾驶环境行人目标数目众多, 一般采用多目标跟踪的方法进行研究。针对行人穿越而言, 其主要呈现 3 个大的挑战因素。

频繁遮挡: 行人穿越过程通常处于复杂的交

通环境之中，易发生行人被其他车辆或者行人目标遮挡的情况，且被遮挡的对象经常处于持续遮挡的状态。

强尺度变化：由于车辆的运动特性，穿越的行人目标存在明显的尺度变化问题。比如远处的行人起初尺度较小，但随着自车的不断接近，行人尺度会极速增大。

高机动性：行人穿越过程中，由于其主观判断的变化，其运动方向、运动速度存在频繁的变化，因此行人穿越过程具有高度的机动性，所以要将行人在运动中的机动性考虑进去。

轨迹跟踪中为了克服这些问题，本文首先介绍目前主要的两阶段训练的跟踪方法和端到端的跟踪方法。其次，对最新的基于图卷积的轨迹跟踪方法进行描述。

3.2 基于两阶段训练和端到端训练的跟踪方法研究

3.2.1 两阶段训练的跟踪方法研究

行人跟踪的分步训练方法一般来说需要预先收集整个序列后进行所有视频帧中行人目标的检测。考虑到相邻的视频帧之间的目标时空连接关系，一般会用到图模型来求解多目标跟踪问题。这些图结构可以通过最小损失流^[22-23]、最短路径^[24]、多次剪枝^[25]或多区域^[26]的子图分解来求解。可以向图结构中的点或者权边施加概率约束来描述运动和遮挡问题^[27]。现如今，随着深度学习网络的发展，行人特征描述已经全面采用深度卷积特征。

两阶段训练过程中，在基于卷积神经网络进行行人目标特征提取的基础上^[28-29]，关键问题是如何学习行人目标两两之间的相似度和短时轨迹之间的相似度。为了获得更精确的相似度度量，在文献[30]中考虑了额外的时间顺序信息。这些连续的特征在轨迹分裂重联结模块（Generation Cleaving Re-connection Association, GCRA）^[31]就对较长时间内的物体特征打乱时间顺序后进行了多次重复利用，并获得了不错的效果。此外，联合多图切割方法（Joint Multi-cut,

JointMC）^[32]提取行人目标的深度光流特征提升图结构边切割优化性能。DeepNetWork^[33]采用端到端学习的方式对网络流进行优化从而改善跟踪结果，从而更好地实现行人穿越跟踪。

在此类方法中，我们研究组之前也设计了基于 RGB 图像数据和三维点云融合的多目标跟踪方法^[34]。通过预先检测行人目标后，将行人的视觉特征和三维点云特征进行融合，并使用 Kuhn-Munkras 算法计算相邻视频帧之间的目标关联。

3.2.2 端到端的跟踪方法研究

与两阶段训练方式不同，端到端训练框架将行人目标检测和轨迹跟踪集成为一个端到端的网络结构。其主要难点在于如何同时学习目标检测器及轨迹关联模型，并进行新数据进入后的时序更新。

一些深度学习模型使得端到端的跟踪网络训练效率不断提升。比如文献[35]从行人再识别任务中学习外观特征，与检测相关联。而另一类方法^[36-37]则通过使用长短时记忆网络进行自回归和匹配分类来预测运动与外观特征，比如基于时空注意机制的多目标跟踪（Spatial-Temporal Attention Mechanism MOT, STAM-MOT）^[38]应用空间和时间注意力映射来处理跟踪中的局部遮挡问题，并设计端到端的递归神经网络（RNN、LSTM）来学习轨迹与检测、语句更新、初始化和终止轨迹之间的关联。为了寻找目标的最优位置，文献[39]采用了用于单个目标跟踪的密集搜索策略。此外，基于多假设跟踪（Multiple Hypothesis Tracking, MHT）框架的两种与深度学习相结合的方法是 MHT-DAM 和 MHT-bLSTM^[40]，其中采用了 CNN 和双线性 LSTM 网络学习外观特征。

3.3 基于图卷积（GNN）的跟踪方法研究

由于图卷积网络（Graph Neural Network, GNN）在构建目标间关系时具有非常好的建模特性，因此近年来 GNN 也被广泛应用于多目标跟踪领域，本小节将介绍较为有效的基于 GNN 的跟踪算法。

最早将 GNN 用于行人跟踪的是在 Jiang 等人^[41]的工作中,可以看出这种方法通过一个孪生网络,得到观测的目标和当前的目标轨迹的表征相似度,然后将目标的历史轨迹位置作为输入,输入一个 LSTM 网络得到相应的位置,计算这个点与观测到的目标的运动相似度,由两个相似度构成相似度矩阵。轨迹与观测目标的相似度之间构成了关系图,以目标和观测信息作为节点,相似度作为边权,表观特征和位置信息拼接作为节点属性特征。

再比如另外一类基于 GNN 的多目标跟踪方法,深度关联网络(Deep Association Network)^[42]先将行人表观特征和实际运动特征进行提取,并构建了两种特征的网络联系图,通过 GNN 后得到关联矩阵,其中目标重合度信息被用于相似度矩阵计算中。另一种方法,即 GNMOT(Graph Networks Multiple Object Tracking)^[43]将 GNN 网络用于表征行人整体和躯干的运动,二者融合在一起得到一种相似度矩阵。

基于 GNN 的多目标跟踪方法关键问题是怎样构建一个好的图关联结构。为此,文献[44]设计了一种基于信息传递网络(Message Passing Networks, MPN)的跟踪器。其中,MPN 的图关联结构的构建方法是比较新颖的,图的节点是由所有的视频帧中的全部目标组成的,直接将观测的信息作为一个总的节点。节点的属性特征是由训练得到的行人外观表征特征与人体姿态几何特征组成的,并且特征由欧氏距离度量,然后通过创建的 MLP(多层感知机)网络得到最终的特征表达。图结构中各边表示跨越不同帧的不同行人目标之间的关系,最终也以此构建了一个端到端的网络结构。

此外,在一些利用三维激光点云进行多目标跟踪的工作上,比如在 GNN3DMOT^[45],运动特征是通过 LSTM 网络得到的,表观特征是通过卷积神经网络得到的。这个方法的改进版本 GNNTk Forecast^[46-47]中将多目标跟踪与轨迹预测结合,取得了更好的跟踪效果,其示意图如图 3 所示。

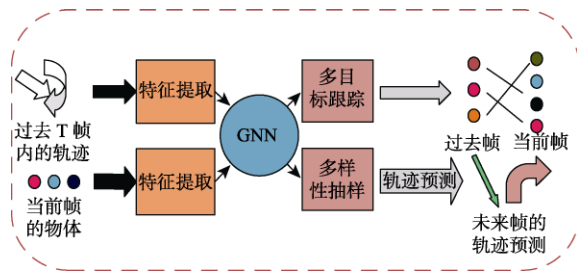


Fig. 3 Pipeline of multi-object tracking by GNN^[46]

3.4 小结

行人跟踪的方法着重于行人发生穿越的过程中,当行人发生了穿越行为,通过跟踪的方法发现并检测出来穿越行人,为智能车提供信息。

4 基于轨迹预测的方法研究: 穿越预测

在基于穿越跟踪的基础上穿越过程中的轨迹预测(穿越预测)是计算机视觉领域研究的热点问题之一,在汽车的自动驾驶、机器人自动导航、城市街道规划等领域具有广泛的应用场景。轨迹预测的影响因素主要是目标历史行为、不同目标之间的互动、场景背景的约束,对人的行为进行预测还涉及人类行为的随机性。所以挑战性主要表现在不确定性、交互性、机动性、多模态特性 4 个方面。预测结果多模态(multi-modal)特性是指对于相同的历史轨迹,不同目标可能有不同的未来轨迹。例如在十字路口, A 行人可能左转, B 行人可能直行。如何对不同意图进行建模,使预测方法能够生成较为完善的预测结果是轨迹预测任务较为关注的一点。另外,目标间交互关系的建模也起到举足轻重的作用,在日常驾驶环境下,被预测车辆或行人的行为不仅与自身的历史轨迹有关,还会受到周围其他目标的影响。最终的目标是预测结果要可靠精确,因为车辆和行人在日常环境中的行为会受到各种交通规则约束,怎样利用好这些规则输出安全可靠的预测结果对于辅助驾驶系统而言至关重要。

基于此,本文主要从基于马尔可夫决策过程的穿越预测方法和基于深度学习的穿越预测方法两方面进行综述。

4.1 基于马尔可夫决策过程的穿越预测方法

在行人穿越预测中有短期时序依赖的穿越行为预测和长期时序依赖的穿越行为预测。Karasev 等人^[48]提出了一种针对行人长期行为的预测方法，将他们的行为建模为跳跃马尔可夫过程，目标是一个隐藏变量。假设近似理性的行为，并结合环境约束和偏差，将穿越行为建模为马尔可夫决策过程框架中的策略学习。使用时序滤波器推断行人状态，并通过随机策略进行规划来预测穿越动作。

将穿越行为预测定义为将目标映射到行动的策略函数 π ：给定自然观测状态 g 和当前状态 $X=(X, \theta, S)$ ，其中 X 为行人位置， θ 为行人移动方向， S 为行人移动距离。策略 π 产生从当前时间 t 到实现目标的未来某个时间的未来物理状态轨迹。因为具有相同目标的不同个体会有不同的行为，所以策略 π 是随机的。预测结果示意图如图 4 所示。

实际上，在轨迹预测过程中，结合道路的几何结构和行人目标的运动朝向，利用强化学习或者深度强化学习进行轨迹预测具有很大的实用价值。只不过，难点在于奖励空间的设计和与环境交互中轨迹预测动作集合的设计。

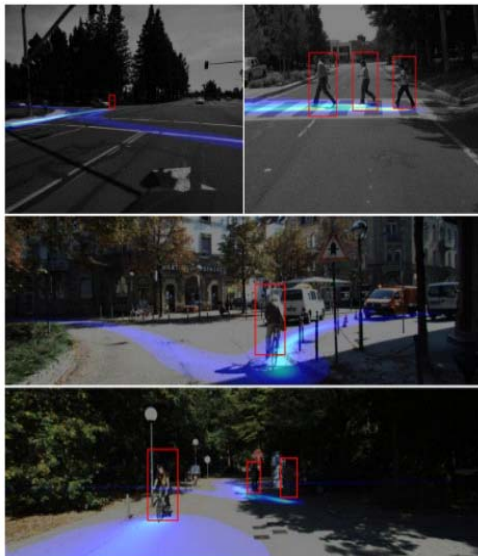


图 4 蓝色表示可能的潜在穿越区域^[48]

Fig. 4 Regions marked by blue color represent potential path of crossing^[48]

4.2 基于深度学习的穿越预测方法

由于行人穿越过程中的时序依赖性，长短时记忆网络 (LSTM)^[49]被广泛用来表征时空序列数据的时序特征，LSTM 将场景中的每个目标轨迹序列单独使用 LSTM 网络编码-解码，学习每个目标的运动行为特征。解码器根据时空上下文信息生成场景个体的预测轨迹，该模型未考虑现实场景个体之间存在的交互性。Yang 等人在 LSTM 基础上提出的 Social-LSTM 模型^[50]，在 LSTM 模型中加入社交池化层，该层基于空间距离的方式将邻近个体的隐藏信息共享，获取邻近个体的交互关注度。Group-LSTM^[51]利用运动一致性，对具有相似运动趋势的轨迹进行聚类，然后再提出改进的 Social-LSTM 来进行未来的轨迹预测。

计算机视觉几乎所有任务都在用 GAN 网络来提升性能，GAN 神经网络主要包括一个生成器和一个鉴别器，通过两者的相互博弈来得到更精确的结果。Lisotto 等人基于生成对抗网络思想提出 Social-GAN 和 S-GAN-P 模型^[52]，借助 GAN 网络的生成对抗思想，生成器与鉴别器的大量对抗训练，相较于 LSTM 编码-解码系列模型，在总体时段和单个时间点的预测精度表现更好，图 5 显示出基于 GAN 网络的轨迹预测示意图。

考虑到行人穿越过程中，社交注意力的影响，即不同远近、不同运动朝向的行人对于目标行人具有不同的重要性。社交注意力 (Social Attention)^[53]是一种轨迹预测模型，可以捕捉每个人在人群中行走的相对重要性，无论他们是否接近。Yang 等人^[54]在 Social-GAN 的基础上采用注意机制来利用行人头部方向与其轨迹之间的相关性，以行人最后一步的行进方向为头部方向。

Takuma 等人^[55]利用行人检测框的位置序列和大小序列，加入自行车摄像机本身的运动信息 (摄像机在每两帧之间的平移和旋转信息)。另外，图片中其他目标对于行人的相对坐标也被用来进行预测。为了得到更加准确的预测结果，有很多模型考虑了周围环境信息对预测轨迹的影响，Lisotto 等人提出的模型^[56]考虑了三个基本因素：人与人之间的相互作用、对区域的历史观察以及周围空

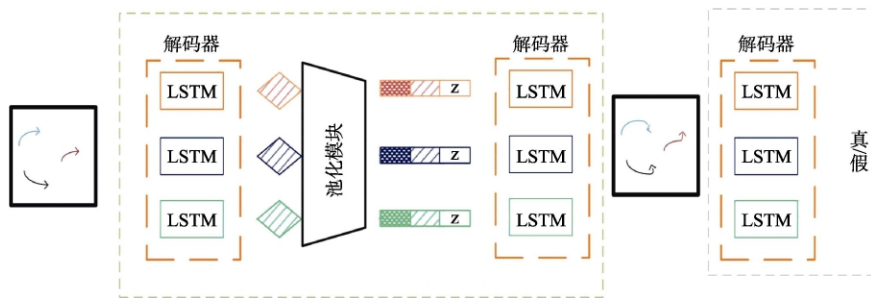


图 5 基于 GAN 的行人轨迹预测方法示意图

Fig. 5 Method pipeline of trajectory prediction by GAN

间的语义, 针对这三种因素分别设立了池化层来学习交互关系, 未来的位置坐标是通过使用线性回归来提取高斯分布的关键参数获得的。

4.3 小结

行人穿越预测从行人轨迹点时序联系、行人空间交互、时空重要性度量、场景结构建模(几何、语义信息)4个大的方面不断改进。进一步从单目标轨迹预测逐渐演变到多模态轨迹预测。从驾驶安全的角度来讲, 行人穿越预测的精度和可靠度不断提升。

5 现阶段研究新思路

未来的行人检测技术的研究仍需要集中在以下几个方面: 时效性、多目标、多尺度、复杂环境和遮挡问题。当前的穿越行人检测技术大多数面向车载端, 这是自动驾驶智能车发展的必然方向。自动驾驶当前的目标是建立高效准确的穿越行人检测方法, 而在一些复杂场景下, 尤其是利用视觉信号进行行人穿越检测时, 存在很大的挑战。行人穿越检测很重要, 为了更好地检测行人穿越, 现阶段的主流新思路有如下几个。

(1) 驾驶员注意预测: 驾驶员会注意到可能发生穿越的行人, 结合自己的驾驶经验, 会进行关键目标选择^[57], 将这种机制融合到算法中可能会促进行人穿越检测性能提升。

(2) 联合注意角度: 驾驶员视觉注意和行人视觉注意角度在发生穿越时, 会产生交互, 这种交互信息的利用可以有望提高行人穿越判别准确度。

(3) 场景几何结构使用: 行人意图结合道路结构几何信息, 是研究行人穿越的关键信息, 比

如站在路边的行人与道路的角度越靠近 90° 穿越的概率越大。

(4) 多传感融合: 从车载传感角度出发在视频输入设备的基础上融合多种传感器技术进行检测, 比如融合红外设备、3D 激光雷达等。

(5) 车路协同技术: 随着国家布局车联网技术, 车路协同技术得以大力发展, 一些基于车路协同的穿越行人检测方法得到重视。其中, 可以利用路侧及路上布设的新式传感器, 进行行人穿越信号的识别, 并及时发送给自主车辆。由路上的设备来进行感知(或者做一些边缘计算工作), 这样, 昂贵的传感器成本转移到道路基础设施上, 给个人用户带来便利。

(6) 车联网技术: 伴随着国家布局的车联网技术的发展, 在单车智能自动驾驶中, 在车上安装摄像头、激光雷达、毫米波雷达等传感器, 让车辆能感知到周围的情况, 自动做出反应。但是, 单车智能存在不可避免的视觉盲区。假如在此区域内出现突然穿出的行人, 则对于车辆来说, 行人出现时减速已经无法及时避让。因此, 在行人穿越检测任务中, 车联网技术是一种有效手段。

参考文献

- [1] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报 2019 版[M]. 2020.
- [2] Wang Z, Mülling K, Deisenroth M P, et al. Probabilistic movement modeling for intention inference in human-robot interaction[J]. The International Journal of Robotics Research, 2013, 32(7): 841-858.
- [3] Hu Y, Zhan W, Tomizuka M. Probabilistic prediction of vehicle semantic intention and motion[C]. International Conference on Intelligent Vehicles Symposium (IV), Changshu, Su-zhou, China, 2018.

- [4] Xue J R, Fang J W, Zhang P. A survey of scene understanding by event reasoning in autonomous driving[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2018, 15(3): 249-266.
- [5] 张朝阳, 李星宏. 5G 在无人驾驶汽车中的应用前景分析[J]. *无人系统技术*, 2019, 2(2):65-68.
- [6] Schulz A T, Stiefelhagen R. A controlled interactive multiple model filter for combined pedestrian intention recognition and path prediction[C]. 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Gran Canaria, Spain, 2015.
- [7] Köhler S, Goldhammer M, Zindler K, et al. Stereovision-based pedestrian's intention detection in a moving vehicle[C]. 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Gran Canaria, Spain, 2015.
- [8] Bonnin S, Weisswange T H, Kummert F, et al. Pedestrian crossing prediction using multiple context-based models[C]. 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Qingdao, China, 2014.
- [9] Kooij J F P, Schneider N, Flohr F, et al. Context-based pedestrian path prediction[C]. European Conference on Computer Vision, Zurich, Switzerland, 2014.
- [10] Li X, Li L, Flohr F, et al. A unified framework for concurrent pedestrian and cyclist detection[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2016, 18(2): 269-281.
- [11] Ferguson S, Luders B, Grande R C, et al. Realtime predictive modeling and robust avoidance of pedestrians with uncertain, changing intentions[M]. *Algorithmic Foundations of Robotics XI*, Springer, Cham, 2015.
- [12] Furuhashi R, Yamada K. Estimation of street crossing intention from a pedestrian's posture on a sidewalk using multiple image frames[C]. *The First Asian Conference on Pattern Recognition*, Beijing, China, 2011.
- [13] Hariyono J, Jo K H. Detection of pedestrian crossing road: A study on pedestrian pose recognition[J]. *Neurocomputing*, 2017, 234: 144-153.
- [14] Schneemann F, Heinemann P. Context-based detection of pedestrian crossing intention for autonomous driving in urban environments[C]. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Daejeon, South Korea, 2016.
- [15] Englund C, Kovaceva J, Lindman M, et al. Using random forests for data mining data and drowsy driver classification using FOT data[C]. *Proceedings of On the Move to Meaningful Internet Systems*, Rome, Italy, 2012.
- [16] Englund C, Nilsson M, Voronov A. The application of data mining techniques to model visual distraction of bicyclists[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 52: 99-107.
- [17] Devroye L, Györfi L, Krzyżak A, et al. On the strong universal consistency of nearest neighbor regression function estimates[J]. *The Annals of Statistics*, 1994: 1371-1385.
- [18] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks[J]. *Communication of ACM*, 2017, 60(6): 84-90.
- [19] Varytimidis D, Alonso-Fernandez F, Duran B, et al. Action and intention recognition of pedestrians in urban traffic[C]. 2018 14th International Conference on Signalimage Technology & Internet-based Systems (SITIS), Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 2018.
- [20] Mínguez R Q, Alonso I P, Fernández-Llorca D, et al. Pedestrian path, pose, and intention prediction through gaussian process dynamical models and pedestrian activity recognition[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 20(5): 1803-1814.
- [21] Volz B, Behrendt K, Mielenz H, et al. A datadriven approach for pedestrian intention estimation[C]. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Rio de Janeiro, Brazil, 2016.
- [22] Wang X, Türetken E, Fleuret F, et al. Tracking interacting objects using intertwined flows[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 38(11): 2312-2326.
- [23] Butt A A, Collins R T. Multi-target tracking by lagrangian relaxation to mincost network flow[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Portland, OR, USA, 2013.
- [24] Berclaz J, Fleuret F, Turetken E, et al. Multiple object tracking using k-shortest paths optimization[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(9): 1806-1819.
- [25] Tang S, Andres B, Andriluka M, et al. Subgraph decomposition for multitarget tracking[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Boston, MA, USA, 2015.
- [26] Dehghan A, Modiri Assari S, Shah M. GMMCP tracker: Globally optimal generalized maximum multi clique problem for multiple object tracking[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Boston, MA, USA, 2015.
- [27] Milan A, Schindler K, Roth S. Detection-and trajectory-level exclusion in multiple object tracking[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Portland, OR, USA, 2013.
- [28] Wang B, Wang L, Shuai B, et al. Joint learning of convolutional neural networks and temporally constrained metrics for tracklet association[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, Las Vegas, NV, USA, 2016.
- [29] Leal-Taixe L, Canton-Ferrer C, Schindler K. Learning by tracking: Siamese CNN for robust target association[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, Las Vegas, NV, USA, 2016.
- [30] Son J, Baek M, Cho M, et al. Multiobject tracking with quadruplet convolutional neural networks[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Honolulu, HI, USA, 2017.
- [31] Ma C, Yang C, Yang F, et al. Trajectory factory: Tracklet cleaving and reconnection by deep siamese bigru for multiple object tracking[C]. 2018 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), San Diego, CA, USA, 2018.
- [32] Tang S, Andres B, Andriluka M, et al. Multiperson tracking by multicut and deep matching[C]. *European Conference on Computer Vision*, Amsterdam, The Netherlands, 2016.
- [33] Schuster S, Vernaza P, Choi W, et al. Deep network flow for mul-

- tiobject tracking[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Honolulu, HI, USA, 2017.
- [34] 房建武, 王贺, 薛建儒, 等. 基于视觉和激光数据融合的 3D 多目标跟踪[J]. 无人系统技术, 2019, 2(5): 24-29.
- [35] Wojke N, Bewley A, Paulus D. Simple online and realtime tracking with a deep association met-ric[C]. 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Beijing, China, 2017.
- [36] Fang K, Xiang Y, Li X, et al. Recurrent autoregressive networks for online multiobject tracking[C]. 2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), Lake Tahoe, NV, USA, 2018.
- [37] Sadeghian A, Alahi A, Savarese S. Tracking the untrackable: Learning to track multiple cues with longterm dependencies[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Venice, Italy, 2017.
- [38] Chen L, Ai H, Shang C, et al. Online multiobject tracking with convolutional neural networks[C]. 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Beijing, China, 2017.
- [39] Chu Q, Ouyang W, Li H, et al. Online multiobject tracking using CNN-based single object tracker with spatial-temporal attention mechanism[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Venice, Italy, 2017.
- [40] Kim C, Li F, Rehg J M. Multi-object tracking with neural gating using bilinear LSTM[C]. Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), Munich, Germany, 2018.
- [41] Jiang X, Li P, Li Y, et al. Graph neural based end-to-end data association framework for online multiple-object tracking[J]. ArXiv Preprint ArXiv:1907.05315, 2019.
- [42] Ma C, Li Y, Yang F, et al. Deep association: End-to-end graph-based learning for multiple object tracking with conv-graph neural network[C]. Proceedings of the 2019 on International Conference on Multimedia Retrieval, Ottawa, ON, Canada, 2019.
- [43] Li J, Gao X, Jiang T. Graph networks for multiple object tracking[C]. Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision, Snowmass Village, CO, USA, 2020.
- [44] Brasó G, Leal-Taixé L. Learning a neural solver for multiple object tracking[C]. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, WA, USA, 2020.
- [45] Weng X, Wang Y, Man Y, et al. GNN3DMOT: Graph neural network for 3D multi-object tracking with multi-feature learning[C]. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, WA, USA, 2020.
- [46] Weng X, Yuan Y, Kitani K. Joint 3d tracking and forecasting with graph neural network and diversity sampling[J]. ArXiv Preprint ArXiv:2003.07847, 2020.
- [47] Wang Y, Weng X, Kitani K. Joint detection and multi-object tracking with graph neural networks[J]. arXiv preprint arXiv:2006.13164, 2020.
- [48] Karasev V, Ayvaci A, Heisele B, et al. Intentaware long-term prediction of pedestrian motion[C]. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, Sweden, 2016.
- [49] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory[J]. Neural computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [50] Alahi A, Goel K, Ramanathan V, et al. Social LSTM: Human Trajectory Prediction in Crowded Spaces[C]. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2016.
- [51] Niccoló B, Zhang B, Conci N. Group LSTM: Group trajectory prediction in crowded scenarios[C]. European Conference on Computer Vision, Munich, GermanyCham, 2018.
- [52] Gupta A, Johnson J, Fei F L, et al. Social gan: Socially acceptable trajectories with generative adversarial networks[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018.
- [53] Vemula A, Muelling K, Oh J. Social attention: Modeling attention in human crowds[C]. 2018 IEEE international Conference on Robotics and Automation (ICRA), Brisbane, Australia, 2018.
- [54] Yang B, Yan G, Wang P, et al. TPPO: A novel trajectory predictor with pseudooracle[J]. ArXiv Preprint ArXiv:2002.01852, 2020.
- [55] Takuma Yagi, et.al. Future Person Localization in First-Person Videos[J]. In arXiv preprint arXiv: 1711.11217, 2017.
- [56] Lisotto M, Coscia P, Ballan L. Social and sceneaware trajectory prediction in crowded spaces[C]. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops, Seoul, Korea (South), 2019.
- [57] Fang J, Yan D, Qiao J, et al. DADA: Driver Attention Prediction in Driving Accident Scenarios[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, DOI: 10.1109/TITS. 2020. 3044678, 2021.

作者简介:



房建武 (1986-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能驾驶和智慧交通。本文通讯作者。



贾皓 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为交通视觉安全、智能交通。



朱晨 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为交通视觉安全、智能交通。



王贺 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为交通视觉安全、智能交通。



薛建儒 (1971-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为自动驾驶与人工智能。

[引用格式] 邓云山, 夏元清, 孙中奇. 基于松弛序列凸优化的轮式机器人协同轨迹规划[J]. 无人系统技术, 2021, 4(1): 24-32.

基于松弛序列凸优化的轮式机器人协同轨迹规划

邓云山, 夏元清, 孙中奇

(北京理工大学自动化学院, 北京 100081)

摘要: 针对威胁环境下的多智能体协同轨迹规划问题, 以轮式机器人为对象, 研究了基于序列凸优化方法的协同轨迹规划方法。首先通过对轮式机器人模型的分析, 给出单独轮式机器人实际物理约束, 同时以状态量、控制量加权为性能指标, 考虑运动学方程、避障避碰约束、个体物理性能约束、终端约束, 建立多轮式机器人协同轨迹规划问题; 其次, 对运动学方程、避障避碰约束进行凸化, 证明了满足凸化后的避障避碰约束的解也满足原始避障避碰约束, 并进行了几何直观解释; 然后, 将凸优化子问题进行离散化与松弛化, 采用序列凸优化架构进行问题求解; 最后, 通过数值仿真, 对比了松弛序列凸优化方法与现有非线性优化求解器的求解效率。结果表明, 松弛序列凸优化方法在尽可能保证最优性的同时大大缩短了计算时间, 具有一定工程意义。

关键词: 协同轨迹规划; 轮式机器人; 二阶锥优化; 序列凸优化; 松弛因子; 碰撞规避

中图分类号: TP13

文献标识码: A

文章编号: 2096-5915(2021)01-24-09

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.1.004

Coordination Trajectory Planning of Wheeled Robot Using Relaxation Sequential Convex Programming

DENG Yunshan, XIA Yuanqing, SUN Zhongqi

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at the problem of multi-agent coordination trajectory planning in threat environment, a method based on sequential convex optimization is proposed for wheeled robot. Firstly, through the analysis of the wheeled robot kinematic model, the actual input constraint of wheeled robot is given. The state variables and control variables are weighted as the cost. Secondly, a nonconvex cooperative trajectory planning problem of multi-wheeled robot is established, considering kinematics constraint, obstacle avoidance constraint, actual input constraint and terminal constraint. Thirdly, the nonconvex problem is convexified, and it is proved that the solution which satisfies the convex constraint also satisfies the original constraint, and then the convex subproblem is discretized and relaxed, the sequential convex optimization framework is adopted to solve the problem. Finally, the efficiency of numerical simulation is compared with the existing nonlinear optimization solver. The results show that the relaxation sequential convex optimization method can ensure the optimality as much as possible and greatly shorten the calculation time, which has a certain engineering significance.

Key words: Coordination Trajectory Planning; Wheeled Robot; Second-order Cone Optimization; Sequential Convex Optimization; Relaxation Factor; Collision Avoidance

收稿日期: 2020-10-31; 修回日期: 2020-12-09

基金项目: 中国国家重点研究与发展项目(2018YFB1003700); 国家自然科学基金国际交流与合作项目(61720106010)

1 引言

随着移动机器人技术的发展以及通信技术、计算机小型化技术的日益成熟, 将一个复杂的任务分配给多个结构、功能都相对简单的智能体来完成已经成为一个热门的研究方向^[1], 其中协同规划技术是多智能体协同技术中的重要组成部分。多智能体协同轨迹从建模方式上分为两类^[2], 第一类为基于简单的转弯半径与避碰约束的搜索方法, 如图搜索方法^[3]、树搜索方法^[4]、人工势场法^[5]等。这些搜索方法将模型约束进行了抽象化处理, 提炼成简单的几何约束, 从而进行搜索, 具有规划效率高、计算需求低的特点, 但缺点是未考虑完整的模型约束, 规划轨迹可能在实际中不可行。第二类为基于优化理论的方法, 将轨迹规划问题建模为优化问题, 求解方法主要包含伪谱法^[6]、混合整数规划方法^[7]、智能优化算法^[8]等。

随着凸优化理论的发展, 内点法可在多项式时间内对二阶锥优化问题进行有效求解^[9-10]。国内外众多学者利用凸优化技术针对不同对象进行了协同轨迹规划问题的求解。文献[11]利用序列凸优化方法求解了航天器集群变轨问题, 并给出了分布式策略架构; 文献[12]以最优时间为代价, 利用凸优化方法求解了无人机协同轨迹规划问题, 可实现无人机在时间上的协同; 文献[13]采用滚动时域架构, 将无人机协同轨迹规划问题转化为二次规划问题, 在一定程度上增加了求解效率, 并进行了室内飞行实验验证。同时, 凸优化方法还用于星球软着陆^[14]、再入飞行器轨迹规划^[15]等工程问题。

针对地面机器人的轨迹生成问题, 通常采用第一类搜索方法, 将路径与速度进行分解, 用样条插值等方法生成曲线路径^[16], 但面对协同轨迹规划中的复杂约束, 第一类搜索方法规划轨迹的可行性有局限。而第二类方法通常没有考虑优化问题的凸化, 直接使用非线性优化工具包进行求解, 大大增加了协同轨迹生成问题的求解时间。对此, 本文考虑具有非线性运动学方程的轮式机

器人模型, 考虑机器人物理性能约束、障碍规避约束、机器人避碰约束, 建立多轮式机器人轨迹规划优化模型。通过凸化与离散化方法, 将问题转化为序列二阶锥优化问题, 同时对问题进行松弛处理, 以提高问题可行性。最后, 通过数值仿真, 验证算法有效性。

2 问题描述

通过对轮式机器人运动学模型分析, 得到单个轮式机器人的物理约束。建立多轮式机器人协同轨迹规划问题模型, 含运动学方程、避障避碰约束、个体物理性能约束、终端约束及代价函数。

2.1 轮式机器人模型

轮式机器人是一个典型的具有非完整性约束的欠驱动系统^[17-18]。全局坐标系下, 其运动学方程可描述为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $[x, y]^T$ 为机器人在全局坐标系下的位置, $\theta \in (-\pi, \pi)$ 为速度方向与坐标轴 X 轴正向的夹角, v, ω 为实际控制量, v 为线速度, ω 为角速度。

如图 1 所示, v^L 与 v^R 分别为左右轮驱动线速度, 由于驱动电机机械特性, 驱动速度大小有界 $|v^L| \leq v_{\max}, |v^R| \leq v_{\max}$, 其中, v_{\max} 为单个轮子线速度上界。在无打滑假设下, 线速度 v , 角速度 ω 与双轮线速度满足如下等式^[19]:

$$\begin{cases} v = (v^L + v^R) / 2 \\ \omega = (v^L - v^R) / (2\rho) \end{cases} \quad (2)$$

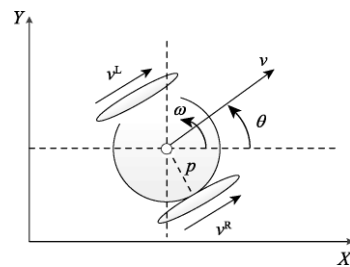


图 1 轮式机器人模型示意图
Fig. 1 Model of wheeled robot

其中, ρ 是左右轮间的半轴距。因此, 单个轮式机器人需满足约束:

$$|v| + \rho|\omega| \leq v_{\max} \quad (3)$$

2.2 协同轨迹规划问题

多个轮式机器人在运动过程中, 需要尽可能以较低能量抵达目标位置, 同时在运动过程中, 满足个体性能约束, 规避障碍物以及其余个体。

为方便后续序列迭代中的线性化, 将线速度也视为状态量, 则个体 i 的状态量为 $s_i = [x_i, y_i, \theta_i, v_i]^T$, 增加线速度导数 a 为控制量, 则个体 i 控制量为 $u_i = [\omega_i, a_i]^T$, 从而运动学方程可写为

$$\dot{s}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \\ \dot{v}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_i \cos \theta_i \\ v_i \sin \theta_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_i \\ a_i \end{bmatrix} = f(s_i) + Bu_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中, N 为机器人个数。

$$f(s_i) = \begin{bmatrix} v_i \cos \theta_i \\ v_i \sin \theta_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

为保证机器人运动安全, 各个机器人在任何时刻都应位于所有障碍区域之外, 后续凸化中, 圆形障碍较好处理, 而实际运动中的障碍可被有限个圆形障碍覆盖, 因此本文仅考虑圆形静态障碍。则障碍规避约束可表示为

$$\|Cs_i - p_{\text{obs},m}\|_2 \geq r_m + R_i, m = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

其中, $C = [I_{2 \times 2}, O_{2 \times 2}]$ 提取机器人状态量中的位置信息, $p_{\text{obs},m}$ 为第 m 个圆形障碍的位置坐标, r_m 为第 m 个圆形障碍的半径, R_i 为第 i 个机器人的避障半径, M 为圆形障碍个数。

同时多个机器人在运动过程中需要保证各个机器人相互避碰:

$$\|C(s_i - s_j)\|_2 \geq R_i + R_j, i, j = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

每个机器人需满足自身物理性能约束:

$$|v_i| + \rho_i|\omega_i| \leq v_{\max,i} \quad (8)$$

每个机器人的初始状态与终端状态给定, 分

别为

$$s_i(t_0) = s_{i,0}, s_i(t_f) = s_{i,f} \quad (9)$$

其中, t_0 为初始时刻, 通常取 $t_0 = 0$; t_f 为终端时刻, 均为给定的已知量。

综上, 以状态量与控制量加权二次型为性能指标, 其中状态量二次型加权物理意义包含了任务本身的特殊需求; 控制量二次型加权物理意义为能量最优需求。将多机器人协同轨迹规划问题建立为如下问题 (P1):

$$\text{P1: } \min_{s_i, u_i} \sum_{i=1}^N \int_{t_0}^{t_f} s_i^T Q_s s_i + u_i^T Q_u u_i dt \quad (10)$$

s. t. (4)(6)(7)(8)

其中, Q_s, Q_u 为加权因子。

3 约束凸化

P1 包含非线性等式约束(4), 非凸不等式约束(6)(7), 是一个典型的非凸优化问题, 由于现有的凸优化求解器要求目标函数和不等式约束函数均为凸函数, 等式约束函数是仿射函数^[2]。因此, 建立 P1 的凸化近似模型, 同时将优化问题描述为多项式时间求解的二阶锥优化问题。

3.1 运动学模型线性化

将式(4)所示的非线性动力学在基准 s_i^k 处线性化为

$$\dot{s}_i = A(s_i^k) s_i + Bu_i + C(s_i^k) \quad (11)$$

其中,

$$A(s_i^k) = \frac{\partial f}{\partial s_i}(s_i^k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -v_i^k \sin \theta_i^k & \cos \theta_i^k \\ 0 & 0 & v_i^k \cos \theta_i^k & \sin \theta_i^k \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C(s_i^k) = f(s_i^k) - A(s_i^k) s_i^k$$

为确保线性化精度, 增加信赖域约束

$$\|s_i - s_i^k\| \leq \delta \quad (13)$$

3.2 障碍规避约束凸化

将障碍规避约束(6)在基准轨迹 s_i^k 处线性化, 得到障碍规避约束的近似仿射不等式表达:

$$\frac{(Cs_i^k - p_{obs,m})^T}{\|Cs_i^k - p_{obs,m}\|} (Cs_i - Cs_i^k) + \|Cs_i^k - p_{obs,m}\| \geq r_m + R_i \quad (14)$$

定理 1: 当 s_i 满足凸化障碍规避约束(14)时, 必然满足原始障碍规避约束(6)。

证明: 由于范数满足三角不等式, 因此有

$$\|\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2\| \leq \lambda\|x_1\| + (1-\lambda)\|x_2\| \quad (15)$$

由向量范数具有连续性, 结合式(15)可得, 范数 $f_{\|\bullet\|}(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x}\|$ 为凸函数, 因此其黑塞矩阵 $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ 为半正定矩阵。将障碍规避约束(6)的左边进行带拉格朗日余项的泰勒展开得

$$\begin{aligned} & \|Cs_i - p_{obs,m}\|_2 = f_{\|\bullet\|_2}(Cs_i - p_{obs,m}) \\ & = f_{\|\bullet\|_2}(Cs_i^k - p_{obs,m}) + \left(f'_{\|\bullet\|_2}(Cs_i^k - p_{obs,m})\right)^T \\ & \cdot (Cs_i - Cs_i^k) + \frac{1}{2}(Cs_i - Cs_i^k)^T \mathbf{H}(C\xi_i - p_{obs,m}) \\ & \cdot (Cs_i - Cs_i^k) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & = \|Cs_i^k - p_{obs,m}\| + \frac{(Cs_i^k - p_{obs,m})^T}{\|Cs_i^k - p_{obs,m}\|} (Cs_i - Cs_i^k) + \\ & (Cs_i - Cs_i^k)^T \mathbf{H}(C\xi_i - p_{obs,m}) (Cs_i - Cs_i^k) \\ & \geq \|Cs_i^k - p_{obs,m}\| + \frac{(Cs_i^k - p_{obs,m})^T}{\|Cs_i^k - p_{obs,m}\|} (Cs_i - Cs_i^k) \end{aligned}$$

因此当凸化障碍规避约束(14)满足时, 障碍规避约束(6)也满足。

3.3 机器人避碰约束凸化

将机器人相互避碰约束(7)在基准轨迹 s_i^k, s_j^k 处线性化, 得到机器人相互避碰约束的近似仿射不等式表达:

$$\frac{(s_i^k - s_j^k)^T C^T}{\|C(s_i^k - s_j^k)\|_2} C(s_i - s_j) \geq R_i + R_j \quad (17)$$

定理 2: 当 s_i, s_j 满足凸化避碰约束(17)时, 必然满足原始避碰约束(7)。

其证明与上述障碍规避证明类似, 在此不做赘述。事实上, 从几何意义上也可对障碍规避约束凸化与避碰约束凸化进行说明, 如图 2、图 3 所示。其中, $p_i = Cs_i, p_j = Cs_j, p_i^k = Cs_i^k$ 。

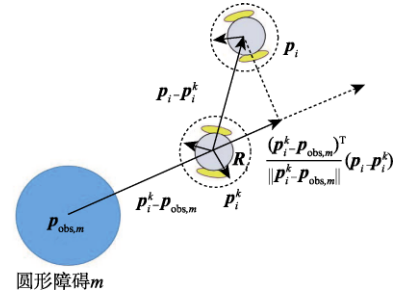


图 2 障碍规避约束凸化示意图

Fig. 2 Obstacle avoidance constraint convexity

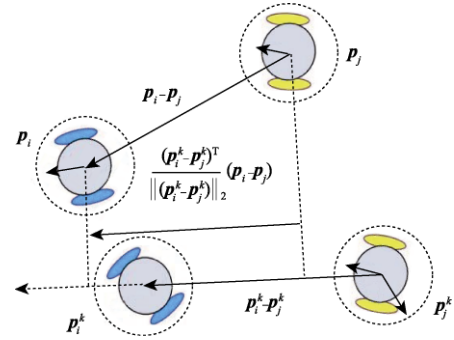


图 3 机器人避碰约束凸化示意图

Fig. 3 Collision avoidance constraint convexity

凸化障碍规避约束(14)中, 不等式左侧的第一项几何含义为机器人由基准位置指向当前位置的向量在由障碍物指向基准位置的向量上的投影, 第二项几何含义为障碍物到基准位置的距离。整个不等式含义为, 机器人需要在基准位置与障碍物连线上保持安全距离。如果机器人在基准位置与障碍物连线上保持了安全距离, 则一定在二维空间上与障碍物保持了安全距离, 即定理 1 所述。

凸化避碰约束(17)中, 不等式左侧几何含义为由机器人 j 当前位置指向机器人 i 当前位置向量在由机器人 j 基准位置指向机器人 i 基准位置向量上的投影。整个不等式几何含义为, 任意两机器人需要在其基准位置连线上保持安全距离。如果两机器人在其基准位置连线上保持了安全距离, 则在二维空间上, 两机器人不会碰撞, 即定理 2 所述。

4 序列凸优化求解

本节将建立序列二阶锥优化子问题 PP1^k, 进

而求解原始多机器人协同轨迹规划问题 P1。同时进行离散化,得到有限维二阶锥优化子问题 PP2^k。最后,为增加迭代过程中优化子问题的可行性,对某些约束进行松弛处理得到松弛子问题 PP3^k。

4.1 序列凸优化

序列凸优化将原始非凸优化问题转化为一系列可用现有求解器求解的凸优化子问题进行迭代求解,进而得到原始问题的近似解,图4为序列凸优化(SCP)算法流程。记所有机器人状态为 $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1^T, \mathbf{s}_2^T, \dots, \mathbf{s}_N^T]^T$, 控制量为 $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1^T, \mathbf{u}_2^T, \dots, \mathbf{u}_N^T]^T$ 。迭代求解步骤如下:

(1)初始化迭代次数 $k=0$,选择初始基准剖面 $\{\mathbf{S}^0\}$ 。

(2)迭代求解凸优化子问题 PP^k,得到解 $\{\mathbf{S}^{k+1}, \mathbf{U}^{k+1}\}$ 。

(3)检验是否满足收敛条件 $\|\mathbf{S}^{k+1} - \mathbf{S}^k\| \leq \varepsilon$ 。其中 ε 为自定义的收敛阈值,满足上式时,进入第四步;否则,以 $\{\mathbf{S}^{k+1}\}$ 为基准剖面,令 $k=k+1$,返回第二步。

(4)算法退出,获得原问题解。

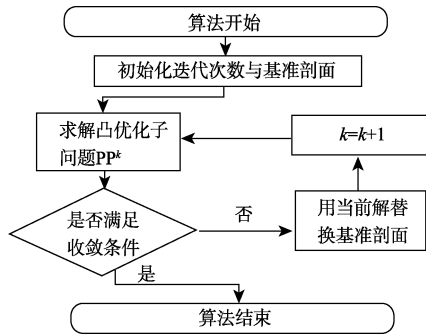


图4 序列凸优化(SCP)算法流程图

Fig. 4 SCP algorithm

结合第3节中相关约束的处理,原始多机器人协同轨迹规划问题 P1 的序列凸优化子问题 (PP1^k) 为

$$\text{PP1}^k: \min_{\mathbf{s}_i, \mathbf{u}_i} \sum_{i=1}^N \int_{t_0}^{t_f} \mathbf{s}_i^T \mathbf{Q}_s \mathbf{s}_i + \mathbf{u}_i^T \mathbf{Q}_u \mathbf{u}_i dt \quad (18)$$

s. t. (11)(14)(17)(13)(8)

4.2 离散化

由于 PP1^k 为无穷维问题,因此需要对时间进行离散化,将时间 $[t_0, t_f]$ 平均离散为 n 段,进而将无穷维优化问题转化为有限维优化问题。

记离散后的时间步长为 $\Delta t = (t_f - t_0) / n$,离散的时刻为 $\{t_0, t_1, \dots, t_n\}$,离散时刻满足 $t_l = t_0 + l\Delta t, l=1, 2, \dots, n$ 。

将目标函数离散化为

$$\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^n \Delta t (\mathbf{s}_{i,l}^T \mathbf{Q}_s \mathbf{s}_{i,l} + \mathbf{u}_{i,l}^T \mathbf{Q}_u \mathbf{u}_{i,l}) \quad (19)$$

由于时间步长 Δt 为常数,因此可以忽略。

参考文献[20]状态方程离散方式,将机器人线性运动学方程(11)离散如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_{i,l} = \mathbf{s}_{i,l-1} + \frac{\Delta t}{2} [& (\mathbf{A}_{i,l-1}^k \mathbf{s}_{i,l-1} + \mathbf{B} \mathbf{u}_{i,l-1} + \mathbf{C}_{i,l-1}^k) \\ & + (\mathbf{A}_{i,l}^k \mathbf{s}_{i,l} + \mathbf{B} \mathbf{u}_{i,l} + \mathbf{C}_{i,l}^k)], i=1, 2, \dots, N, l=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (20)$$

其中, $\mathbf{s}_{i,l} = \mathbf{s}_i(t_l)$, $\mathbf{A}_{i,l}^k = \mathbf{A}(\mathbf{s}_i^k(t_l))$, $\mathbf{C}_{i,l}^k = \mathbf{C}(\mathbf{s}_i^k(t_l))$ 。整理后得到离散运动学约束:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{i,l-1}^k \mathbf{s}_{i,l-1} - \mathbf{H}_{i,l}^k \mathbf{s}_{i,l} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{u}_{i,l-1} \\ + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{u}_{i,l} + \frac{\Delta t}{2} (\mathbf{C}_{i,l-1}^k + \mathbf{C}_{i,l}^k) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

其中,

$$\mathbf{H}_{i,l-1}^k = \mathbf{I} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{A}_{i,l-1}^k, \mathbf{H}_{i,l}^k = \mathbf{I} - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{A}_{i,l}^k \quad (22)$$

凸化障碍规避约束(14)离散化为

$$\begin{aligned} \frac{(\mathbf{C} \mathbf{s}_{i,l}^k - \mathbf{p}_{\text{obs},m})^T}{\|\mathbf{C} \mathbf{s}_{i,l}^k - \mathbf{p}_{\text{obs},m}\|} (\mathbf{C} \mathbf{s}_{i,l} - \mathbf{C} \mathbf{s}_{i,l}^k) \\ + \|\mathbf{C} \mathbf{s}_{i,l} - \mathbf{p}_{\text{obs},m}\| \geq r_m + R_i \end{aligned} \quad (23)$$

离散化后的障碍规避约束仅可保证在离散点处位于圆形障碍之外,无法保证两离散点间的障碍规避,因此增加约束(24),确保离散点间也满足障碍规避约束。

$$\begin{aligned} \frac{(\mathbf{C} \mathbf{s}_{i,l-1}^k - \mathbf{p}_{\text{obs},m})^T}{\|\mathbf{C} \mathbf{s}_{i,l-1}^k - \mathbf{p}_{\text{obs},m}\|} (\mathbf{C} \mathbf{s}_{i,l} - \mathbf{C} \mathbf{s}_{i,l-1}^k) + \\ \|\mathbf{C} \mathbf{s}_{i,l-1}^k - \mathbf{p}_{\text{obs},m}\| \geq r_m + R_i \end{aligned} \quad (24)$$

定理 3^[12]: 当机器人 i 在各个离散时刻的状态满足约束(23)(24)时, 其相邻两离散时刻位置的连线满足原始障碍规避约束。

证明: 考察时刻 t_l , 由于 t_l, t_{l-1} 时刻状态满足约束(24), 而约束(24)为凸约束, 因此任意 $s_{i,l}, s_{i,l-1}$ 连线上的点满足该凸约束(24)。由定理 1 得, t_l, t_{l-1} 时刻位置的连线上的点均满足初始障碍规避约束(6)。

利用数学归纳法可得, 当各个离散时刻的状态满足约束(23)(24)时, 相邻两离散时刻位置的连线也满足原始障碍规避约束。

凸化避碰约束(17)离散化为

$$\frac{(s_{i,l}^k - s_{j,l}^k)^T C^T}{\|C(s_{i,l}^k - s_{j,l}^k)\|_2} C(s_{i,l} - s_{j,l}) \geq R_i + R_j \quad (25)$$

信赖域约束(13), 物理性能约束(8), 离散化后变为

$$|s_{i,l} - s_{i,l}^k| \leq \delta_i \quad (26)$$

$$|v_{i,l}| + \rho_i |\omega_{i,l}| \leq v_{\max,i} \quad (27)$$

进而得到离散化后的凸优化子问题 PP2^k:

$$\text{PP2}^k: \min_{s_i, u_i} \sum_{i=1}^n \sum_{l=0}^n s_{i,l}^T Q_s s_{i,l} + u_{i,l}^T Q_u u_{i,l} \quad (28)$$

s. t. (21)(23)(24)(25)(26)(27)

4.3 松弛化

为提高迭代过程中, 凸优化子问题的可求解性, 对约束(21)(23)(24)(25)进行松弛处理, 松弛后的约束变为

$$\left\| \begin{aligned} & H_{i,l-1}^k s_{i,l-1} - H_{i,l}^k s_{i,l} + \frac{\Delta t}{2} u_{i,l-1} \\ & + \frac{\Delta t}{2} u_{i,l} + \frac{\Delta t}{2} (C_{i,l-1}^k + C_{i,l}^k) \end{aligned} \right\| \leq \delta_{1,i,l} \quad (29)$$

$$\frac{(Cs_{i,l}^k - p_{\text{obs},m})^T}{\|Cs_{i,l}^k - p_{\text{obs},m}\|} (Cs_{i,l} - Cs_{i,l}^k) + \|Cs_{i,l}^k - p_{\text{obs},m}\| \geq r_m + R_i + \delta_{2,i,l} \quad (30)$$

$$\frac{(Cs_{i,l-1}^k - p_{\text{obs},m})^T}{\|Cs_{i,l-1}^k - p_{\text{obs},m}\|} (Cs_{i,l} - Cs_{i,l-1}^k) + \|Cs_{i,l-1}^k - p_{\text{obs},m}\| \geq r_m + R_i + \delta_{3,i,l} \quad (31)$$

$$\frac{(s_{i,l}^k - s_{j,l}^k)^T C^T}{\|C(s_{i,l}^k - s_{j,l}^k)\|_2} C(s_{i,l} - s_{j,l}) \geq R_i + R_j + \delta_{4,i,j,l} \quad (32)$$

$$\delta_{1,i,l} \geq 0, \delta_{2,i,l} \geq 0, \delta_{3,i,l} \geq 0, \delta_{4,i,j,l} \geq 0 \quad (33)$$

其中, $\delta_{1,i,l}, \delta_{2,i,l}, \delta_{3,i,l}, \delta_{4,i,j,l}$ 为松弛因子, 需在约束中约束其大于 0, 在目标函数中增加惩罚项使约束尽可能满足, 得到松弛后的凸优化子问题 PP3^k:

$$\text{PP3}^k: \min_{s_i, u_i} \sum_{i=1}^n \sum_{l=0}^n (s_{i,l}^T Q_s s_{i,l} + u_{i,l}^T Q_u u_{i,l} + \alpha_1 \delta_{1,i,l} + \alpha_2 \delta_{2,i,l} + \alpha_3 \delta_{3,i,l} + \alpha_4 \sum_{j=1, j \neq i}^N \delta_{4,i,j,l}) \quad (34)$$

s. t. (29)(30)(31)(32)(33)(26)(27)

其中, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 为松弛因子的惩罚因子, 通常定义为足够大的正数。

5 仿真结果及分析

面向多轮式机器人协同轨迹规划问题, 以障碍环境下的队形重构为例, 开展数值仿真, 仿真硬件环境为 Intel Core i5-9400F 2.9GHz PC, 编程环境为 Matlab 2019b, 凸优化子问题采用 YALMIP 进行问题建模, 采用 ECOS 求解器进行求解。最后进行不同规模轨迹规划仿真, 与直接使用非线性最优控制工具包进行效率对比, 非线性优化采用最优控制工具箱 ICLOCS 进行问题建模, 采用 IPOPT 求解器进行求解。

障碍环境下的队形重构任务需要多机器人在给定时间从初始状态抵达目标状态, 并且在过程中, 保证机器人与圆形障碍的避撞及机器人之间的相互避碰。

以 8 对轮式机器人 $N=16$ 为例, 展示位置互换规划结果。轮式机器人左右轮间的半轴距 $\rho=0.0267$ m, 单个轮子线速度上界 $v_{\max}=0.13$ m/s。一对机器人以状态 1/2 分别为初始状态与目标状态进行队形重构, 状态设置如表 1 所示。

初始信赖域约束 δ_i 的选择应恰好包括所有个体在执行任务时可能的状态, 取值过大可能会降低求解效率。信赖域衰减是收敛性的保障, 但衰

减过快会导致求解失败，衰减过慢则增加求解时间，应选择适中的信赖域衰减方式。

表1 轮式机器人始末状态
Table 1 Starting and ending states of robot

机器人编号	状态 1/(m,m,rad,m/s)	状态 2/(m,m,rad,m/s)
1	[-2,2,0,0]	[2,-2,0,0]
2	[-1,2,0,0]	[1,-2,0,0]
3	[0,2,0,0]	[0,-2,0,0]
4	[1,2,0,0]	[-1,-2,0,0]
5	[2,2,0,0]	[-2,-2,0,0]
6	[-2,1,0,0]	[2,-1,0,0]
7	[2,1,0,0]	[-2,-1,0,0]
8	[-2,0,0,0]	[2,0,0,0]

三个圆形障碍物 $M=3$ 设置如表 2 所示。

表2 圆形障碍物参数
Table 2 Circular obstacle setting

编号	圆心/(m,m)	半径/m
1	[0,-0.5]	0.2
2	[-0.3,1]	0.4
3	[1,-1]	0.2

序列凸优化算法参数设置如表 3 所示。

表3 序列凸优化算法参数
Table 3 Algorithm parameters of SCP

参数	参数描述	值
R	机器人避障半径	0.15 m
n	时间离散个数	50
δ_k	第 k 次迭代信赖域约束	$\frac{1}{2^{k-1}} [4 \text{ m}, 4 \text{ m}, 2\pi, 0.26 \text{ m/s}]$
ε	收敛准则	0.01
Q_s	状态量加权因子	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Q_u	控制量加权因子	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}$
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$	惩罚因子	10000

由于状态量第四个分量为实际控制量中的 v ，因此状态量加权因子 Q_s 的前三个对角元为零，仅用第四个对角元对实际控制量 v 进行二次加权。同理，控制量加权因子 Q_u 第一个对角元表

示了对实际控制量 u 的二次加权，因此其与 Q_s 第四个对角元量级相同。上述两参数取值物理意义为轮式机器人运动过程中能量最优。而控制量加权因子 Q_u 第二个对角元减少了实际控制量 v 的变化，使得轨迹更加平滑，一般选取数值的数量级较小。

惩罚因子 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ，对约束进行惩罚，一般取值较大以保证约束的满足。

仿真中，初始基准剖面选取为起始状态到目标状态的平均离散，该方法选取的初始基准剖面不一定满足初始问题 P1 的动力学约束，随着迭代过程的增加，信赖域逐渐减小，最终收敛轨迹可在设定误差范围内满足 P1 问题动力学约束。

针对上述设置的场景，求解机器人编队重构轨迹规划问题，轨迹规划结果如图 5 所示，各个机器人均可抵达目标状态并且与圆形障碍保持安全距离，且在约束触发时各个机器人都从障碍边擦过，位于约束的临界状态。机器人相互避碰约束满足情况如图 6 所示，机器人两两最小间距始终大于避碰安全距离，机器人在编队重构过程中满足相互避碰约束。物理性能约束满足情况如图 7 所示，物理性能指标（即式(3)左端）的最大值始终小于单轮速度上界，各个机器人在编队重构过程中满足个体物理性能约束。

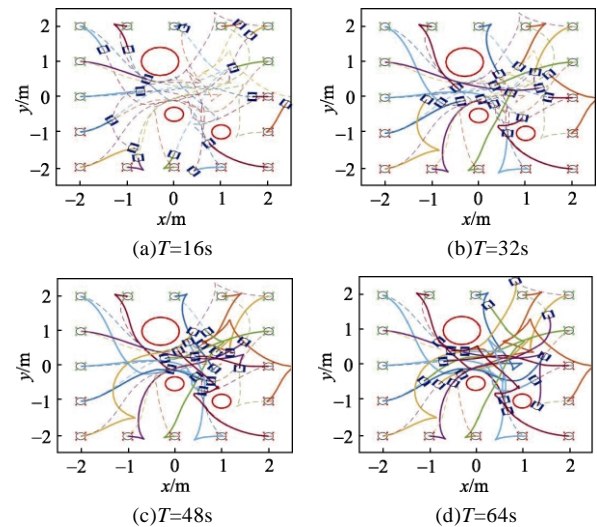


图5 规划轨迹结果图

Fig. 5 Planning trajectory result

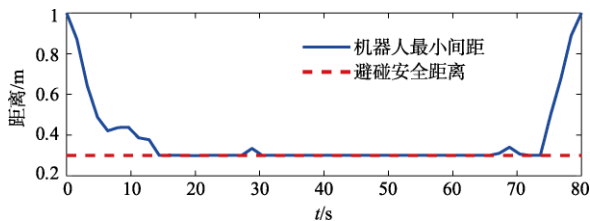


图 6 避碰约束满足情况
Fig. 6 Obstacle avoidance constraint satisfaction result

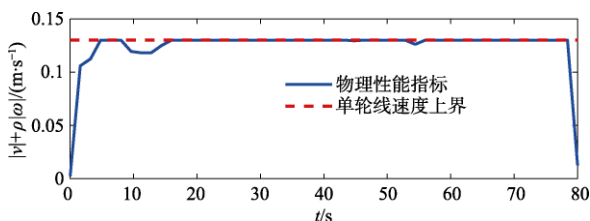


图 7 个体物理性能约束满足情况
Fig. 7 Collision avoidance constraint satisfaction result

针对上述设置的场景, 分别求解机器人对数为 1 到 8 的编队重构轨迹规划, 对比 SCP 方法与非线性优化工具包 ICLOCS 在不同问题规模下的性能。当编队数量为 8 ($N=8$) 时, 编队由 1~4 对机器人组成。

使用 SCP 方法和 ICLOCS 分别求解不同编队数量的队形重构轨迹规划, 多次统计求解时间与代价值进行对比。平均求解时间对比结果如图 8 所示, 两种方法求解时间均随机器人个数增加而增加, SCP 求解时间远远小于 ICLOCS 工具包求解时间。但从代价对比结果 (图 9) 来看, SCP 在机器人数量较少时最优性更好, 数量增加时 ICLOCS 代价值更小。其原因为 ICLOCS 在优化过程中具有一定的随机性, 每次优化的结果不同, 这就使得其在面对多峰值高维问题时, 较容易跳出局部

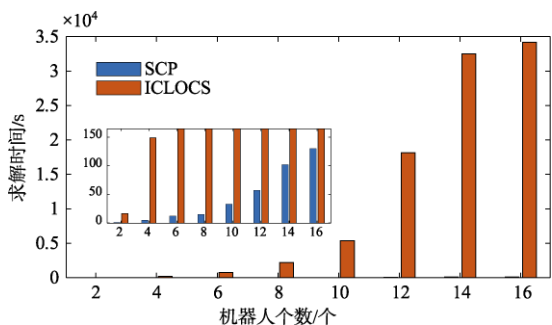


图 8 平均求解时间对比
Fig. 8 Comparison of solution time

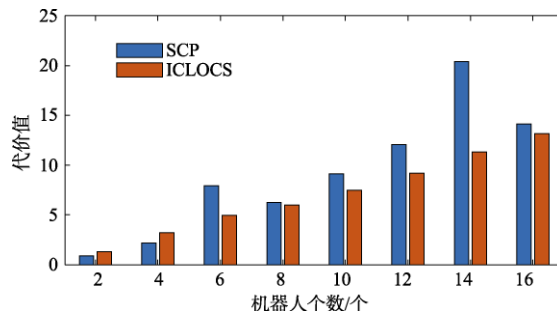


图 9 平均求解代价对比
Fig. 9 Comparison of solution cost

最优的状态, 进而在时间足够的情况下得到较优的优化结果。实际应用中, 需要考虑最优性与计算时间两方面的均衡, SCP 方法在尽可能保证最优性的同时大大缩短了计算时间, 具有工程意义。

6 结 论

本文针对多轮式机器人协同轨迹规划问题, 根据现实物理约束, 建立优化问题。将原始非线性优化问题转化为二阶锥优化问题, 利用序列凸优化思想进行求解, 进行仿真验证并得出了下面主要结论:

- (1)建立了多轮式机器人协同轨迹规划的非线性优化问题, 考虑了障碍规避、相互避碰以及机器人实际物理约束。
- (2)对问题进行了凸化, 包含运动学线性化、避障约束凸化、避碰约束凸化, 并讨论了约束凸化的物理含义。使用梯形近似对问题进行离散化, 并给出问题松弛处理方法。
- (3)给出松弛 SCP 方法求解协同轨迹规划问题的框架, 并通过具体算例的数值仿真和对比验证了方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] 林敏, 夏元清, 吴爽. 多智能体领航跟随一致性和轨迹跟踪问题研究[J]. 无人系统技术, 2018, 1(3): 25-32.
- [2] 王祝, 刘莉, 龙腾, 等. 基于罚函数序列凸规划的多无人机轨迹规划[J]. 航空学报, 2016, 37(10): 3149-3158.
- [3] 刘大卫, 孙静, 龙腾, 等. 基于分层稀疏 A-*算法的突防航迹规划研究[J]. 战术导弹技术, 2017 (6):37-43.
- [4] Karaman S, Walter M R, Perez A, et al. Anytime motion plan-

- ning using the RRT*[C]. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China, May 9-13, 2011.
- [5] 石为人, 黄兴华, 周伟. 基于改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 计算机应用, 2010, 30(8): 2021-2023.
- [6] Huntington G T, Rao A V. Optimal reconfiguration of spacecraft formations using the Gauss pseudospectral method[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2012, 31(3): 689-698.
- [7] Richards A G, How J P. Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed integer linear programming[C]. American Control Conference. IEEE, 2002.
- [8] Kamyar R, Taheri E. Aircraft optimal terrain/threat-based trajectory planning and control[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014, 37(2): 466-483.
- [9] 张胜祥, 裴海龙, 刘保罗, 等. 基于滚动时域优化的无人飞行器轨迹规划[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(35): 237-239.
- [10] Andersen E D, Roos C, Terlaky T. On implementing a primal-dual interior-point method for conic quadratic optimization[J]. Mathematical Programming, 2003, 95(2): 249-277.
- [11] Morgan D, Subramanian G P, Chung S J, et al. Swarm assignment and trajectory optimization using variable-swarm, distributed auction assignment and sequential convex programming [J]. International Journal of Robotics Research, 2016, 35(10): 1261-1285.
- [12] Wang Z, Liu L, Long T. Minimum-time trajectory planning for multi-unmanned-aerial-vehicle cooperation using sequential convex programming [J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2017, 40(11): 2972-2978.
- [13] Luis C E, Schoellig A P. Trajectory generation for multiagent point-to-point transitions via distributed model predictive control [J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2018:1-8.
- [14] Yang R, Liu X. Fuel-optimal powered descent guidance with free final-time and path constraints[J]. Acta Astronautica, 2020, 172: 70-81.
- [15] Liu X, Shen Z, Lu P. Entry trajectory optimization by second-order cone programming[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2016, 39(2): 227-241.
- [16] 余卓平, 李奕姗, 熊璐. 无人车运动规划算法综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 1150-1159.
- [17] 尤波, 王明睿, 李智, 等. 基于模型预测控制的轮式移动机器人轨迹规划[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(4): 591-600.
- [18] Ren W, Beard R W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control: theory and applications [M]. London: Springer London, 2008.
- [19] 孙中奇. 轮式机器人跟踪控制研究: 模型预测控制方法[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [20] Lu P, Liu X F. Entry trajectory optimization by second-order cone programming [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2016, 39(2), 227-241.

作者简介:



邓云山 (1997-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多智能体协同轨迹规划。



夏元清 (1971-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为网络化信息处理与控制。本文通讯作者。



孙中奇 (1986-), 男, 博士后, 助理教授, 主要研究方向为多智能体模型预测控制。

[引用格式] 邵艳敏, 张佩瑜, 周建山, 等. 节点缓存受限场景下车载自组织网络拥堵特性研究[J]. 无人系统技术, 2021, 4(1): 33-43.

节点缓存受限场景下车载自组织 网络拥堵特性研究

邵艳敏, 张佩瑜, 周建山, 田大新

(北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 车载自组织网络作为一种新型的移动自组织网络, 是智能交通系统的关键组成部分。近年来, 社会各界对车载自组织网络的拥堵性进行了广泛研究, 但却忽略了车载自组织网络中移动节点缓存空间有限的现实问题。因此, 针对节点缓存受限场景下车载自组织网络的拥堵性问题进行了研究, 通过设计来优化网络中数据包的传递过程。仿真实验的结果表明, 提出的多跳路由策略可以有效降低网络通信过程的时延和丢包率; 节点缓存在一定范围内增加可以提高网络的通信能力; 节点通信半径或数据包传递能力的增加可使网络处理数据包的数量提高 1.1 倍。所建立的研究方法和得到的研究结论可为设计和优化车载自组织网络提供科学依据。研究表明, 车载自组织网络的拥堵性研究还存在许多关键技术未突破, 节点缓存受限场景下的多跳路由策略优化了网络中数据包传递过程, 提高了网络通信效率和可靠性。

关键词: 车载自组织网络; 多跳路由策略; 车-车通信; 数据包丢失; 网络拥堵

中图分类号: V279 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)01-33-11

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.1.005

Research on Congestion Characteristics of Vehicular Ad Hoc Networks under Limited Node Cache

SHAO Yanmin, ZHANG Peiyu, ZHOU Jianshan, TIAN Daxin

(Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: As a novel type of mobile Ad Hoc Network, the Vehicular Ad Hoc Network (VANET) has become an important component of the intelligent transportation system. Currently, many researchers have been engaged in the research on the congestion of VANET. However, few of them have noticed the practical problem of limited cache of mobile nodes in VANET. Therefore, the congestion problem of VANET under limited node cache is studied, and the data packet delivery process in the network by designing a multi-hop routing strategy is optimized. Simulation results show that the multi-hop routing strategy proposed in this paper can effectively reduce the delay and packet loss rate of the communication process in VANET. The increase of the node cache within a certain range can improve the communication capacity of VANET. The number of data packets processed in VANET can be increased by 1.1 times through increasing node communication radius or data packet delivery capability. The research methods and conclusions can provide reference for designing and optimizing VANET for future researches. Studies show that there are still many tech-

收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2021-01-04

基金项目: 北京航空航天大学“卓越百人”博士后支持计划; 国家自然科学基金(61672082, 61822101); 北京市自然科学基金(L191001, 4181002); 牛顿高级学者基金(62061130221)

nologies in the research the congestion problem of VANET under limited node cache that has not yet been broken through. The multi-hop routing strategy in the context of node cache limitation optimizes the data packet delivery process in the network and improves the efficiency and reliability of network communication.

Key words: VANET; Multi-hop Routing Strategy; V2V; Packet Loss; Network Congestion

1 引言

随着智能交通系统的飞速发展,车载自组织网络作为智能交通系统的重要组成部分,引起了相关领域学者的广泛关注。车载自组织网络是一种移动自组织网络,通过车辆与车辆通信、车辆与基础设施通信实现交通系统的信息交互,其在交通安全预警、交通信号配时以及为交通参与者提供信息服务等方面都具有巨大潜力,可以有效提升交通系统的安全性和运行效率^[1]。但智能交通系统中网联车数量的增加,使得车载自组织网络中所传递的数据包数量急剧增长,导致无线信道在数据包传递过程中发生拥堵,从而降低网络性能和数据包传递过程的可靠性。车载自组织网络中的节点具有移动性,网络的拓扑结构频繁变化^[2-3],也会导致车载自组织网络的通信性能降低。

探索新的路由策略^[4-6]和优化网络资源^[7-8]是解决车载自组织网络拥堵性问题的有效方法。文献[9-10]对车载自组织网络的拥堵性问题进行了研究,通过提出新的路由策略来缓解网络在通信过程中的拥堵性问题,有效提高了整个交通网络的通信效率。文献[11]提出了一种基于位置的混合机会主义路由策略,该路由策略在进行路径选择时,为候选节点确定对应的优先级,然后根据数据传输的不同需求进行节点选择,极大地降低了丢包率和端到端延迟,提高了网络的通信性能。文献[12-13]所提出的基于其他场景的路径规划算法,如最小一致性算法等可以为车载自组织网络中路由策略的设计提供新的思路。文献[14]通过引入边缘计算的概念,以车载自组织网络中的车辆作为边缘计算节点,将需要传递的数据经边缘计算车辆转发至目标车辆,从而降低数据传递过程的时延和节点负载,有效改善车载自组织网络的拥堵性问题。

但在以前对车载自组织网络拥堵性问题的研究中,通常假定节点缓存是无限的,而在现实的车载自组织网络中,节点缓存往往会受到各项技术发展的制约。在车载自组织网络进行通信的过程中,如果节点内数据包的生成速度大于其处理速度,数据包将在节点内积聚,而由于节点缓存有限,在节点内将发生数据包拥堵的现象。因此,为了将数据包成功传递至其目标节点,并且避免数据包在传递过程中丢失,在进行数据包传递的路径选择时,应主要考虑节点拥堵程度的动态影响^[15]。由于车载自组织网络的高移动性,网络的拓扑结构将发生频繁变化,因此可能会引起车辆与车辆通信、车辆与基础设施通信过程的链路间歇性断开,从而导致网络通信不可靠,甚至导致车载自组织网络发生数据包丢失的情况。为了克服车辆移动性和链路间歇性连接带来的网络通信不可靠和拥堵性的问题,文献[16]提出了一种基于车辆与车辆通信场景的高效缓存策略,将数据包缓存在车辆节点尚未使用的存储空间内,提高了车载自组织网络的通信性能。但由于车辆节点的缓存有限,因此在设计缓存策略时,需要根据所传递信息重要程度的不同,执行不同的缓存策略。

本文针对节点缓存受限场景下车载自组织网络的拥堵性问题进行研究,其应用场景如图1所示,车载自组织网络的通信过程有车辆与车辆通信、车辆与基础设施通信,以及云端接收网络中数据并向车辆和基础设施进行反馈。本文聚焦车载自组织网络中车辆与车辆通信过程,其示意图如图2所示,目的是通过设计路由策略,优化车辆之间的数据包传递过程,并通过调整网络的相关参数,优化网络资源,从而改善网络的拥堵性,提高车载自组织网络的通信性能。

本文的主要贡献如下:

(1) 通过建立车载自组织网络模型,对节点

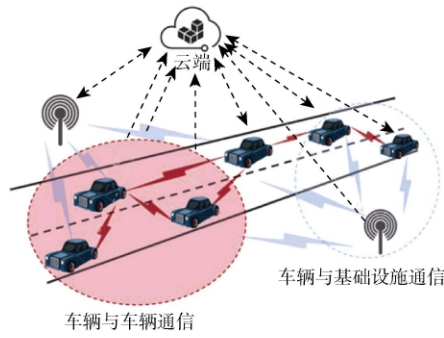


图 1 应用场景图

Fig. 1 Application scenario diagram

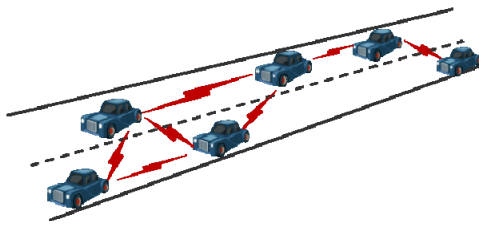


图 2 车辆与车辆通信示意图

Fig. 2 V2V communication schematic diagram

缓存受限场景下车载自组织网络的拥堵特性进行研究。

(2) 针对车载自组织网络中的车辆与车辆通信环节, 本文设计了一种多跳路由策略, 对数据包传递过程进行优化。该路由策略可以有效降低车载自组织网络的丢包率和时延, 提高实际到达目标节点的数据包数量, 从而改善网络的拥堵性问题, 提高网络的通信效率, 增强网络的通信性能。

(3) 通过仿真实验探究车载自组织网络中不同参数对网络拥堵性的影响。在一定区间范围内增加节点缓存可以减少数据包丢失的数量, 提高网络的通信能力和通信性能, 超过此区间范围再增加节点缓存反而会导致网络系统进入不稳定的状态, 此时并不能达到改善网络性能的目的, 反而会造成资源浪费; 节点通信半径和数据包传递能力的提高可以使得网络处理数据包的数量提高 1.1 倍。

2 系统模型

为了对节点缓存受限场景下车载自组织网络

的拥堵特性进行研究, 本文建立了系统模型。该系统模型由网络模型和通信模型两部分组成, 其中网络模型将对车载自组织网络的物理结构和节点间距离进行设计与定义, 通信模型将介绍数据包传递过程的通信模式。

2.1 网络模型

将 m 定义为车载自组织网络中的节点个数, 随机选择每个节点在网络中的初始位置, 在每个时间步 t 内, 节点随机移动, 移动过程中节点的位置变化规则^[1]如下:

$$\begin{aligned} x_i(t+1) &= x_i(t) + v \cos \varphi_i(t+1) \\ y_i(t+1) &= y_i(t) + v \sin \varphi_i(t+1) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $x_i(t+1)$ 和 $x_i(t)$ 分别是节点 i 在时间步 $t+1$ 和时间步 t 时的水平坐标, $y_i(t+1)$ 和 $y_i(t)$ 分别是节点 i 在时间步 $t+1$ 和时间步 t 时的垂直坐标; v 是节点的移动速度, 且网络中每个节点的移动速度相同; $\varphi_i(t+1)$ 是节点 i 在时间步 $t+1$ 时的移动方向, 且 $\varphi_i(t+1)$ 是 $[0, 2\pi)$ 之间的随机数。

由于网络内的节点具有移动性, 其位置随时间而改变, 为了缩小节点的分布范围, 本文设置了周期性边界条件对节点的移动范围进行限制, 即当节点从一个边界移动到网络外时, 节点将从其相反的边界再次进入网络。考虑到交通网络的形态特点, 并为了降低网络模型的计算复杂度, 将周期性边界设置为边长为 L 的正方形区域^[17]。

本文采用闵氏距离描述节点之间的位置关系^[11], 在时间步 t , 节点 i 和节点 j 之间的闵氏距离定义为

$$ED_{ij}(t) = \left[(x_i - x_j)^\rho + (y_i - y_j)^\rho \right]^{\frac{1}{\rho}} \quad (2)$$

其中, ρ 为常数, 由于该网络模型是二维空间内的车载自组织网络模型, 因此, 本文中取 $\rho = 2$ 。

网络模型中的每个节点都具有相同的通信半径 r , 当节点之间的闵氏距离小于 r 时, 节点之间存在连边, 可以相互连通。网络模型的拓扑结构如图 3 所示, 由于节点位置随时间而变化, 因此, 拓扑结构不是固定不变的, 而是随着时间变化的。

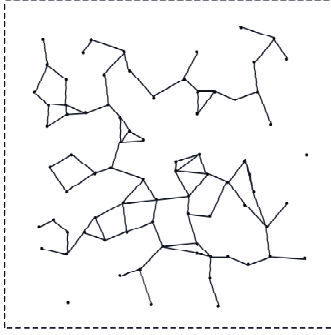


图3 拓扑结构图

Fig. 3 Topological structure

2.2 通信模型

网络模型中的节点通过无线链路彼此通信，且每个节点都具有相同的通信半径 r ，当节点之间的闵氏距离小于 r 时，节点可以相互通信。并且节点 i 通信范围内的所有节点被视为该节点的临时邻居。

网络模型中的每个节点都可以生成、缓存、接收和传递数据包。在每个时间步 t 内，每个节点均以相同的概率 p 生成数据包，生成的数据包可能被传递到网络中的其他节点。当节点中的数据包数量大于 1 时，数据包将在其所在节点中进行排队，并且排队规则为先进先出规则。由于节点缓存受限，在每一个时间步内，只能缓存有限个数据包，本文为每个节点设置了相同的缓存 S ，即每个节点中的数据包队列长度不能超过 S 。在时间步 t 内，节点可以向网络中的其他节点传递数据包，但其传递能力有限，本文设置每个节点最多可以传递 T 个数据包到其他节点。

在每个时间步 t ，随机选择数据包的目标节点，为了将节点内的数据包传递至其目标节点，数据包将在其所在节点的临时邻居内执行本地搜索，若数据包的目标节点是其当前所在节点的临时邻居，则该数据包将在下一个时间步 $t+1$ 内直接传递至目标节点，随即从网络中删除。若该数据包的目标节点不是其当前所在节点的临时邻居，则通过多跳路由策略选择合适的临时邻居进行数据包的传递。多跳路由策略的具体内容将在 2.3 节进行详细介绍。

在时间步 t ，节点 i 处的净流量 $F_i(t)$ 表示为

$$F_i(t) = I_i(t) - O_i(t) + C_i(t) \quad (3)$$

其中， $I_i(t)$ 为节点 i 接收的数据包个数， $O_i(t)$ 为节点 i 传递至其他节点的数据包个数， $C_i(t)$ 为节点 i 生成的数据包个数。由于在时间步 t 内，每个节点最多可以将 T 个数据包传递到其当前的临时邻居，所以有 $O_i(t) \leq T$ 。当计算得到节点 i 处净流量 $F_i(t)$ 的数值，便可以对时间步 $t+1$ 时节点 i 的数据包队列长度 $q_i(t+1)$ 进行更新，且其更新规则如下：

$$q_i(t+1) = \begin{cases} 0 & q_i(t) + F_i(t) \leq 0 \\ q_i(t) + F_i(t), & 0 < q_i(t) + F_i(t) < S \\ S & S \leq q_i(t) + F_i(t) \end{cases} \quad (4)$$

由于节点的缓存受限，在上述网络模型中可能会发生数据包丢失的现象。对于每个节点 i ，当 $S \leq q_i(t) + F_i(t)$ 时，由于数据包队列长度超出节点缓存，因此，超出缓存的数据包将会丢失，即在 $t+1$ 时，节点 i 将会丢失 $q_i(t) + F_i(t) - S$ 个数据包，而数据包的丢失可能发生在其生成过程或传递过程中，且数据包的丢失意味着网络发生拥堵。

2.3 多跳路由策略设计

在数据包传递的过程中，若数据包的目标节点不是其当前所在节点 i 的临时邻居，则需要通过路由策略引导使得数据包经由一个或多个中间节点的转发，最终传递至目标节点。为此，本文设计了多跳路由策略如下。

若在时间步 t ，数据包所在节点为 i ，其目标节点为 j ，并且目标节点 j 不是节点 i 的临时邻居，则对于节点 i 的每个临时邻居 e ，距目标节点 j 都有一个有效距离，表示为

$$D_{ej}(t) = k \frac{ED_{ej}(t)}{L'} + (1-k)M_e(t) \quad (5)$$

其中， k 是可调参数，并且 $0 \leq k \leq 1$ ； $ED_{ej}(t)$ 的物理意义是中间节点与目标节点之间的闵氏距离； $M_e(t)$ 的物理意义是时间步 t 时节点 e 的缓存占有率。表示为

$$M_e(t) = \frac{q_e(t)}{S} \quad (6)$$

其中， $q_e(t)$ 是节点 e 在时间步 t 时缓存的数据包队列长度，由于节点中数据包队列长度不能超出

节点的缓存, 因此有 $0 \leq M_e(t) \leq 1$ 。为了将等式 (5) 中的第一项和第二项控制在同一数量级, 本文将 L' 设置为 $L' = L/2$ 。

中间节点与目标节点之间的闵氏距离越大, 则传递过程所花费的时间越长; 中间节点的缓存占有率越大, 则数据包在节点内的缓存时间越长, 且当中间节点的缓存已被完全占用时, 数据包将由于无法成功通过该中间节点进行转发而丢失。由于中间节点的缓存占有率及其与目标节点间的闵氏距离对数据包传递过程的优化程度不同, 引入可调参数 k 对其进行加权处理。在对数据包进行转发时, 为了降低数据包到达目标节点所花费的时间, 避免车载自组织网络发生拥堵, 在时间步 $t+1$, 数据包将由节点 i 传递至距离目标节点有效距离最短的节点 e 。数据包到达节点 e 后, 在节点的数据包队列中进行排队, 按照通信模型中的传递方式进行循环, 直至数据包被传递至目标节点。

如果数据包当前所在节点 i 没有临时邻居, 数据包将继续在节点 i 中缓存, 并在下一时间步进行传递。以节点 i 内的一个数据包传递过程为例, 绘制的流程图如图 4 所示。

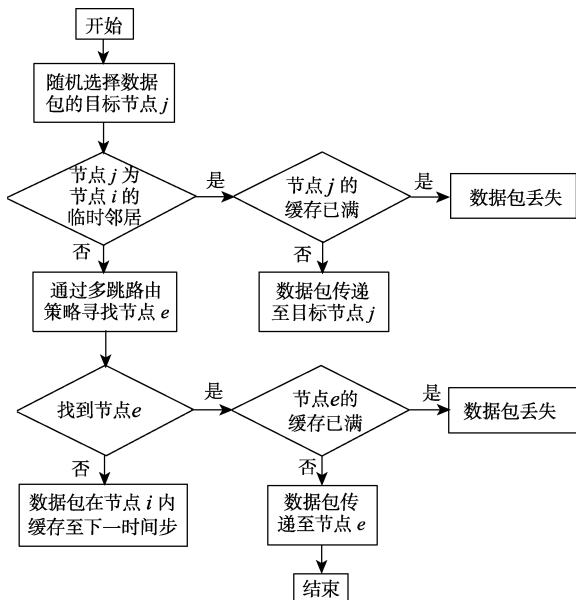


图 4 多跳路由策略下数据包传递过程流程图
Fig. 4 Flow chart of packet delivery process under multi-hop routing strategy

3 仿真实验及结果分析

为了探究节点缓存受限场景下车载自组织网络的拥堵特性, 本文通过对所提出的系统模型进行仿真实验, 观测丢包率、时延和流量三个参数的变化状态, 来评价和分析不同条件下网络的拥堵特性。

丢包率定义为车载自组织网络运行过程中丢失的数据包数量占实际产生的数据包总数的百分比; 时延定义为实际到达目标节点的数据包在传递过程中所花费的时间, 包括传递时延和缓存时延两部分, 其中缓存时延为数据包在中间节点内排队等待传递的时间; 流量定义为在车载自组织网络运行过程中实际到达目标节点的数据包总数。

3.1 网络运行状态

要对网络的拥堵特性进行研究, 首先需要确定车载自组织网络是如何运行的。因此, 为了确定网络运行状态, 在以下的仿真实验中, 设置节点总数为 $m=1000$ 个, 正方形区域边长 $L=10$ m, 节点缓存 $S=100$ 个, 节点数据包传递能力 $T=1$ 个, 节点的通信半径 $r=1$ m, 节点的移动速度 $v=0.1$ m/s。仿真实验的总时间步为 20000 s。

在对多跳路由策略的设计中可知, 多跳路由策略中的可调参数 k 可以在区间 $[0,1]$ 内取任意值, 为了明确车载自组织网络的运行状态和运行规律, 在接下来的仿真实验中, 将 k 值固定为 0.5。

各观测量关于数据包生成概率 p 的函数图像如图 5 所示。当多跳路由策略中的可调参数 k 固定时, 随着数据包生成概率 p 的增大, 丢包率首先保持为 0%, 当 $p > p_m$ 时, 丢包率突然增大, 而后持续增长; 时延首先稳定在较小数值, 当 $p > p_m$ 时, 时延骤增, 而后缓慢降低并维持在较大数值; 流量首先呈线性增长, 并在 $p = p_m$ 时达到峰值, 达到峰值后骤降, 然后缓慢降低。由此可见, 各个观测量在 $p = p_m$ 时均发生显著变化。其数值表明, 当 $p \leq p_m$ 时, 网络畅通无阻, 而当 $p > p_m$ 时, 网络开始丢失数据包, 意味着车载自组织网络逐渐拥堵, 网络的通信性能降低。而当数据包生成

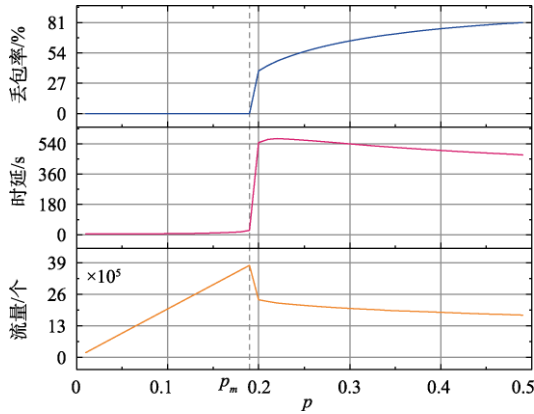


图5 $k=0.5$ 时网络运行状态图

Fig. 5 VANET operation status when $k=0.5$

概率为 p_m 时, 网络性能达到最优, 因此将 p_m 定义为最佳数据包生成概率。

值得注意的是, 时延在出现骤增之后, 呈现小幅度下降的趋势。将出现上述现象的原因分析如下: 当网络开始拥堵时, 丢包率骤增, 网络中的流量迅速降低, 而流量的大幅度降低导致数据包在传递过程中, 选择中间节点时有更大的自由度, 数据包的平均跳数增加, 从而导致时延骤增; 而随着网络中丢包率增加幅度和流量降低幅度的减小, 可供数据包选择的中间节点的数量减少, 数据包在传递过程中的时延降低, 但由于此时网络一直处于拥堵的状态, 所以时延仍保持在较高水平。

此外, 为了探究不同可调参数值是否会对车载自组织网络的运行状态产生影响, 分别绘制了 $k=0.2$ 和 $k=0.9$ 时各个观测量关于 p 的函数图像, 如图6、图7所示。

图5—7表明, 在不同的 k 值下, 各个观测量关于 p 的变化趋势相同, 由此可知, 可调参数 k 的数值变化不会改变网络的运行状态。但最佳数据包生成概率 p_m 的数值大小由可调参数 k 决定, 在此次仿真实验中, 当 $k=0.2$ 时, $p_m=0.17$; 当 $k=0.5$ 时, $p_m=0.19$; 当 $k=0.9$ 时, $p_m=0.18$, 且 $k=0.5$ 时的流量峰值更大。

3.2 多跳路由策略的有效性验证

从图5—7可以看出, 只考虑闵氏距离 (k 趋近于 1) 和只考虑缓存占有率 (k 趋近于 0) 的

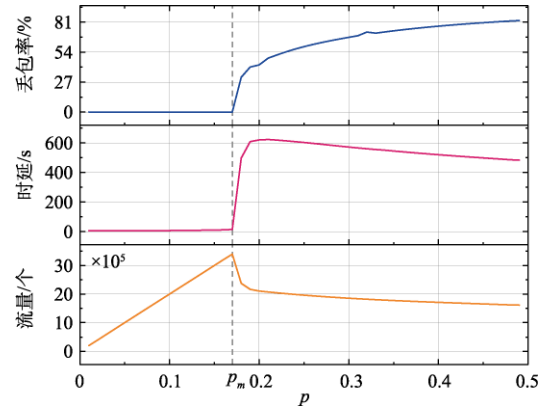


图6 $k=0.2$ 时网络运行状态图

Fig. 6 VANET operation status when $k=0.2$

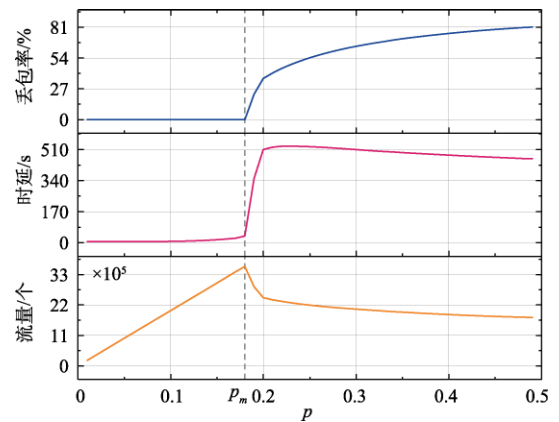


图7 $k=0.9$ 时网络运行状态图

Fig. 7 VANET operation status when $k=0.9$

多跳路由策略更容易导致车载自组织网络发生拥堵, 而当两者合理组合 ($k \approx 0.5$) 时可以缓解网络的拥堵性问题。且值得注意的是, 当 p 过小时, 无论 k 为何值网络都不会产生拥堵; 而当 p 过大时, 无论 k 为何值网络都会产生拥堵。因此, 为了验证所提出的多跳路由策略的有效性, 并反映一些值得注意的特性, 需要将数据包生成概率控制在一定的数值范围内。令 $k=0, k=0.5, k=1$ 时的最佳数据包生成概率分别为 p_{m1}, p_{m2}, p_{m3} , 那么当数据包生成概率 p 在区间 $[\max(p_{m1}, p_{m3}), p_{m2}]$ 内取任何值都是可以接受的。而生成数据包的概率越大, 车载自组织网络中的数据包数量越多, 网络的拥堵现象越明显, 越容易观察车载自组织网络发生拥堵时的特征。因此, 在接下来的仿真实验中, 将数据包生成概率固定为 $p=0.19$, k 为变化量, 其他参数保持不变。

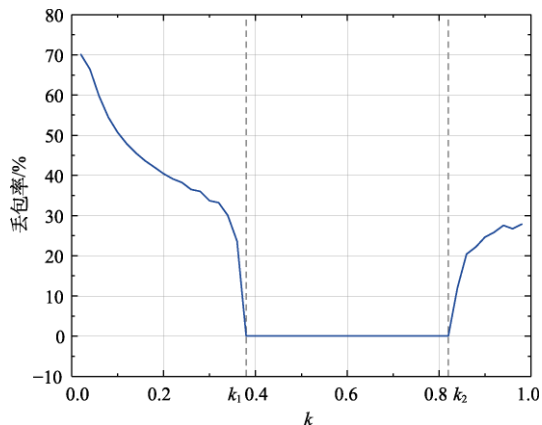


图 8 丢包率变化图

Fig. 8 Packet loss rate variation diagram

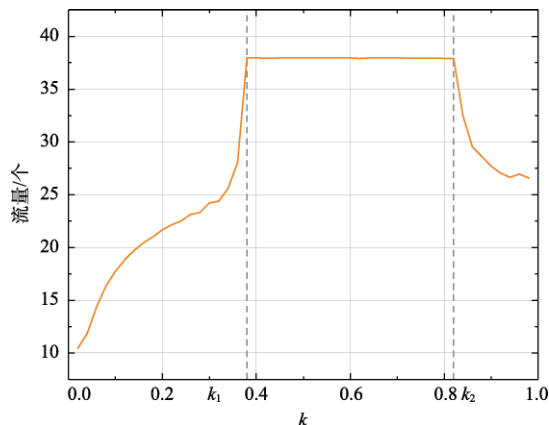


图 10 流量变化图

Fig. 10 Flow variation diagram

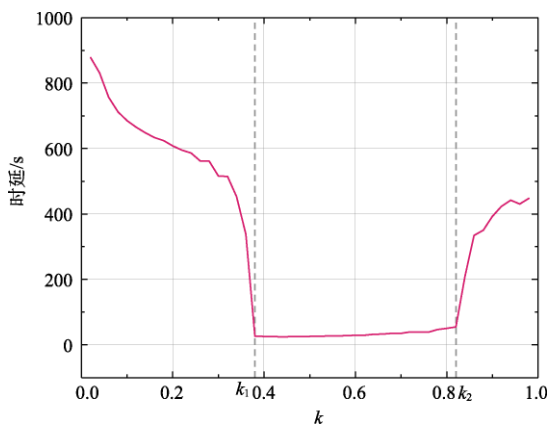


图 9 时延变化图

Fig. 9 Delay variation diagram

丢包率和时延关于可调参数 k 的函数图像如图 8、图 9 所示, 随着 k 值的增加, 车载自组织网络中的丢包率和时延均发生显著变化, 且在 $k_1=0.38$ 和 $k_2=0.82$ 时有明显过渡。当 $k < k_1$ 时, 随着 k 值的增加, 网络中的丢包率持续降低, 且其降低速度先逐渐减小, 然后快速增大; 当 $k > k_2$ 时, 丢包率随着 k 的增大而增大, 且其增大速度逐渐降低; 而当 $k_1 \leq k \leq k_2$ 时, 丢包率保持为 0%。时延关于可调参数 k 的变化趋势与丢包率保持一致。

丢包率和时延变化过程的数值表明, 当可调参数在区间 $[0.38, 0.82]$ 时, 车载自组织网络畅通无阻, 且网络的通信性能在此区间内达到最优。

流量关于可调参数 k 的函数图像如图 10 所示, 基于图 8、图 9 的结论可以得知, 当可调参数在区间 $[0.38, 0.82]$ 时, 车载自组织网络没有发生拥堵, 且性能达到最优, 有更多的数据包在不丢

失的情况下被成功传递至其目标节点, 但由于数据包生成概率固定且节点缓存有限, 网络的流量不能无限增加, 所以在最优区间, 流量呈现平峰。

基于对图 8—10 的分析可知, 当车载自组织网络中的数据包生成概率 p 固定时, 如果多跳路由策略中的可调参数 k 偏大或偏小, 都会造成网络拥堵, 而当 k 在区间 $[0.38, 0.82]$ 时网络的通信性能达到最优。因此可以证明, 本文提出的多跳路由策略, 在同时考虑闵氏距离和节点缓存占有率的情况下可以有效缓解车载自组织网络拥堵性问题, 提高网络通信性能和数据包传递过程的可靠性。

3.3 节点缓存对网络拥堵性的影响

为了探究节点缓存对车载自组织网络拥堵性的影响, 在以下的仿真实验中, 基于前述实验结果, 设置 $p=0.19$ 和 $k=0.5$, S 为变化量, 其他参数保持不变。

各个观测量关于节点缓存 S 的函数图像如图 11 所示, 随着 S 值的增加, 丢包率、流量和时延在 $S_1=70$ 和 $S_2=480$ 时均有明显过渡。当 $0 < S < S_1$ 时, 随着 S 的增加, 丢包率先急剧降低, 然后呈现小幅度增加, 在 $S = S_1$ 时骤降至 0%, 并在 $S_1 < S \leq S_2$ 时保持稳定。流量的变化趋势则与丢包率的变化趋势完全相反, 即当 $0 < S < S_1$ 时, 随着 S 的增加, 流量先急剧增加, 然后呈现小幅度下降, 在 $S = S_1$ 时骤增至较大数值, 并在 $S_1 < S \leq S_2$ 时维持在最大值附近。随着 S 的增加,

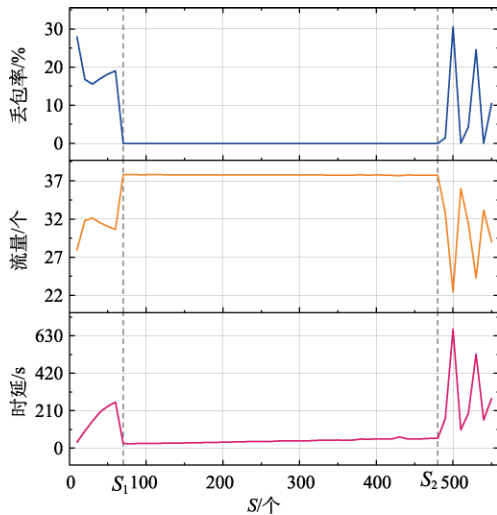


图 11 节点缓存对网络状态影响图

Fig. 11 Influence of node cache on VANET

当 $0 < S < S_1$ 时, 时延呈上升趋势, 并且数值较大, 在 $S = S_1$ 时骤降到较小数值, 并在 $S_1 < S \leq S_2$ 范围内有小幅上升, 但仍维持在较小数值附近。当 $S > S_2$ 时, 丢包率、流量和时延均在很大范围内出现较强的波动性。

将车载自组织网络出现上述现象的原因分析如下: 当 $S \leq S_1$ 时, 且节点缓存 S 很小时, 每个节点内数据包的队列长度差异较小, 但在不同 S 值时, $M_e(t)$ 受 S 值的影响较大, 因此本文提出的多跳路由策略主要由等式 (5) 的第二项决定, 在选择临时邻居时, 将会向数据包队列长度更短的节点倾斜。此时, 只有一小部分节点发生拥堵, 在此基础上增加缓存可以缓解网络的拥堵情况, 因此丢包率有所下降。而随着 S 的持续增加, 各个节点数据包队列长度的差异增大, 导致在选择临时邻居时, 会向距离目标节点有效距离更短的节点倾斜, 从而使得更多的节点发生拥堵, 导致丢包率有小幅上升。而在数据包传递过程中, S 越大, 则数据包在队列中排队等待的时间越长, 因此时延呈上升趋势。

随着 S 的增加, 当 $S_1 < S \leq S_2$ 时, 无论 S 为何值, 网络中的丢包率、流量和时延都保持稳定。此时, 整个网络的缓存较大, 而数据包的生成量不足以使网络发生拥堵, 网络中生成的数据包数量和到达目标节点而被删除的数据包数量达到平

衡。在这种情况下, 节点缓存 S 对网络拥堵性的影响很小, 因此, 在一定的数据包生成概率下, 当网络没有发生拥堵时, 不需要再通过增大节点缓存来提高网络性能, 以避免不必要的资源浪费。

当 $S > S_2$ 时, 由于节点缓存过大, 等式 (5) 中的第二项受 S 的影响持续降低, 因此等式 (5) 主要由第一项决定, 导致多跳路由策略在选择中间节点时更倾向于距离目标节点闵氏距离最短的临时邻居, 从而无法准确判断各个节点的缓存占有率, 导致网络的稳定性变差, 各个观测量在较大范围内出现很强的波动性。

基于以上分析可知, 当设置节点缓存在区间 $[70, 480]$ 时, 可以有效改善车载自组织网络的拥堵情况, 降低车载自组织网络数据包传递过程的时延, 提高实际到达目标节点的数据包数量。

3.4 节点移动速度对网络拥堵性的影响

为了探究节点移动速度对网络拥堵性的影响, 基于前述结论, 在后续的仿真实验中, 设置 $k=0.5$, $S=100$ 个, v 和 p 为变化量, 其他参数保持不变。

在不同的节点移动速度下, 丢包率关于数据包生成概率 p 的函数图像如图 12 所示, 当节点的移动速度 v 值固定时, 随着数据包生成概率 p 的增加, 丢包率首先保持为 0%, 当 $p=p_m$ 时, 丢包率骤增, 而后缓慢增加。随着节点移动速度的增加, 网络发生拥堵后的丢包率明显增大, 但其

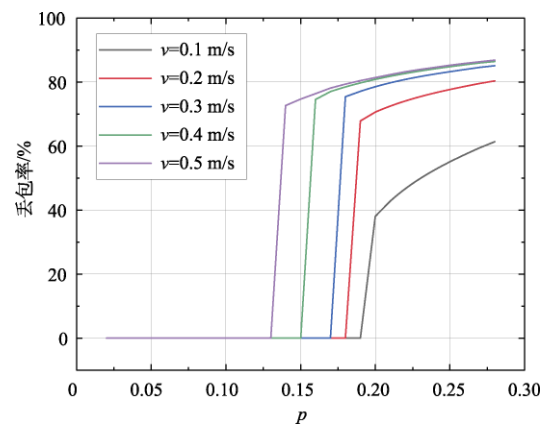


图 12 节点移动速度对网络状态影响图

Fig. 12 Influence of node moving speed on VANET

增大幅度降低, 从图 10 中可以看出, $v=0.4$ m/s 和 $v=0.5$ m/s 时在网络发生拥堵后, 两者的丢包率基本相同。

当节点移动速度 v 的数值不同时, 网络的数据包最佳生成概率 p_m 有所不同, 从图 10 可以看出, 随着 v 值的增加, 其所对应的最佳数据包生成概率降低。由此可知, 更低的节点移动速度 v 可以提高车载自组织网络处理和传递数据包的能力, 并减少网络发生拥堵时丢失的数据包数量, 从而有效缓解网络拥堵, 提高网络在通信过程中的可靠性。

3.5 节点通信半径对网络拥堵性的影响

为了探究节点通信半径对网络拥堵性的影响, 基于前述结论, 在后续的仿真实验中, 设置 $k=0.5$, $S=100$ 个, $v=0.1$ m/s, r 和 p 为变化量, 其他参数保持不变。

当节点的通信半径不同时, 丢包率关于节点数据包生成概率 p 的函数图像如图 13 所示, 对于不同的 r 值, 随着 p 值的增加, 丢包率变化趋势保持一致。即当 p 较小时, 丢包率首先保持为 0%, 当数据包生成概率达到最佳生成概率时, 丢包率骤增, 而后持续增加。随着节点通信半径的增加, 网络发生拥堵前后丢包率的差值大幅度降低, 表明节点通信半径的增大在很大程度上缓解了网络中数据包丢失的问题。且随着节点通信半径的增加, 网络的最佳数据包生成概率 p_m 值大幅

度提高。 $r=1$ m 时, 最佳数据包生成概率为 0.18; $r=2$ m 时, 最佳数据包生成概率为 0.38; $r=3$ m 时, 最佳数据包生成概率为 0.56; $r=4$ m 时, 最佳数据包生成概率为 0.66。由以上数据可知, 节点通信半径每增加一个单位, 最佳数据包生成概率分别提高 1.1、0.47、0.18 倍, 并且最佳数据包生成概率的提高幅度逐渐降低, 表明在车载自组织网络不发生拥堵的前提下, 节点通信半径增加一个单位, 网络处理数据包的数量最多可以提高 1.1 倍。因此, 节点通信半径的增加可以在很大程度上提高网络处理数据包的能力, 从而增强网络通信性能。

3.6 节点数据包传递能力对网络拥堵性的影响

为了探究节点数据包传递能力对网络拥堵性的影响, 基于前述结论, 在后续的仿真实验中, 设置 $k=0.5$, $S=100$ 个, $v=0.1$ m/s, $r=1$ m, T 和 p 为变化量, 其他参数保持不变。

在不同的节点数据包传递能力下, 丢包率关于节点数据包生成概率 p 的函数图像如图 14 所示, 在 T 值固定的情况下, 当 p 很小时, 数据包传递能力基本不能对网络造成影响。当数据包生成概率超过最佳生成概率时, 丢包率突然增大, 表明网络开始出现拥堵, 但随着 T 值的增加, 网络出现拥堵前后丢包率的增大幅度降低; 随着节点数据包传递能力的增加, 网络的数据包最佳生成概率 p_m 也有了极大的提高。 $T=1$ 时, 最佳数

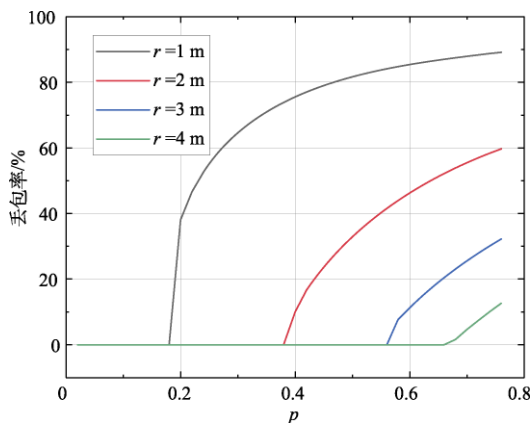


图 13 节点通信半径对网络状态影响图
Fig. 13 Influence of node communication radius on VANET

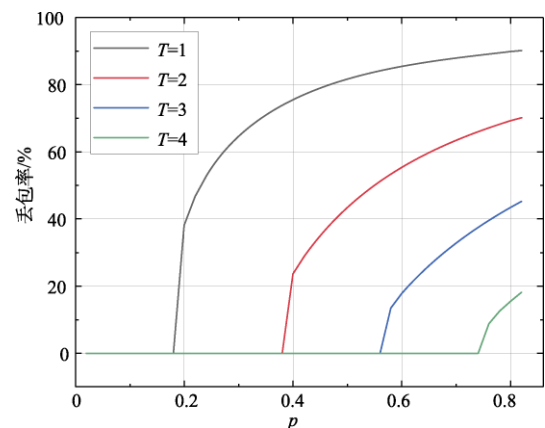


图 14 节点数据包传递能力对网络状态影响图
Fig. 14 Influence of node packet transmission capability on VANET

据包生成概率为 0.18； $T=2$ 时，最佳数据包生成概率为 0.38； $T=3$ 时，最佳数据包生成概率为 0.56； $T=4$ 时，最佳数据包生成概率为 0.74。在每个时间步 t ，节点的数据包传递能力 T 每增加一个单位，最佳数据包生成概率分别提高 1.1、0.47、0.32 倍，其提高幅度呈降低趋势，表明在车载自组织网络不发生拥堵的前提下，节点数据包传递能力增加一个单位，网络处理数据包的数量最多可以提高 1.1 倍。由此可见，节点数据包传递能力的增加可以极大地提高车载自组织网络处理和传递数据包的能力，减少数据包丢失数量，从而提高网络通信过程的可靠性。

节点通信半径和数据包传递能力代表了节点的通信能力大小，而节点是车载自组织网络的参与者，图 13 和图 14 的结论表明，参与者的通信能力在很大程度上决定了整个车载自组织网络的通信能力，因此，为了改善网络的通信能力、缓解网络系统的拥堵性问题，可以通过提高参与者的通信能力来实现。

4 结论

本文通过设计多跳路由策略，来优化车载自组织网络中数据包的传递过程，并通过仿真实验研究了车载自组织网络中多个参数对丢包率、时延和流量的影响情况，从而实现节点缓存受限场景下车载自组织网络的拥堵特性的研究。由于节点缓存受限，在仿真实验中可以观察到数据包丢失的现象。实验结果表明，当多跳路由策略中的可调参数在区间 $[0.38, 0.82]$ 时，可以有效提高网络处理数据包的能力，降低数据包在传递过程中的时延。节点缓存在 $[70, 480]$ 的区间范围内增加时，可以提高网络容量和数据包处理能力，降低数据包在传递过程中的丢失率，提高网络的通信性能；节点移动速度降低可以提高网络中实际到达目标节点的数据包数量，并改善数据包在传递过程中丢失的问题，从而提高网络通信过程的可靠性；节点通信半径和数据包传递能力代表了网络中参与者的通信能力，在网络不发生拥堵的前

提下，节点通信半径或数据包传递能力的增加可以使得网络处理数据包的数量提高 1.1 倍，由此可知，网络中参与者通信能力的提高可以在很大程度上提高网络通信效率，改善网络的拥堵性问题。

本文关于车载自组织网络拥堵特性的分析，能够帮助车载自组织网络解决信息传递中数据包丢失和网络拥堵的问题。此外，本文建立的研究方法和得到的研究结论可以为设计优化车载自组织网络提供科学依据。

参考文献

- [1] Sun Y X, Kuai R X, Xiao S, et al. VIMAC: Vehicular information medium access control protocol for high reliable and low latency transmissions for vehicular ad hoc networks in smart city[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2020, 106: 55-66.
- [2] Indushree B, Martijn W, Frances M T B. Self-organizing topology for energy-efficient ad-hoc communication networks of mobile devices[J]. *Complex Adaptive Systems Modeling*, 2020, 8(1): 21-40.
- [3] Masood A, Ataul A I, Ishtiaq W, et al. Optimized clustering in vehicular ad hoc networks based on honey bee and genetic algorithm for internet of things[J]. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2020, 13(5): 532-547.
- [4] Hothefta S, Baraa T S, Zeyad T S. Fuzzy logic-based trusted and power-aware routing protocol in mobile ad-hoc networks[J]. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 2020, 12(2): 213-220.
- [5] Saurabh D P, Lata R. Adaptive fuzzy-based message dissemination and micro-artificial bee colony algorithm optimised routing scheme for vehicular ad hoc network[J]. *IET Communications*, 2020, 14(6): 994-1004.
- [6] 闫龙. 车载自组织网络中高效路由协议的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [7] Dawson L M, Kerem K. Optimal resource utilisation algorithm for visible light communication-based vehicular ad-hoc networks[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2020, 14(2): 65-72.
- [8] Sony G, Elhadi M S, Siddardha K, et al. Queue based vehicular ad hoc network prognostic offloading approach[J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 170: 584-593.
- [9] Artu R. Random neural networks with hierarchical committees for improved routing in wireless mesh networks with interference[J]. *SN Computer Science*, 2019, 1(3): 445-487.
- [10] Lyamine G, Kamel B, Souheila B, et al. A variant of random way point mobility model to improve routing in wireless sensor networks[J]. *International Journal of Information and Communication Technology*, 2018, 13(4): 407-423.
- [11] Ali G. Hybrid opportunistic and position-based routing protocol

- in vehicular ad hoc networks[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2020, 11(4): 1593-1603.
- [12] 成昌巍, 胡劲文, 王策, 等. 基于改进型人工势场的路径规划方法[J]. *无人系统技术*, 2019, 2(6): 10-16.
- [13] 周思雨, 白成超. 基于深度强化学习的行星车路径规划方法研究[J]. *无人系统技术*, 2019, 2(4): 38-45.
- [14] Pan J W, Cui J, Wei L, et al. Secure data sharing scheme for VANETs based on edge computing[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, 2019(1): 1-11.
- [15] Manfredi S, Di Tucci E, Latora V. Mobility and congestion in dynamical multilayer networks with finite storage capacity[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(6): 068301.
- [16] Dong D V, Ai Q S, Liu Q, et al. Efficient caching strategy in content-centric networking for vehicular ad-hoc network applications[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2018, 12(7): 703-711.
- [17] 李夏苗, 曾明华. 交通网络演化规律[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(3): 368-373.

作者简介:



邵艳敏 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为车联网。



张佩瑜 (1994-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为车联网、车辆编队控制。



周建山 (1990-), 男, 博士后, 研究员, 主要研究方向为车联网、车辆协同、移动计算。本文通讯作者。



田大新 (1980-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能交通、车联网、边缘计算与群体智能。

[引用格式] 田戴荧, 方浩, 杨庆凯. 信号时序逻辑约束下基于终点回溯的高效规划[J]. 无人系统技术, 2021, 4(1): 44-50.

信号时序逻辑约束下基于终点回溯 的高效规划

田戴荧, 方浩, 杨庆凯

(北京理工大学自动化学院, 北京 100081)

摘要: 在信号时序逻辑约束下规划路径是一项具有挑战性的任务, 其计算量非常高。提出了一种终点回溯的规划方法, 它是一种适用于连续时间系统的抽象化方法。该规划方法分为离线构建阶段和在线规划阶段。离线构建阶段在 Transducer 理论的指导下, 从能够完成任务的合理的终点构造一棵快速随机搜索树, 向初始状态空间进行回溯。当采样点足够多时, 在线规划阶段使用模型预测控制将机器人驱动到快速随机搜索树的叶子节点。通过所提出的规划方法, 避免了环境的有限转移系统与信号时序逻辑对应的自动机乘积引起的状态空间爆炸问题。所提出的方法将在线路径规划所需时间降低到 1s 以下, 充分说明了本方法的有效性。与混合整数线性规划以及贝叶斯优化方法相比较, 所提出的终点回溯规划方法在线求解效率更优, 且更加易于扩展至多机器人协同工作场景。

关键词: 信号时序逻辑; 终点反溯; 非一致性采样; 抽象化; 人工智能; 机器人学

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 2096-5915(2021)01-44-07

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.1.006

Efficient Planning based on Destination Backtracking under Signal Temporal Logic Constraints

TIAN Daiying, FANG Hao, YANG Qingkai

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Synthesizing the continuous path under signal temporal logic specifications is a challenging task resulting in computationally demanding methods. A destination backtracking planning method is presented which is an abstract-based method for continuous-time systems. The planning method consists of an offline construction phase and an online planning phase. The offline phase constructs a rapidly-exploring randomized tree backtracking from rational destinations under the guidance of timed signal transducer. When there are enough sample points, the online planning phase uses Model Predictive Control to drive agents to leaf nodes. Through the proposed planning method, the state space explosion induced by the product of the finite transition system and the automata of STL is avoided. The proposed method reduces the online planning time to less than 1s. Compared with the Mixed-Integer Linear Programming and the Bayesian Optimization, the proposed method is more effective and can be easily extended to multi-agent collaboration.

Key words: Signal Temporal Logic; Destination Backtracking; Sampling-based; Abstract; Artificial Intelligence; Robotics

收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2020-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(U1913602, 61873033, 61903035); 国家自然科学基金重大国际(地区)联合研究项目(61720106011); 中国工程院咨询研究项目(2019-XZ-7)

1 引言

近年来, 时序逻辑理论作为计算机领域中用来进行正则化检验的一套方法^[1], 被应用于机器人规划与控制中, 取得了极大的应用成果。时序逻辑理论的主要思想是将时序逻辑任务约束转换为可以处理的约束形式, 从而在规划时考虑这些约束, 生成满足任务的路径。其中, 线性时序逻辑 (Linear Temporal Logic, LTL) 将时序逻辑约束转换为 Büchi 自动机^[2], 而对于信号时序逻辑 (Signal Temporal Logic, STL), 由于其处理的主要是连续系统, 不能找到一个合适的图来作为其约束集。

针对连续系统中信号时序逻辑的控制方法, 近年来有越来越多的学者进行了研究。伯克利大学的 Raman 等人^[3]将信号时序逻辑编码为离散值的组合作为整数约束, 之后结合模型预测控制, 将信号时序逻辑约束下的规划问题建模为混合整数线性规划问题。Bapinar 等人^[4]将混合整数线性规划方法用到了多无人机系统的规划与控制中。Farahani 等人^[5]在混合整数线性规划方法的基础上, 针对自动系统所处的不确定性环境研究了控制的鲁棒性问题, 对最坏情况下的模型预测控制问题进行了求解, 从而得到了一个反应式的控制器。舒新峰等人^[6]提出了一种命题投影时序逻辑的分布式模型检测方法, 缓解模型检测的状态空间爆炸问题。此外, 为了给 STL 约束构建一个光滑的约束函数, Haghghi 等人^[7]提出了一种新的光滑可微 STL 量化语义来累积鲁棒性, 并通过策略上升方法求解一系列光滑优化问题有效地计算控制策略。Lars 等人对此提供了一种新的视角, 他们首先定义了控制屏障函数与信号时序逻辑进行结合, 同时, 考虑时变控制屏障函数, 其中时间特性用于满足信号时序逻辑任务。该控制器由计算效率高的凸二次规划和局部反馈控制律给出^[8]。同时, 基于三维时空的规划方法^[9]也有了较多研究。这些方法可以与传统控制方法有很好的结合, 比如将混合规划得到的结果输入到具有非线性前馈补偿与闭环反馈控制系统^[10]中, 或者基于航路点分段的预测校正方法^[11]中, 作为额外知识指导校正。这些方法可

作为无人机的避障航路规划算法^[12], 引导无人机生成满足任务约束的路径。

除控制视角之外, 有大量学者尝试从学习的角度出发, 对信号时序逻辑约束的规划问题进行有效求解。其中 Aksaray 等人^[13]针对 STL 的健壮性不是 Q-learning 标准回报形式这一问题, 对 STL 健壮性指标用标准回报形式的函数进行了近似, 从而能够利用标准强化学习生成满足 STL 约束的路径。Balakrishnan 等人^[14]进一步设计了每一个局部状态局部任务的回报奖励, 并且将局部状态组合后能够满足整体 STL 任务的约束。除了 Q-learning 之外, 考虑到 STL 的正确性是与子公式数量和时间约束数量呈指数的计算复杂度来保证的, Kurtz 等人^[15]提出了一种替代的求解方法, 这种新的求解方法依赖于贝叶斯优化而不是混合整数线性规划。贝叶斯优化放宽了满足 STL 任务的概率完备性, 即路径在一定概率范围内可能违反任务, 但是求解效率大幅提高。此外, 考虑利用 STL 任务具有特定模式, 其中的一部分规划结果可以作为知识指导其他任务的路径生成, Li 等人^[16]提出了一种新的基于图的时空逻辑, 通过将 Hilbert 公理化应用于基于图的时空逻辑, 采用 Modus ponens 和 IRR 作为推理规则最终实现了一套完备的逻辑推理框架, 可以用于知识表示和自动推理。从 STL 自身具有时间约束的特性出发, Varnai 等人^[17]针对具有部分已知动力学的系统, 提出了一种基于抽样的学习方法来解决包含任务满足约束的最优控制问题。用 STL 构建动态辅助任务, 引入了一个控制器衍生框架, 从而能够对学习进行高效率的指导。有了高效率的控制器, STL 语言完全可以应用于复杂系统, 比如多机器人的规划问题^[18-20]中。

以上提及的方法中, 基于控制的方法在线规划时具有极高的计算复杂度, 基于学习的方法收敛时间长, 且得到的路径重用性差, 当起点或者目标点发生改变时, 需要重新进行学习以生成最优路径。针对这些问题, 本文提出一种基于终点回溯的高效规划方法。注意到未来操作符以及过去操作符的对应顺序, 将所有未来 (过去) 操作符转换为对应的过去 (未来) 操作符, 对所有转

换后的操作符构建对应的 Transducer^[21]。在离线构建阶段，在机器人的工作环境中加入时间维信息，构建时空联合空间，在该联合空间中，提前指定满足任务的合理终点，在 Transducer 的指导下，以终点作为快速随机搜索树的起点^[22]，回溯至初始状态平面。当采样点足够多时，每一个初始状态都能够在快速随机搜索树中找到一条时间反序序列满足任务约束。在线规划阶段，每一个状态根据快速随机搜索树生成完成任务代价最小的时间反序序列，之后利用模型预测控制进行跟踪。

2 信号时序逻辑指导的离线构建

信号时序逻辑是一类形式化语言，能够表述时间与逻辑上的约束关系。其在机器人规划领域的应用价值在于其能够提供高阶任务的表述方法，来控制机器人完成一系列具有先后顺序关系的动作，比如，先打开门才能进入房间，以及机器人每 30 分钟要前去充电。STL 的具体语法定义为

$$\varphi ::= p \mid \neg\varphi \mid \varphi_1 \vee \varphi_2 \mid \varphi_1 \mathcal{U}_I \varphi_2 \mid \varphi_1 \mathcal{S}_I \varphi_2 \quad (1)$$

其中， $I=[a,b]$ 为一时间区域； p 为原子命题，通常为环境的标签或者机器人的某一个动作； $\neg\varphi$ 是对 φ 取反； $\varphi_1 \vee \varphi_2$ 为 φ_1 或 φ_2 ； $\varphi_1 \mathcal{U}_I \varphi_2$ 是未来形式，指在 φ_1 为假之后的 I 时刻内， φ_2 需要为真； $\varphi_1 \mathcal{S}_I \varphi_2$ 是上式的过去形式，指在 φ_2 成真之后的 I 时刻内 φ_1 需要为真。各公式的形式化定义如下，其中 w 为一带有时间的序列。

$$\begin{aligned} (w,t) \models p & \text{ iff } t \in w_p[t]=1 \\ (w,t) \models \neg\varphi & \text{ iff } (w,t) \not\models \varphi \\ (w,t) \models \varphi_1 \vee \varphi_2 & \text{ iff } (w,t) = \varphi_1 \text{ or } (w,t) = \varphi_2 \\ (w,t) \models \varphi_1 \mathcal{U}_I \varphi_2 & \text{ iff } \exists t' \in t \oplus I, (w,t') = \varphi_2 \\ & \text{ and } \forall t'' \in (t,t'), (w,t'') = \varphi_1 \\ (w,t) \models \varphi_1 \mathcal{S}_I \varphi_2 & \text{ iff } \exists t' \in t \ominus I, (w,t') = \varphi_2 \\ & \text{ and } \forall t'' \in (t',t), (w,t'') = \varphi_1 \end{aligned} \quad (2)$$

此外， F (Eventually)、 G (Always) 以及它们对应的过去形式可以定义如式(3)。

$$\begin{aligned} F_I \varphi & \equiv \top \mathcal{U}_I \varphi \\ \bar{F}_I \varphi & \equiv \top \mathcal{S}_I \varphi \\ G_I \varphi & \equiv \neg F_I \neg \varphi \\ \bar{G}_I \varphi & \equiv \neg \bar{F}_I \neg \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

Thomas 等人^[21]已经说明，所有 STL 公式均可以通过 F 、 \bar{F} 、 \mathcal{U}_I 以及 \mathcal{S}_I 构造得到，因此之后以这几个公式为例子。

定义 h 为判断每一个公式是否为真的最小时间间隔，其定义如式(4)：

$$\begin{aligned} h(p) & = 0 \\ h(\phi) & = b \\ \text{if } \phi = G_{[a,b]} p \text{ or } F_{[a,b]} p, h(F_{[a,b]} \phi) & = h(G_{[a,b]} \phi) = b + h(\phi) \\ h(\neg\phi) & = h(\phi) \\ h(\phi_1 \wedge \phi_2) & = h(\phi_1 \vee \phi_2) = \max\{h(\phi_1), h(\phi_2)\} \end{aligned} \quad (4)$$

对于 STL 公式，存在度量一条路径 w 对于公式的满足程度的公制单位，称为鲁棒程度， $r: w \times \phi \rightarrow \mathbb{R}$ 。采用迭代形式进行计算，如式(5)所示。

$$\begin{aligned} r(w, (f(w) < d), t) & = d - f(w_t) \\ r(w, \neg(f(w) < d), t) & = -r(w, (f(w) < d), t) \\ r(w, \phi_1 \wedge \phi_2, t) & = \min(r(w, \phi_1, t), r(w, \phi_2, t)) \\ r(w, \phi_1 \vee \phi_2, t) & = \max(r(w, \phi_1, t), r(w, \phi_2, t)) \\ r(w, G_{[a,b]} \phi, t) & = \min_{t' \in [t+a, t+b]} r(w, \phi, t') \\ r(w, F_{[a,b]} \phi, t) & = \max_{t' \in [t+a, t+b]} r(w, \phi, t') \end{aligned} \quad (5)$$

每一个 STL 的时序逻辑符都有一个 Transducer 与之对应，如图 1 所示。对于任意一个任务，可以将其所有的时序逻辑符的 Transducer 按照公式树的顺序组合起来，便能够形成整个公式的 Transducer。

定义 1. 对于任意一个带有时间的序列， $w = (s_0, t_0)(s_1, t_1) \dots (s_n, t_n)$ ，其时间反序序列定义为 $w' = (s_n, t_0)(s_{n-1}, t_1) \dots (s_0, t_n)$ 。

定理 1. 对于任何一个任务，若存在一个序列满足未来（过去）形式任务，则此序列的时间反序序列满足该任务对应的过去（未来）形式。

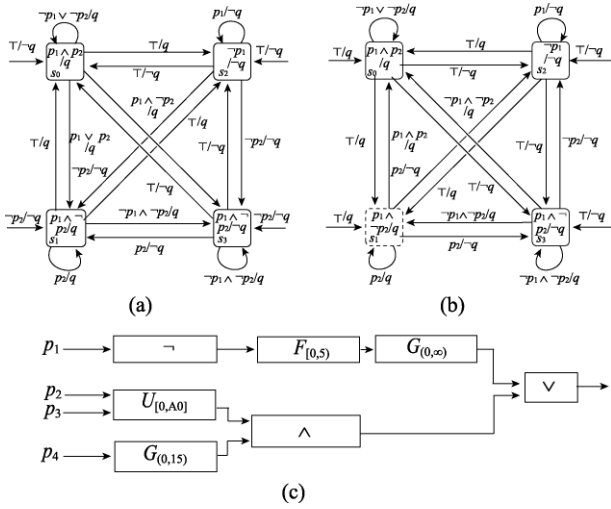


图 1 (a)为 $F_{(0,b)}$ 对应的 Transducer, (b)为 $U_{(0,\infty)}$ 对应的 Transducer, (c)为 $\varphi := G_{(0,\infty)} F_{(0,5)} \neg p_1 \vee (p_2 U_{[0,10]} p_3 \wedge G_{(0,15)} p_4)$ 对应的语法树

Fig. 1 (a), (b) are the transducer of $F_{(0,b)}$ and $U_{(0,\infty)}$, respectively. (c) is the parse tree of $\varphi := G_{(0,\infty)} F_{(0,5)} \neg p_1 \vee (p_2 U_{[0,10]} p_3 \wedge G_{(0,15)} p_4)$

证. 证明仅以 U_t 以及 S_t 为例, 其他对应公式证明方法类似。假设 $w = (s_0, t_0)(s_1, t_1) \dots (s_n, t_n) = aU_t b$, 则根据公式 (2), 有

$$\exists t' \in t \oplus I, (w, t') = b \text{ and } \forall t'' \in (t, t'), (w, t'') = a$$

则在构建时间反序序列时, 有

$$\exists t' \in t \ominus I, (w', t') = b \text{ and } \forall t'' \in (t', t), (w', t'') = a$$

这恰好符合 $aS_t b$ 的定义, 因此如果 $w = aU_t b$, 则有 $w' = aS_t b$ 。

在机器人工作的 (x, y) 空间中, 加入时间维信息, 构建 (x, y, t) 三维空间, 并根据机器人被指定的任务预估其终点, 则在 $t = h$ 的平面上提前放置终点, 表示为 $s_d = (x_d, y_d, h)$ 。将该点作为根节点。同时, 将给定任务的所有未来 (过去) 操作符转换为过去 (未来) 操作符, 并构建转换后任务 ϕ_n 的 Transducer, 表示为 TS_n 。在 TS_n 的指导下, 自 s_d 向 $t = 0$ 的平面生长快速随机搜索树。根据定理 1, 快速随机搜索树生长的所有满足转换后任务 ϕ_n 的时间反序序列, 在正向执行时一定满足原任务要求。

将所有采样点的集合表示为 S , 所有完成任

务的采样点的集合表示为 S' , 对于每一个采样点 $sa \in S$, 根据其其与终点距离给定一个代价值, 同时, 将对 STL 任务的符合程度乘以偏好因子加入到代价值中, 定义如式(6)。

$$J_{sa} = \text{cost}(sa) - \lambda \cdot r(w) \quad (6)$$

在构建完搜索树之后, 树上的每一个节点都有对应的一个代价值, 表征着从这个节点开始到达终点的路径的整体代价。

3 在线规划

当定理 1 采样到足够多的数据点之后, 离线构建搜索树结束, 此时所有满足任务 ϕ_n 的叶子节点前往根节点的路径在正向执行时一定满足原任务。在这些叶子节点足够多时, 初始状态平面的每个有可能完成任务的状态点就将被覆盖到。考虑一个以完成任务的叶子节点为顶点, 最大速度作为斜面斜率绝对值的圆锥 (如图 2 所示), 则圆锥中所有状态点都可以通过导航至圆锥顶点, 并由顶点到随机搜索树根节点连接一条后续路径来生成满足任务约束的路径。

在任意给定一个初始状态之后, 机器人将在所有的满足任务叶子节点 L 中选择代价值 J_{sa} 最小的那个叶子节点, 从叶子节点到根节点依次连接, 能够生成一条满足任务的时间序列 w 。在 w 中以一定时间分辨率进行点的采样, 便可以构成一条由带有时间的路径点构成的路径 pa 。本文中采用模型预测控制对 pa 进行跟踪, 具体问题建模如式(7)。

$$\min_{x_i} \sum_{i=1,2,\dots,N} \|x_i - pa_i\|_2 \quad (7)$$

该式可以根据不同的系统进行不同的定义, 并可以额外加入其他的约束条件, 比如加入控制屏障函数的约束以保证任意分辨率内路径都会满足任务约束。在本文中, 由模型预测控制生成的最优控制量可以储存至对应的节点中, 当又一次规划至该节点, 且控制对象的状态与该点预置状态相近时, 可以直接应用之前预置好的控制量进行控制, 进一步减少在线运算时间。至此, 离线

构建以及在线规划阶段的算法都已完成，本文算法整体框架如图 3 所示。

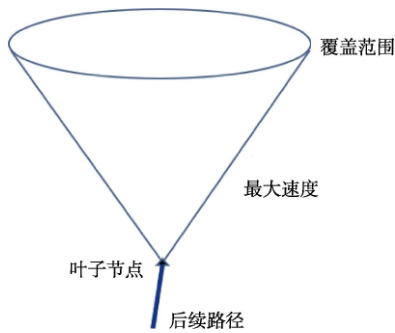


图 2 节点的覆盖范围圆锥

Fig. 2 Cone representing cover region of leaf nodes

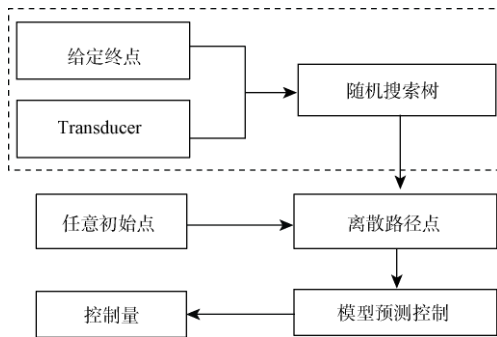


图 3 算法整体框架

Fig. 3 Framework of algorithm

4 仿真结果及分析

对于算法的结果，在内核为 i5-7300HQ 的计算机上基于 Python3 构建了仿真程序，进行了仿真实验。

实验中指定给机器人的任务表述为，在实验开始后的 0s 到 10s 内，到达 a 区域，在到达 a 区域的 10s 到 18s 内，到达 b 区域。STL 公式为 $\phi := F_{[0,10]}a \wedge aU_{[10,18]}b$ 。实验的具体环境如图 4 所示。其中，标为“obs”的蓝色圆圈代表障碍物， a 区域和 b 区域均为黄色圆圈。

离线构建阶段生长出的随机搜索树如图 5 所示。在构建好随机搜索树之后，在线规划阶段任意给定初始状态点，可以立即生成离散路径，三维离散路径如图 6 所示。对该路径每隔一定时间间隔进行采样，便可以生成一系列路径点。

本文考虑两轮差速小车模型。其模型描述如式(8)。

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + v_k \cos(\theta_k) d_t \\ y_{k+1} &= y_k + v_k \sin(\theta_k) d_t \end{aligned} \quad (8)$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + v_k \frac{\tan(\delta_k)}{L} d_t$$

针对该动力学模型，采用模型预测控制解决式(7)

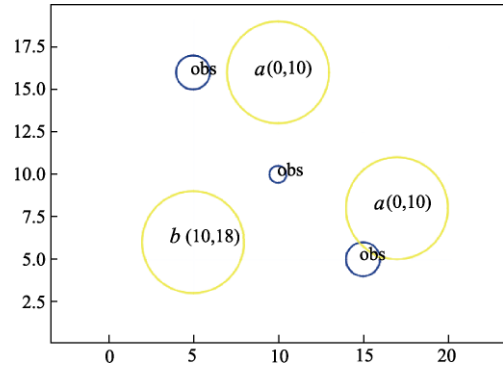


图 4 仿真环境

Fig. 4 Simulation environment

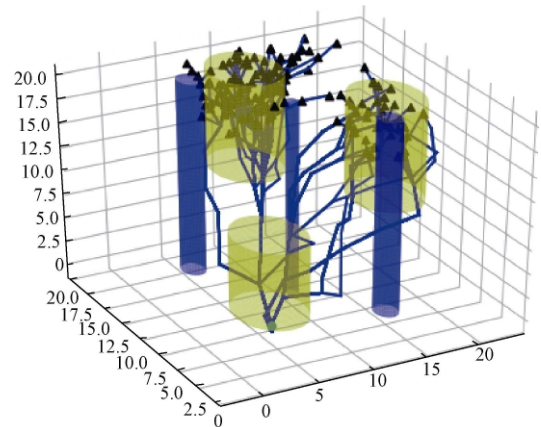


图 5 快速随机搜索树

Fig. 5 Rapidly-exploring randomized tree

问题，所得出结果如图 7 所示。图 7 中蓝色三角形为本次规划各个离散化时间点处车辆的位置，红色三角形为上一次规划时预置的控制量。当蓝色三角形与红色三角形基本重叠时，直接采用预置控制量进行控制，不再进行模型预测控制。

为了进行对比，实现了混合整数线性规划以及贝叶斯优化方法。混合整数线性规划生成最终路径耗时 108.6 s，贝叶斯优化方法使用了 17.9 s

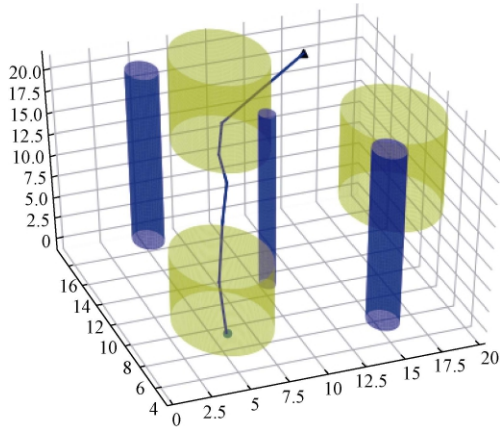


图 6 三维规划路径

Fig. 6 Planning path in 3-D view

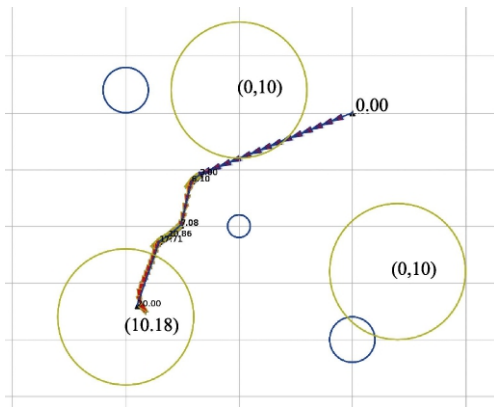


图 7 最终控制效果

Fig. 7 Final control effect

在线规划生成了在一定概率下满足任务的路径。本文提出的方法在离线为所有初始状态点构建路径时, 采样了 5000 个点, 耗时 68.3 s, 在线规划寻找相关路径耗时 0.2 s, 生成控制量耗时 2.3 s, 且在成功匹配到预置状态之后, 不再需要在线计算控制量。

5 结 论

本文针对连续空间内在 STL 约束下进行路径规划时间复杂度高, 且规划的结果不易重用的问题, 将问题放到带有时间信息的三维空间中进行求解, 根据 STL 未来时序操作符号与过去时序操作符的对应关系, 利用由终点反溯的随机搜索树覆盖初始状态平面, 之后在在线规划阶段寻找代价最小的点, 采用模型预测控制跟踪该代价最小

路径。通过对这一过程进行仿真, 证实了本方法的可行性, 且通过与混合整数线性规划以及贝叶斯优化方法进行对比, 本文所提出方法能够在较短时间内有效求得所有初始状态符合任务约束的可行解。

参 考 文 献

- [1] Baier C, Katoen J P. Principles of model checking[M]. MIT Press, 2008.
- [2] Gastin P, Oddoux D. Fast LTL to Büchi automata translation[C]. International Conference on Computer Aided Verification. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001.
- [3] Raman V, Alexandre D, Maasoumy M, et al. Model predictive control with signal temporal logic specifications[C]. 53rd IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2015.
- [4] Bapinar B, Balakrishnan H, Koyuncu E. Mission planning and control of multi-aircraft systems with signal temporal logic specifications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 155941-155950.
- [5] Farahani S S, Raman V, Murray R M. Robust model predictive control for signal temporal logic synthesis[C]. IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems, 2015.
- [6] 舒新峰, 王昌太, 王燕, 等. 一种命题投影时序逻辑的分布式模型检测方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2020, 47(4): 39-47.
- [7] Haghghi I, Mehdipour N, Bartocci E, et al. Control from signal temporal logic specifications with smooth cumulative quantitative semantics[C]. 2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC), IEEE, 2020.
- [8] Lars L, Dimarogonas D V. Control barrier functions for signal temporal logic tasks[J]. IEEE Control Systems Letters, 2018, 3:96-101.
- [9] 屈立成, 吕娇, 赵明, 等. 基于三维时空地图和运动分解的多机器人路径规划算法[J/OL]. 计算机应用: 1-10. [2020-09-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1307.TP.20200826.1456.004.html>.
- [10] 邵星灵, 刘俊, 李东光. 基于轨迹线性化的高超声速飞行器非线性姿态控制[J]. 无人系统技术, 2020, 3(3): 56-66.
- [11] 章吉力, 余智勇, 樊雅卓, 等. 基于航路点分段的预测校正再入制导方法[J]. 无人系统技术, 2020, 3(2): 49-57.
- [12] 吴健发, 王宏伦, 刘一恒, 等. 无人机避障航路规划方法研究综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(1):1-10.
- [13] Aksaray D, Jones A, Kong Z, et al. Q-learning for robust satisfaction of signal temporal logic specifications[C]. 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC). IEEE, 2016.
- [14] Balakrishnan A, Deshmukh J V. Structured reward shaping using signal temporal logic specifications[C]. 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2019.
- [15] Kurtz V, Lin H. Bayesian optimization for polynomial time

- probabilistically complete STL trajectory synthesis[J]. arXiv preprint arXiv:1905.03051, 2019.
- [16] Liu Z, Jiang M, Lin H. A graph-based spatial temporal logic for knowledge representation and automated reasoning in cognitive robots[J]. arXiv preprint arXiv:2001.07205, 2020.
- [17] Varnai P, Dimarogonas D V. Guided policy improvement for satisfying STL tasks using funnel adaptation[J]. arXiv preprint arXiv:2004.05653, 2020.
- [18] 刘国庆, 赵林. 多飞行器的有限时间姿态一致性编队控制[J]. 无人系统技术, 2020, 3(2): 22-29.
- [19] 辜勇, 段晶晶, 袁源乙, 等. 基于遗传算法的仓储机器人多目标路径规划方法[J]. 物流技术, 2020, 39(6): 100-105.
- [20] 万逸飞, 彭力. 基于协同多目标算法的多机器人路径规划[J]. 信息与控制, 2020, 49(2): 139-146.
- [21] Thomas F, Maler O, Dejan N, et al. From real-time logic to timed automata[J]. Journal of the ACM, 2019, 66(3): 1-31.
- [22] Perez A, Platt R, Konidaris G, et al. LQR-RRT*: Optimal sampling-based motion planning with automatically derived exten-

sion heuristics[C]. 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2012.

作者简介:



田戴炎 (1995-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为时序逻辑约束控制与强化学习。



方浩 (1973-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为多机协同控制、机器人智能控制。本文通讯作者。



杨庆凯 (1988-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为多机协同控制。

[引用格式] 薛连莉, 翟峻仪, 李一鸣. 无人车用智能导航技术国际态势分析[J]. 无人系统技术, 2021, 4(1): 51-61.

无人车用智能导航技术国际态势分析

薛连莉¹, 翟峻仪², 李一鸣¹

(1. 北京海鹰科技情报研究所, 北京 100074; 2. 航天科工空间工程发展有限公司, 北京 100093)

摘要: 根据无人车用智能导航技术相关的研究与综述论文、专利发表情况, 对该专业技术领域进行总体分析。选取 1990—2020 年的数据, 针对论文发表情况, 主要对其发展趋势、国家/地区分布、机构分布、出版物分布、高被引论文、被引频次和研究主题进行深入分析; 针对专利申请现状, 主要对专利申请时间、国家/地区分布、专利权人、专利研发技术热点等进行深入分析。研究结果表明, 在无人车用智能导航技术研究领域, 美国和中国无论在论文还是专利的数量和质量方面, 均处于世界前列。该技术领域的研究热点主要集中在导航系统、导航卫星、惯性技术、地球物理数据、自主车辆导航、自主车辆定位、激光雷达、位置数据、神经网络、目标跟踪算法、传感器、卷积神经网络、自动驾驶等方面。

关键词: 无人车; 自主导航; 智能导航; 惯性技术; 论文检索; 专利分析

中图分类号: V279 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)01-52-11

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.1.007

International Situation Analysis of Intelligent Navigation Technology for Unmanned Vehicles

XUE Lianli¹, ZHAI Junyi², LI Yiming¹

(1. Beijing HIWUNG Scientific and Technology Information Institute, Beijing 100074, China;
2. Aerospace Science and Technology Space Engineering Development Co Ltd, Beijing 100039, China)

Abstract: Overall analyses of the research and review papers, patents related to the intelligent navigation technology about unmanned vehicles are made. The data from 1990 to 2020 are selected. The publication status, development trends, country/region distribution, organization distribution, publication distribution, highly cited papers, citation frequency and research topics are analysed. The status of patent application, patent application time, country/region distribution, patent holders, patent research and development hotspots are analysed. The research results show that in the field of intelligent navigation technology for unmanned vehicles, both the United States and China are at the forefront of the world in terms of the number and quality of patents and papers. Research hotspots in this technical field mainly focus on navigation systems, navigation satellites, inertial technology, geophysical data, autonomous vehicle navigation, autonomous vehicle positioning, lidar, position data, neural networks, target tracking algorithms, sensors, convolutional neural networks, Automated driving, etc.

Key words: Unmanned Vehicle; Autonomous Navigation; Intelligent Navigation; Inertial Technology; Thesis Search; Patent Analysis

1 引言

从古至今, 作战的方式都在不断发展变化, 从使用冷兵器和热兵器的古代, 再到 21 世纪的信息战、现代化战争, 无论何种战争形式, 降低战争的伤亡率都是从始至终追求的目标之一^[1]。以无人车、无人水面艇和无人机等为代表的无人系统具有风险小、代价低、环境适应能力强、非接触、无人伤亡、自主可控、长续航、可成组编队、功能多等优点, 在军事及国民经济生活中得到了广泛应用。目前, 美、以、英、俄等国的陆军已形成了初步的地面无人体系, 并借助长期的技术积累和信息技术优势, 不断拓宽地面无人系统的任务功能领域, 推动地面无人系统的发展^[2-4]。而随着无人车的不断发展, 其智能化程度不断提升, 对导航技术的依赖程度也越来越高。导航可分为自主导航和非自主导航。自主导航是指运动载体完全依靠自身所携带的设备, 自主地完成导航任务, 不与外界发生任何声、光、电信息交互^[5]。其中, 惯性导航利用惯性传感器测量载体运动信息, 短期精度高, 自主性较强, 隐蔽性较好, 是一种典型的自主导航技术。而无人系统的特点就是没有人参与系统回路, 且工作环境复杂^[6]。因此, 基于惯性导航的智能导航技术是无人车的理

想选择。

本文将根据 1990—2020 年“无人车用智能导航技术”相关的研究与综述论文、专利发表情况, 对该专业技术领域进行总体分析。针对论文发表情况, 主要对其发展趋势、国家/地区分布、机构分布、出版物分布、高被引论文、被引频次和研究主题进行深入分析; 针对专利申请现状, 主要对专利申请时间、国家/地区分布、专利权人、专利研发技术热点等进行深入分析。

2 研究前沿态势分析

为检索出与“无人车用智能导航技术”相关的研究与综述论文, 根据研究主题, 构建检索策略^①, 在 ISI Web of Science-SCI/CPCI 数据库中, 共获得 4073 篇论文 (检索时间截止到 2020 年 6 月 16 日)。

2.1 研究产出基本情况分析

2.1.1 研究趋势分析

图 1 所示为无人车用智能导航技术研究领域的 SCI/CPCI 论文发表趋势, 由图可见, 1990—1991 年, 没有相关研究领域的发文; 1992—2003 年, 该领域的发文量缓慢增长; 2004—2012 年, 该领域的发文量持续快速增长; 2013 年以后, 该

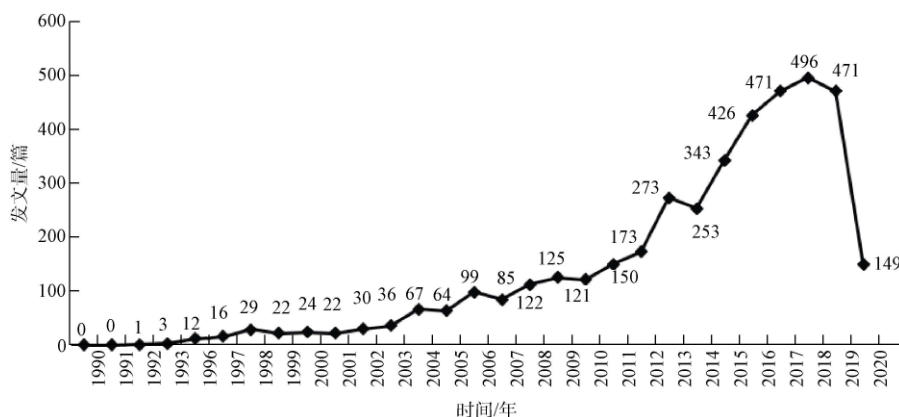


图 1 无人车用智能导航技术研究论文年代分布

Fig. 1 The distribution of papers in intelligent navigation technology for unmanned vehicles

① 检索策略: TS=((unmanned vehicle OR unmanned ground vehicle OR 无人车 OR 无人地面车辆 OR Autonomous Vehicle OR 自主车辆) AND (导航 OR navigation OR GPS denied OR GPS rejection OR GPS reject OR inertial OR gyro OR accelerometer OR 惯性 OR 陀螺 OR 加速度计)), 索引=SCI-EXPANDED, CPCI-S, 时间跨度=1990—2020

领域发文量呈现了爆发式增长, 2018 年发文量达到了历年最高值 496 篇。需要注意的是, 由于数据库收录的原因, 2020 年的数据不作为参考。

2.1.2 国家(地区)分布

图 2 为发文量排名前 20 的无人车用智能导航技术研究领域论文发布国家/地区情况, 由图可见, 美国的发文量最多, 为 1029 篇, 排名第二的中国发文量为 856 篇。相比中国和美国, 其他国家在该领域的发文量较少。由图可见, 美国和中国在无人车用智能导航技术研究领域研究规模很大, 在全球范围内占据相对领先优势。

2.1.3 全球机构分布

在无人车用智能导航技术研究领域发文量排名前三的机构都是中国的, 分别是北京航空航天大学(89 篇)、中国科学院(63 篇)和国防科技大学(57 篇); 排名前五的机构中, 有 4 家来自

中国; 在发文量排名前 20 的机构中, 中国有 10 家, 美国和新加坡各 2 家, 英国、韩国、澳大利亚、加拿大、意大利和乌克兰各 1 家, 分布情况如表 1 所示。

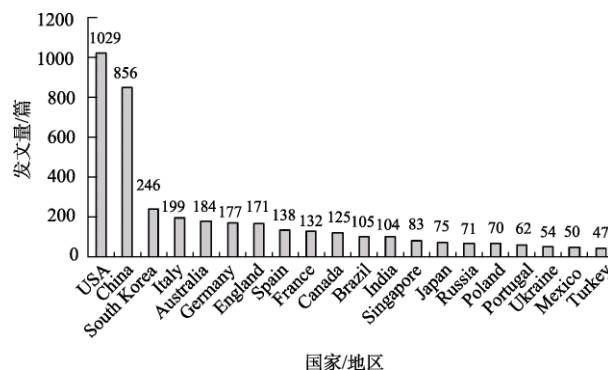


图 2 无人车用智能导航技术研究论文国家/地区分布
Fig. 2 The distribution of papers on intelligent navigation technology for unmanned vehicles by country/region

表 1 无人车用智能导航技术研究论文全球研究机构分布情况

Table 1 The distribution of global research institutions in intelligent navigation technology papers for unmanned vehicles

排序	作者机构	论文章数/篇	国家/地区	
1	Beihang Univ	北京航空航天大学	89	中国
2	Chinese Academy Of Sciences	中国科学院	63	中国
3	Natl Univ Def Technol	国防科技大学	57	中国
4	Korea Adv Inst Sci Technol	韩国高级科学技术学院	54	韩国
5	Harbin Engn Univ	哈尔滨工程大学	48	中国
6	Nanjing Univ Aeronaut Astronaut	南京航空航天大学	46	中国
7	Nanyang Technol Univ	南洋理工大学	41	新加坡
8	Beijing Inst Technol	北京理工大学	40	中国
9	Univ Sydney	悉尼大学	40	澳大利亚
10	Carnegie Mellon Univ	卡内基·梅隆大学	37	美国
11	Natl Aviat Univ	乌克兰国立航空大学	37	乌克兰
12	Natl Univ Singapore	新加坡国立大学	36	新加坡
13	Northwestern Polytech Univ	西北工业大学	36	中国
14	Cranfield Univ	克兰菲尔德大学	35	英国
15	Wuhan Univ Technol	武汉理工大学	33	中国
16	MIT	麻省理工大学	32	美国
17	Univ Calgary	卡尔加里大学	31	加拿大
18	Harbin Inst Technol	哈尔滨工业大学	29	中国
19	Politecn Torino	都灵理工大学	28	意大利
20	Univ Chinese Acad Sci	中国科学院大学	28	中国

2.1.4 出版分布

如表 2 所示, 发表无人车用智能导航技术研究领域文献最多的出版物为美国国际光学工程学

会的会议论文, 发文量为 208 篇; 发文量排名第二的为 Sensors 期刊, 该期刊的最新影响因子为 3.096, 截至 2020 年 6 月 16 日, 该期刊共发表

表2 无人车用智能导航技术研究论文出版分布情况

Table 2 The distribution of papers in intelligent navigation technology for unmanned vehicles

排序	出版来源	发文章/篇	出版物类别
1	Proceedings of SPIE	SPIE 会议	208 会议
2	Sensors	传感器	143 期刊
3	International Conference on Unmanned Aircraft Systems	无人机系统国际会议	97 会议
4	Journal of Intelligent Robotic Systems	智能机器人系统期刊	96 期刊
5	Proceedings of The Society of Photo Optical Instrumentation Engineers SPIE	光电仪器工程师学会会刊	68 期刊
6	IEEE International Conference on Robotics and Automation	IEEE 机器人与自动化国际会议	60 会议
7	IFAC Papers online	FAC Papers online 期刊	57 期刊
8	International Archives of The Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences	国际摄影测量遥感与空间信息科学档案	55 期刊
9	IEEE Access	IEEE Access 期刊	51 期刊
10	Institute of Navigation Satellite Division Proceedings of The International Technical Meeting	导航卫星研究所国际技术会议	50 会议
11	IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems	IEEE 智能机器人与系统国际会议	49 会议
12	Oceans IEEE	IEEE 海洋会议	46 会议
13	Journal of Field Robotics	野外机器人学期刊	45 期刊
14	International Journal of Advanced Robotic Systems	国际先进机器人系统期刊	44 期刊
15	Remote Sensing	遥感	42 期刊
16	IEEE Aerospace Conference Proceedings	IEEE 航空会议论文集	41 会议
17	Chinese Control Conference	中国控制会议	36 会议
18	IEEE ION Position Location and Navigation Symposium	IEEE ION 位置、定位与导航研讨会	34 会议
19	Mediterranean Conference on Control and Automation	地中海控制和自动化会议	34 会议
20	Lecture Notes in Computer Science	计算机科学学科会议	33 会议

143 篇无人车用智能导航技术研究领域的文献。在发文章排名前 20 的出版物中，会议为 11 个，期刊为 9 个，会议和期刊的发文章分别为 688 篇和 601 篇，两者数量相当。

2.1.5 高被引论文

表 3 所示为无人车用智能导航技术研究领域论文被引次数。排名前 10 的文章中，被引频次最高的是美国卡内基·梅隆大学的学者 Balch 等人于 1998 年发表在 IEEE Transactions on Robotics and Automation 上的一篇文章，文章题名为《Behavior-based formation control for multirobot teams》。在排名前 10 的高被引文章中，美国有 3 篇，澳大利亚有 2 篇，瑞士、加拿大、德国、北爱尔兰、意大利各有 1 篇。值得注意的是，中国机构尽管在发文章方面占据相对优势，但在高被引论文中无一入选。

2.2 国家/地区被引频次分析

表 4 为无人车用智能导航技术研究领域国家/地区的论文被引情况。由表中可见，中国的发文章

总量、总被引频次和篇均被引频次均占据全球领先地位。美国的发文章总量为 1029，排名第一；总被引频次 4812，排名第二；篇均被引频次为 4.68，排名第 16。值得注意的是，加拿大篇均被引频次高达 8.02，说明加拿大在无人车用智能导航技术研究领域处于较高水平。

2.3 研究主题分析

表 5 所示为无人车用智能导航技术研究领域的主要研究方向分类。研究方向主要集中在电气电子、自动化控制系统、机器人技术、计算机科学人工智能、航空航天、遥感、电信、仪器仪表等类目。其中，工程电气电子类排名第一，发文章高达 1642 篇，占总发文章的 40% 以上；自动化控制系统类排名第二，发文章为 906 篇；机器人技术类排名第三，发文章为 856 篇。

2.4 小结

1990—2003 年，无人车用智能导航技术研究领域的发文章缓慢增长；2003 年以后，该领域的发文章持续快速增长；2013 年以后爆发式增

表3 无人车用智能导航技术研究高被引论文
Table 3 The highly cited papers in intelligent navigation technology for unmanned vehicles

排序	作者	来源	引用次数/次	国家/地区
1	Balch, T; Arkin, RC	Behavior-based formation control for multirobot teams ^[7] 来源: IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION 卷:14, 期:6, 页: 926-939, 出版年:DEC 1998	1534	美国
2	Mahony, Robert; Hamel, Tarek; Pflimlin, Jean-Michel	Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group ^[8] 来源: IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL 卷:53, 期:5, 页: 1203-1218, 出版年: JUN 2008	730	澳大利亚
3	Lalonde, Jean- Francois; Vandapel, Nicolas; Huber, Daniel F.; 等	Natural terrain classification using three-dimensional lidar data for ground robot mobility ^[9] 来源: JOURNAL OF FIELD ROBOTICS 卷: 23, 期:10, 页:839-861, 出版年:OCT 2006	229	美国
4	Hoy, Michael; Maveev, Alexey S.; Savkin, Andrey V.	Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: a survey ^[10] 来源: ROBOTICA 卷: 33, 期:3, 页: 463-497, 出版年:MAR 2015	162	澳大利亚
5	Bloesch, Michael; Omani, Sammy; Hutter, Marco; 等	Robust Visual Inertial Odometry Using a Direct EKF-Based Approach ^[11] 来源: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) 会议地点: Hamburg, Germany, 会议日期: SEP 28-OCT 02, 2015	146	瑞士
6	Liu, Zhixiang; Zhang, Youmin; Yu, Xiang; 等	Unmanned surface vehicles.: An overview of developments and challenges ^[12] 来源: Annual Reviews in Control 卷:41, 页: 71-93, 出版年: 2016	140	加拿大
7	Luettel, Thorsten; Himmelsbach, Michael; Wuensche, Hans-Joachim	Autonomous Ground Vehicles-Concepts and a Path to the Future ^[13] 来源: PROCEEDINGS OF THE IEEE 卷: 100, 特刊:SI, 页:1831-1839, 出版年: MAY 2012	124	德国
8	Kelly, Alonzo; Stentz, Anthony; Amidi, Omead; 等.	Toward reliable off road autonomous vehicles operating in challenging environments ^[14] 来源: 9th International Symposium on Experimental Robotics (ISER)会议地点: Singapore, SINGAPORE 会议日期: JUN 18-21, 2004; INTERNATIONAL JOURNAL OF ROBOTICS RESEARCH 卷:25, 期:5-6, 页: 449-483, 出版年: MAY-JUN 2006	97	美国
9	Naeem, Wasif; Irwin, George W.; Yang, Ao lei	COLREGs-based collision avoidance strategies for unmanned surface vehicles ^[15] 来源: MECHATRONICS 卷:22, 期: 6, 特刊: SI, 页:669-678, 出版年: SEP 2012	82	北爱尔兰
10	Papadakis, Panagiotis	Terrain traversability analysis methods for unmanned ground vehicles: A survey ^[16] 来源: ENGINEERING APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE 卷:26, 期: 4, 页:1373-1385, 出版年: APR 2013	63	意大利

长; 2018年发文量达到了历年最高值。

美国和中国在无人车用智能导航技术领域研究规模很大, 在全球范围内占据相对领先优势。排名第三的韩国发文量仅为中国的30%, 美国的25%。

在无人车用智能导航技术研究领域发文量排名前20的机构中, 有50%都来自中国, 其中北京航空航天大学、中国科学院和国防科技大学分别以89篇、63篇和57篇的发文量占据榜单的前三。除中国外, 在发文量排名前20的机构中, 美国和新加坡各2家, 英国、韩国、澳大利亚、加拿大、意大利和乌克兰各1家。

发表无人车用智能导航技术研究领域文献最多的出版物为美国国际光学工程学会的会议论文, 发文量为208篇; 发文量排名第二的为Sensors期刊, 发文量为143篇。在发文量排名前20的出版物中, 会议为11个, 期刊为9个, 会议和期刊的发文量分别为688篇和601篇, 两者数量相当。

美国在该领域的研究水平全球领先。被引频次最高的是卡内基·梅隆大学的学者Balch等人于1998年发表在IEEE Transactions on Robotics and Automation上的一篇文章, 题名为《Behavior-based formation control for multirobot teams》。

表4 无人车用智能导航技术研究论文国家/地区被引情况

Table 4 The citations of papers in intelligent navigation technology for unmanned vehicles by countries/regions

序号	国家/地区	发文量	总被引频次		篇均被引频次	
			被引频次/次	排序	篇均被引频次/次	排序
1	USA	1029	4812	2	4.68	16
2	China	856	6791	1	7.93	2
3	South Korea	246	1075	6	4.37	17
4	Italy	199	1130	5	5.68	12
5	Australia	184	1184	3	6.43	9
6	Germany	177	975	10	5.51	14
7	England	171	1149	4	6.72	7
8	Spain	138	1023	8	7.41	4
9	France	132	1027	7	7.78	3
10	Canada	125	1003	9	8.02	1
11	Brazil	105	432	14	4.11	18
12	India	104	589	11	5.66	13
13	Singapore	83	453	13	5.46	15
14	Japan	75	539	12	7.19	5
15	Russia	71	239	19	3.67	19
16	Poland	70	420	15	6.00	11
17	Portugal	62	381	16	6.15	10
18	Ukraine	54	77	20	1.43	20
19	Mexico	50	325	18	6.50	8
20	Turkey	47	331	17	7.04	6

表5 无人车用智能导航技术研究方向分布情况

Table 5 The distribution of research directions in intelligent navigation technology for unmanned vehicles

排序	研究方向	发文量/篇	
1	Engineering Electrical Electronic	电气电子	1642
2	Automation Control Systems	自动化控制系统	906
3	Robotics	机器人技术	856
4	Computer Science Artificial Intelligence	计算机科学人工智能	735
5	Engineering Aerospace	航空航天	465
6	Remote Sensing	遥感	423
7	Telecommunications	电信	378
8	Instruments Instrumentation	仪器仪表	340
9	Computer Science Information Systems	计算机科学信息系统	271
10	Optics	光学	235

在排名前十的高被引文章中,美国有3篇,澳大利亚2篇,瑞士、加拿大、德国、北爱尔兰、意大利各1篇。中国机构尽管在发文量方面占据相对优势,但在高被引论文中无一入选。

美国的发文总量排名第一,总被引频次排名第二,但篇均被引频次排名第16,较为靠后;中

国的发文总量排名第二,总被引频次排名第一,篇均被引频次排名第二,在全球均处于领先地位;加拿大篇均被引频次高达8.02,说明加拿大在无人车用智能导航技术研究领域处于较高水平。

无人车用智能导航技术领域的主要研究方向包括工程电气电子、自动化控制系统、机器人技

术、计算机科学人工智能、工程航空航天、遥感、电信、仪器仪表等类目。其中,工程电气电子类排名第一,发文量高达1642篇,占总发文量的40%以上;自动化控制系统类排名第二,发文量为906篇;机器人技术类排名第三,发文量为856篇。

3 研发情况

在 incoPat 数据库中,根据研究主题,构建检索策略^①,共检索到3708条专利文献(检索时间截止到2020年6月16日)。

3.1 总体情况分析

3.1.1 专利申请时间分布

从无人车用智能导航技术国内外专利申请情况来看,1990—2010年,世界关于无人车用智能导航技术研究专利申请数量相对较少,大部分在50件以下,每年申请的专利数量增长缓慢。2010—2015年,该技术领域的专利申请数量保持快速稳定增长,每年专利申请数由2011年的70件增长到了2015年的250件。2016—2017年,随着技术的发展,该技术领域的专利申请数量也呈爆发式增长,2016年专利申请数量为570,是2015年的2.28倍,2017年更是达到了827。2018—2019年专利申请数量逐渐回落。中国从2000年开始有相关技术领域专利申请,但每年申请数量较少。2015年开始,该技术领域专利申请数量开始稳定增长,2019年最高达到122件,如图3所示。

3.1.2 专利申请国家/地区分布

从专利技术的国家/地区来源来看,美国在无人车用智能导航技术领域申请的专利技术占比最多,达56.30%,超过了总量的一半。排名第二和第三的分别是中国和韩国,专利申请数量占比分别为10.52%和6.56%,如图4所示。从专利技术

的市场分布来看,专利市场主要分布于美国、亚洲和欧洲。

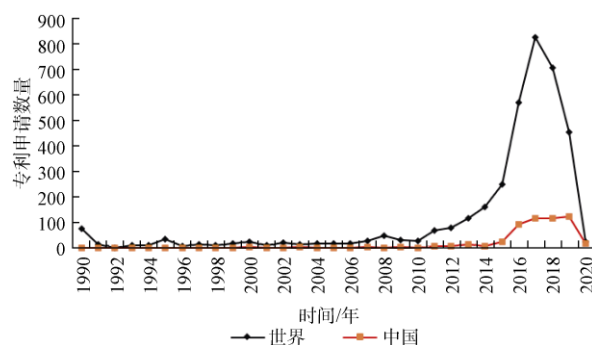


图3 无人车用智能导航技术研究专利年代分布

Fig. 3 The distribution of patents in intelligent navigation technology for unmanned vehicles

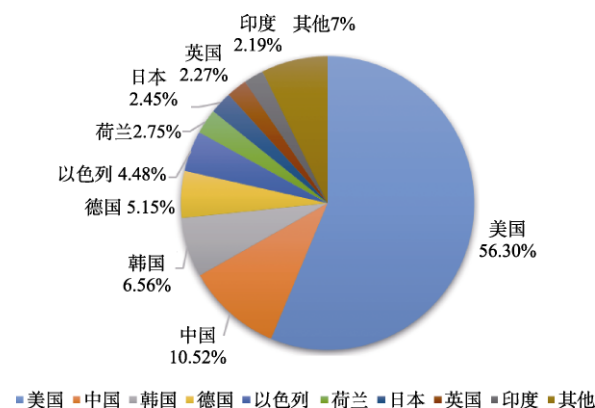


图4 无人车用智能导航技术研究专利国家/地区分布

Fig. 4 The distribution of patents in intelligent navigation technology for unmanned vehicles by country/region

3.1.3 主要专利权人分析

从检索结果看,专利申请数量位居前10位的机构中全部都是企业,如表6所示。排名第一位的专利申请人是美孚视觉科技有限公司(MOBILEYE VISION TECHNOLOGIES LTD),专利申请数量为143件;排名第二的是Zoox公司,专利申请数量为109件;Caterpillar公司排名第三,专利申请数量为106件,如图5所示。

分析专利持有时间和新专利申请量,可以看出竞争机构对于某一技术的领先程度和最新的技术发展态势。在无人车用智能导航技术研究领域相关专利中,分析排名前10位机构的专利延续时间和近5年专利数量占总量的比例情况可以看

① (TIABC=((unmanned ADJ vehicle OR unmanned ADJ ground ADJ vehicle OR 无人车 OR 无人地面车辆 OR Autonomous ADJ Vehicle OR 自主车辆)) AND TIABC=((导航 OR navigation OR GPS ADJ denied OR GPS ADJ rejection OR GPS ADJ reject OR inertial OR gyro OR accelerometer OR 惯性 OR 陀螺 OR 加速度计))) AND (AD=[19900101 to 20200616])

出：除了 Caterpillar 公司，大部分公司在该技术领域都保持较高的活力，近 5 年的专利申请量占其总的专利申请量都在 70% 以上。

3.1.4 中国专利权人情况分析

中国研发机构在无人车用智能导航技术研究领域专利申请数量方面排名较为落后，在全球专利排名前 10 的机构中，中国机构无一上榜。在中国专利权人前 10 位的排名中，企业和高校各占一半，5 家企业中有 4 家近 5 年开始申请相关技术领域专利，如表 7 所示。中国研究机构进入该技术领域的时间相对较短，但保持着活跃的研发活动和技术创新能力，专利申请量逐年上升。

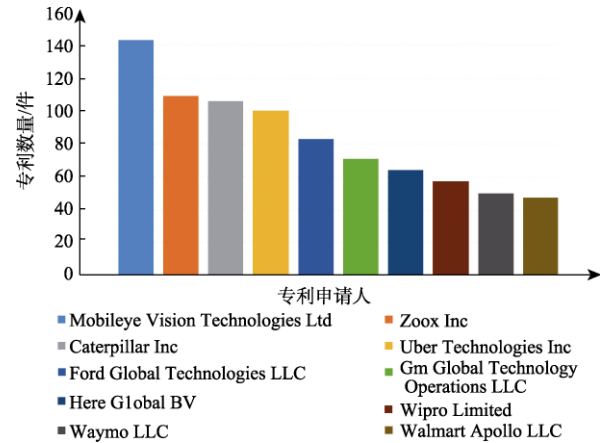


图 5 无人车用智能导航技术主要专利申请人
Fig. 5 Main patent applicants for intelligent navigation technology for unmanned vehicles

表 6 无人车用智能导航技术主要专利申请人详细信息

Table 6 Details of main patent applicants for intelligent navigation technology for unmanned vehicles

排序	机构	专利申请延续时间	机构性质	总计/件	近 5 年专利占其总量比
1	Mobileye Vision Technologies Ltd	2014—2019 年	企业	143	96.50%
2	Zoox Inc	2015—2020 年	企业	109	80.73%
3	Caterpillar Inc	1990—2002 年	企业	106	0
4	Uber Technologies Inc	2014—2019 年	企业	100	95%
5	Ford Global Technologies LLC	2013—2019 年	企业	83	89.16%
6	Gm Global Technology Operations LLC	2011—2019 年	企业	71	94.37%
7	Here Global B V	2014—2019 年	企业	64	70.31%
8	Wipro Limited	2017—2019 年	企业	57	100%
9	Waymo LLC	2016—2019 年	企业	50	100%
10	Walmart Apollo LLC	2016—2019 年	企业	47	100%

表 7 中国专利权人情况分析

Table 7 Analysis of Chinese patentees

排序	机构	专利申请延续时间	机构性质	总计/件	近 5 年专利占其总量比
1	深圳市招科智控科技有限公司	2016—2017 年	企业	14	100%
2	深圳市大疆创新科技有限公司	2016—2018 年	企业	13	100%
3	北京理工大学	2012—2019 年	高校	11	63.64%
4	智慧式控股有限公司	2018—2018 年	企业	11	100%
5	新石器慧通(北京)科技有限公司	2019—2020 年	企业	9	89.16%
6	西安交通大学	2014—2019 年	高校	9	77.78%
7	同济大学	2017—2018 年	高校	8	100%
8	浙江大学	2013—2018 年	高校	7	57.14%
9	清华大学	2015—2019 年	高校	7	85.71%
10	百度在线网络技术(北京)有限公司	2016—2019 年	企业	7	100%

3.2 技术主题分析

3.2.1 专利研发技术热点分布

根据图 6 绘制的技术主题分布图可以看出，目

前无人车用智能导航技术专利申请内容主要集中在无人地面车辆、自动驾驶、自主车辆导航、障碍物检测以及自主车辆定位 5 个方面。申请热点包括

导航、导航系统、导航卫星、惯性技术、地球物理数据、自主车辆导航、自动引导车辆、自主车辆定位、激光雷达、位置数据、神经网络、目标跟踪算法、传感器、卷积神经网络、自动驾驶等。

3.2.2 主要国家专利技术主题分布

将无人车用智能导航技术专利申请按照专利分类号进行 incoPat 代码分类, 如表 8 所示。在该研究领域, 技术研发主要集中在位置控制、导

航、控制系统、定位系统、反辐射/再辐射系统、参数计算、道路车辆等几个方面。

按照专利申请前 10 位的国家和前 10 位的专利分类技术进行申请国家 incoPat 代码分析, 如图 7 所示。在国家与专利申请的 incoPat 代码分类分析中, 如表 9 所示, 美国、中国、德国、以色列、日本、英国在 incoPat 代码分类的前 10 位技术领域均开展了研究。

表 8 专利技术主题分布情况分析

Table 8 Analysis of the distribution of patented technology topics

排序	专利量/件	incoPat 代码	中文对照
1	1865	G05D1	陆地、水上、空中或太空中的运载工具位置、航道、高度和姿态的控制, 如自动驾驶仪
2	1068	G01C21	导航; 不包含在 G01C1/00 至 G01C19/00 组中的导航仪器
3	700	G08G1	道路车辆的交通控制系统
4	533	B60W30	不与某一特定子系统的控制相关联的道路车辆驾驶控制系统的使用
5	422	G06K9	用于阅读或识别印刷或书写字符或者用于图形识别
6	321	G01S19	卫星无线电信标定位系统, 利用这种系统传输的信号确定位置、速度和姿态
7	275	B60W50	不与某一特定子系统的控制相关联的道路车辆驾驶控制的控制系统的零部件
8	264	G01S17	应用除无线电波外的电磁波的反射或再辐射系统, 如激光雷达系统
9	262	B60W40	不与某一特定子系统控制相关联的道路车辆驾驶控制系统的驾驶参数的判断或计算
10	177	G01S5	通过确定两个或更多个方向或为直线的配合来定位, 通过确定两个或更多个距离的配合进行定位

表 9 主要国家专利申请技术按主题分布的数量

(单位: 件)

Table 9 The quantity of patent applications in major countries by subject

代号	美国	中国	韩国	德国	以色列	荷兰	日本	英国	印度	瑞典
G05D1	1151	112	97	77	97	35	49	38	46	32
G01C21	615	108	35	34	101	39	39	10	26	18
G08G1	400	12	40	58	36	34	24	14	11	19
B60W30	271	11	86	50	59	4	7	3	12	18
G06K9	248	19	13	13	73	5	1	8	20	4
G01S19	196	37	13	7	13	9	11	3	3	5
B60W50	179	3	42	24	9	0	5	5	3	4
G01S17	185	18	2	6	5	10	1	3	8	0
B60W40	142	6	69	18	2	5	3	1	0	7
G01S5	114	2	0	5	4	4	10	10	0	3

3.3 小结

1990—2010 年, 世界关于无人车用智能导航技术研究专利申请数量相对较少, 每年申请的专利数量增长缓慢。2010—2015 年, 该技术领域的专利申请数量保持快速稳定增长。2016—2017 年, 随着技术的发展, 该技术领域的专利申请数

量也呈爆发式增长, 2017 年达到了历史最高值 827 件。中国从 2000 年开始有相关技术领域的专利申请, 但每年申请数量较少。2015 年开始, 该技术领域的专利申请数量开始稳定增长, 2019 年最高达到 122 件。

从专利技术的国家/地区来源来看, 美国在无

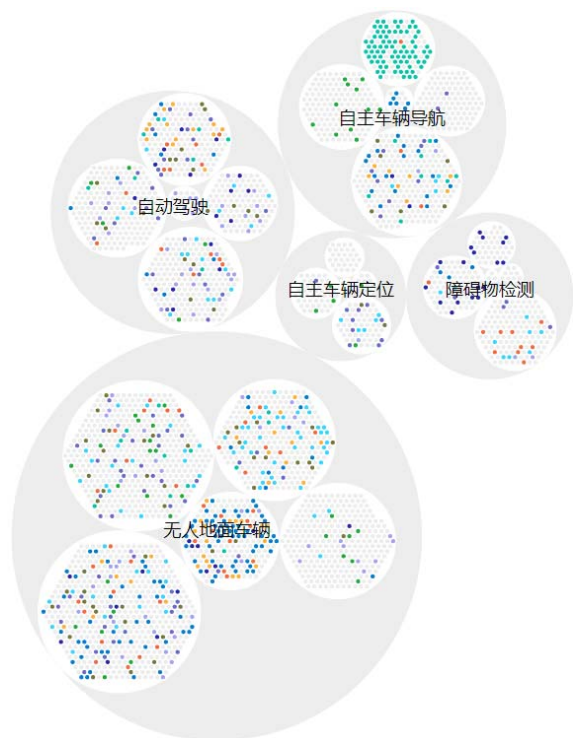


图6 无人车用智能导航技术热点分布

Fig. 6 The distribution of smart navigation technology hotspots for unmanned vehicles

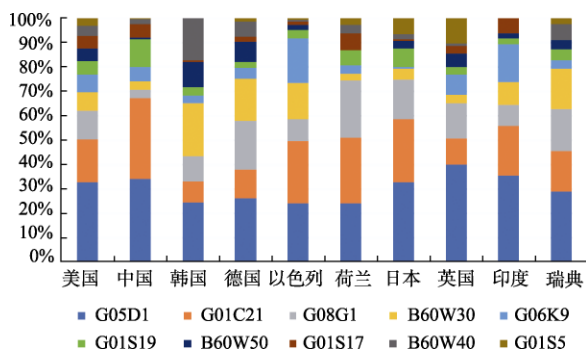


图7 主要国家专利申请技术主题分布

Fig. 7 The distribution of technical topics of patent applications in major countries

人车用智能导航技术领域申请的专利技术占比最多，达56.30%，超过了总量的一半。排名第2和3的分别是中国和韩国，专利申请数量占比分别为10.52%和6.56%。从专利技术的市场分布来看，专利市场主要分布于美国、亚洲和欧洲。

在无人车用智能导航技术研究领域专利申请数量方面位居前10位的机构全部都是企业。排名第1位的专利申请人是美国美孚视觉科技有限公司，专利申请数量为143件。中国研发机构在无

人车用智能导航技术研究领域专利申请数量排名较为落后，在全球专利排名前10的机构中，中国机构无一上榜。在中国专利权人前10位的排名中，企业和高校各占一半，5家企业中有4家近5年开始申请相关技术领域专利。

目前，无人车用智能导航技术专利申请内容主要集中在无人地面车辆、自动驾驶、自主车辆导航、障碍物检测以及自主车辆定位5个方面。申请热点包括导航、导航系统、导航卫星、惯性技术、地球物理数据、自主车辆导航、自动引导车辆、自主车辆定位、激光雷达、位置数据、神经网络、目标跟踪算法、传感器、卷积神经网络、自动驾驶等。

4 结论

本文通过Web of Science文件检索数据库和incoPat专利数据库对1990—2020年无人车用智能导航技术研究领域的论文出版和专利申请情况进行了梳理。从发展趋势、国家/地区分布、机构分布、研究主题、专利权人、专利研发技术热点等方面开展深入研究分析。研究表明，2010年以后，在无人车用智能导航技术研究领域的论文发表和专利申请的数量都保持较稳定的快速增长；美国和中国在近30年论文发表和专利申请的数量方面一直保持世界领先地位；在无人车用智能导航技术研究领域，论文和专利分析结果表明，研究热点主要集中在导航系统、导航卫星、惯性技术、地球物理数据、自主车辆导航、自主车辆定位、激光雷达、位置数据、神经网络、目标跟踪算法、传感器、卷积神经网络、自动驾驶等方面。

参考文献

- [1] 严甲汉. 无人系统的自主导航技术研究及验证[D]. 西安: 电子科技大学, 2018.
- [2] 陈姝, 阳光. 世界地面无人系统发展现状[J]. 国外坦克, 2018(9): 12-22.
- [3] 王雅琳, 杨依然, 王彤, 等. 2019年无人系统领域发展综述[J]. 无人系统技术, 2019, 2(6): 53-56.
- [4] 张朝阳, 李星宏. 5G在无人驾驶汽车中的应用前景分析[J].

- 无人系统技术, 2019, 2(2): 65-68.
- [5] 薛连莉, 沈玉芃, 徐月. 2019 年国外惯性技术发展与回顾[J]. 导航定位与授时, 2020, (1): 60-66.
- [6] 薛连莉, 戴敏, 葛悦涛. 2018 年国外惯性技术发展与回顾[J]. 飞航导弹, 2019, (4): 14-21.
- [7] Balch T, Arkin R C. Behavior-based formation control for multi-robot teams[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 926-939.
- [8] Mahony R, Hamel T, Pflimlin J M. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(5): 1203-1218.
- [9] Lalonde J F, Vandapel N, Huber D F, et al. Natural terrain classification using three-dimensional radar data for ground robot mobility[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(10): 839-861.
- [10] Hoy M, Matveev A S, Savkin A V. Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: A survey[J]. Robotica, 2015, 33(3): 463-497.
- [11] Bloesch M, Omani S, Hutter Marco, et al. Robust visual inertial odometry using a direct EKF-based approach[D]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, Germany, SEP 28-OCT 02, 2015
- [12] Liu Z X, Zhang Y M, Yu X. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges[J]. Annual Reviews in Control, 2016(41): 71-93.
- [13] Luettel T, Himmelsbach M, Wuensche H J. Autonomous ground vehicles-concepts and a path to the future[D]. Proceedings of the IEEE, 2012
- [14] Alonzo K, Anthony S, Omead A, et al. Toward reliable off road autonomous vehicles operating in challenging environments[D]. The 9th International Symposium on Experimental Robotics (ISER), Singapore, Jun 18-21, 2004.
- [15] Naeem W, Irwin G W, Yang A. Colregs-based collision avoidance strategies for unmanned surface vehicles[J]. Mechatronics, 2012, 22(6): 669-678.
- [16] Papadakis P. Terrain travers ability analysis methods for unmanned ground vehicles: A survey[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(4)

作者简介:



薛连莉 (1991-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为导航、制导与控制。本文通讯作者。



翟峻仪 (1992-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为导航、制导与控制。



李一鸣 (1993-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为专利情报研究。

[引用格式] 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.

面向典型任务的有人/无人机协同效能评估

尹昊, 侯婷婷, 李东光

(北京理工大学机电动态控制重点实验室, 北京 100081)

摘要: 有人/无人机协同作战是 C⁴ISR 体系下的一种重要形式。本文以有人/无人机协同执行典型任务为研究背景, 针对构建可靠、全面的有人/无人机协同效能理论评估方法的问题展开深入研究。首先分析了未来有人/无人机的协同模式和运用规则; 然后采用协同系统综合指数模型, 在单机能力模型的基础上, 提出了一种有人/无人机编队协同效能评估方法; 最后基于 Xsim 仿真系统平台在典型任务下, 通过针对确定机型的多种编队组合仿真推演, 将协同效能仿真结果与理论计算结果进行分析对比, 协同效能排序的一致性验证了该理论评估方法具有一定的可靠性与可用性。可以预见, 未来战争有人/无人机的协同作战将被广泛应用。

关键词: 有人/无人机协同; 协同模式; 效能评估; 综合指数模型; Xsim 仿真

中图分类号: E926 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2021)01-62-09

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.1.008

Cooperative Effectiveness Evaluation of MAV/UAV for Typical Missions

YIN Hao, HOU Tingting, LI Dongguang

(Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Manned/Unmanned Aerial Vehicle (MAV/UAV) cooperative operation is an important form of C⁴ISR System. In this paper, based on the research background of cooperative operation of MAV/UAV, a reliable and comprehensive theoretical evaluation method of cooperative effectiveness of MAV/UAV is deeply studied. Firstly, the cooperative mode and application rules of MAV/UAV in the future are analyzed. Secondly, based on the single aircraft capability model, the evaluation method of MAV/UAV cooperative effectiveness is put forward by using the comprehensive index model of cooperative system. Finally, Xsim simulation platform is used to simulate the combination of multiple formation of certain aircraft type under the typical tasks, the simulation results of cooperative effectiveness and the theoretical calculation results are analyzed and compared. The consistency of collaborative effectiveness ranking verifies the reliability and availability of the theoretical evaluation method. It could be predicted that the cooperative operation of MAV/UAV will be widely used in the future war.

Key words: MAV/UAV Cooperation; Collaborative Model; Effectiveness Evaluation; Integrated Index Model; Xsim Simulation

1 引言

目前, 无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)

在作战中的应用越来越广泛, 可以携带多种传感器设备、执行多样的命令^[1], 但单架无人机往往难以完成某些复杂、多需求的任务, 只能起到锦

上添花的作用。受多方面性能的约束,无人机的作战能力与有人战机(Manned Aerial Vehicle, MAV)尚存在较大的差距,例如存在对卫星强依赖性、与远端指控中心通信不稳定性、对战场动态变化感知弱敏感性等突出问题。因此,在未来战争中,无人机与有人战机的密切协同配合、优势能力互补将直接影响战场的态势,其协同运用方式也在发展中不断发生改变,有人/无人机协同作战在短期战场时空下势必将成为一种常态^[2]。

目前美军主要利用有人直升机“阿帕奇”和无人机MQ-5B、RQ-7等进行混合编队功能需求定义、协同控制技术分析和实验验证^[3-4]。法国也将“阵风”飞机改装成无人机的控制机^[5],并且成功完成了“神经元”无人机与“阵风”有人战机共同飞行的实验,考虑了无人机的协调问题,制定了未来无人机的战技要求。

对于有人/无人机协同作战模式及效能的研究在国内初见萌芽,多数将协同作战模式当成作战流程、作战样式进行讨论,协同效能的研究仅仅停留在验证的设计阶段。例如王焱^[6]提出有人/无人机的协同作战模式有态势感知、协同攻击和协同防御三种,并进行了简略的介绍,但并未提出使用规则;刘纪文等人^[7]研究了有人/无人机协同作战的关键技术,提出主要包括协同态势评估、交互控制、目标分配等技术,并进行了详细的分析,为日后的理论研究和实验打下基础;闫晔^[8]针对有人/无人机协同中的交互技术进行了研究,提出采用自然语言理解及相关技术对无人机进行任务控制,并通过实验证明其设计的自然语言模块能够帮助无人机对简单的任务指令进行了解;姜禹呈等人^[9]建立了有人/无人机协同作战的网络拓扑模型,提出运用社团化算法解决超网络模型的设计难点,使得此网络模型更适合于评估系统的协同效果。

在协同系统效能评估方面已经有一些成熟的方法,例如龚喜盈等人^[10]在用于评估普通战斗机效能的对数法的基础上,建立了一种适应性很强的评估无人机综合性能的模式;阴小晖^[11]通过层次分析法确定指标的权重,利用层次分析法-模糊

综合评判法评估性能指标、通过计算证明了方法的科学性和合理性,为有人/无人机协同作战的系统效能的评估提供了研究思路;张永利等人^[12]采用层次分析法建立了有人/无人机协同作战指标体系,并用仿真软件进行了进一步的说明和计算,其研究结果对有人战机和无人机的资源分配具有一定的参考价值。

国内外针对有人/无人机协同作战已展开了大量的研究,同时也存在着巨大挑战,例如多个学科的交叉问题、有人/无人机协同模型的复杂性、大规模优化算法和随机事件^[13]。有人/无人机协同作战效能评估是协同作战领域的热点问题,但多数都只是在概念层面予以解释,研究有人/无人机协同作战,首先要分析有人/无人机协同作战系统组成与协同样式,包括应用场景与控制架构,剖析协同作战模式的本质;其次在可量化的系统功能能力基础之上,建立作战效能评估体系,通过验证模型的合理性和可靠性来更好地了解与预测有人/无人机协同作战的作战效果,同时也有助于武器装备的快速发展。

2 有人/无人机协同模式

有人/无人机协同作战系统主要由四个子系统组成,分别是地面指挥控制中心、有人战机、无人机和通信链路系统。指挥中心、无人机、有人战机通过通信链路传输共享情报、态势、指挥控制这三类信息;地面指挥控制中心指挥混合编队,有人战机指挥控制无人机,通过通信链路实现三者之间的协同;有人战机主要负责决策和任务分配,无人机完成侦察、监视,目标探测与攻击等任务。

2.1 协同侦察探测

单架有人战机与多架无人机组成混合编队对某区域执行侦察任务,可以提高跟踪质量,实时向指挥控制系统反馈目标未被分配、未处在被跟踪的状态,或是目标不在视场内导致无法跟踪的情况,从而提高有人/无人机协同系统的态势感知能力。在无人机执行任务过程中,由于目标的初

始位置未知,以及侦察区域存在威胁因素,因此目标的侦察过程十分复杂,甚至当任务区域过大,需要侦察的目标过多时,多无人机受飞行速度限制不一定能够在规定的时间内完成任务;在特殊侦察情况下,多无人机在威胁区域侦察时,遇到威胁需要避开,很容易丢失目标,为了防止丢失目标,无人机可以选择与有人战机进行任务协同;多无人机通常在比较危险的环境下执行任务,很可能出现故障或者被敌方击落,此时,利用有人战机机动决策,确保侦察任务的有效性;受搭载重量和种类的限制,无人机的机载传感器探测范围有限,不一定能够满足对各个目标的侦察需求,不同性能的目标需要不同性能的传感器来探测,此时利用有人/无人机协同决策分配,达到任务完成的要求。由此可见,仅依靠无人机所能发挥的侦察效能比较有限,组织多架有人/无人机编队协同执行侦察任务是未来战场上一种重要的军事行动方式,如图1所示。

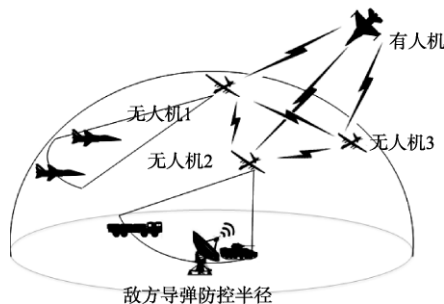


图1 有人/无人机协同侦察

Fig. 1 Manned/Unmanned Aerial Vehicle cooperative reconnaissance

2.2 协同目标打击

协同目标打击主要分为对空目标打击和对地目标打击两种方式。

对空目标打击(图2):由一架有人战机和两架无人机编队进行空中目标的打击,无人机位于有人战机前方,雷达只接收信号不发射电磁波,与此同时迅速接近目标,当目标进入无人机的火力杀伤范围内,位于后方的有人战机开始进行探测,并将目标的信息实时发送给无人机,并启动无人机武器发射指令,随后接替无人机进行制导,完成对敌方战机的打击。

对地目标打击(图3):有人战机指挥控制多架无人机共同打击地面目标。每架无人机均携带多种传感器和不同类型的对地攻击武器,如空地导弹、炸弹、机炮等,从而使各个无人机携带的载荷降低。各种类型的飞机密切协同,听从有人战机的指令,对地面目标进行打击。

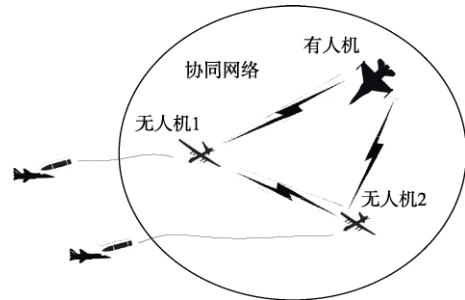


图2 对空目标攻击任务

Fig. 2 Attack mission on air targets

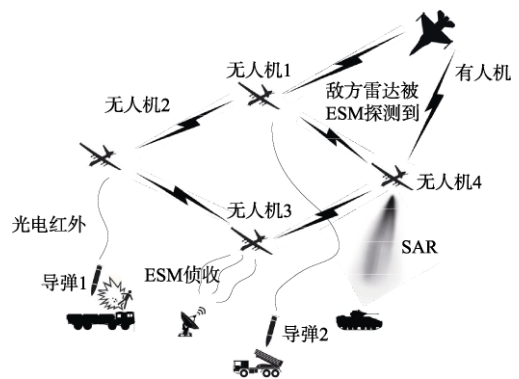


图3 对地面目标攻击任务

Fig. 3 Attack mission on ground targets

2.3 有人/无人机协同运用规则

随着人类信息化和智能化技术的快速进步与广泛应用,现代战争形式和战场环境发生了深远的变化,有人/无人机协同作战的模式已经逐渐应用于战争领域中多种任务的执行,极大地延伸了现代战场的时间轴和空间轴。但有人/无人机协同作战中自主性的发挥程度和规则是军事领域专家或学者持续关注的问题,尤其是在智能化战争中的定位,该扮演怎样的角色,也逐渐成为人与智能化机器协同作战领域中研究的热点。

国内外现有研究学者对“自主性”的概念定义也不尽相同^[14-15],总的来说是在无人参与的过程中,处于随机复杂情况条件下的无人机不间断

完成动作的能力。在混合编队协同作战指控关系中, 无人机更多地应用在已确定的任务中, 而操作员很少直接参与对控制系统的操作, 主要是处理高层次的规划、决策等。根据有人作战飞机飞行员对无人机控制程度的差别, 可将其自主等级划归为以下 10 个, 同时对其中的某些相似级别进行了合并^[16], 如表 1 所示。

表 1 Paraturaman 的无人机自主等级划分

Table 1 Paraturaman's classification of UAV autonomy

SV-LOV	LOA	自主等级描述
1	I	智能系统不提供任何帮助, 由人采取所有决策和行动
2	II	智能组件系统提供所有可能的决策和行动集合
3	III	智能组件提供可选的决策/行动子集
4/5	IV	智能组件系统提供一个决策/行动方案, 如果操作员批准就实施。称为同意管理模式
6	V	智能组件系统提供一个决策/行动方案, 该方案在执行前允许操作员在一段时间内否决。否则, 系统自动执行该决策/行动方案。称为例外管理模式
7/8/9/10	VI	操作员不参与决策过程, 计算机智能组件系统自主决策和实现

由表 1 可知, 无人机受到有人作战飞机操作员的完全控制是可靠性最高的控制方式, 但势必给操作员身体及心理造成极大的伤害; 而人不在回路的控制, 很可能会导致无人机完全自主根据规则去执行任务, 此种作战现象所造成的代价是无法估量的。通过对现代智能化程度发展状态的分析, 可定义有人/无人机协同作战中操作员与飞机之间交互的内容、方式, 如表 2 所示。

表 2 有人机与无人机之间交互的内容及方式

Table 2 Content and mode of interaction between MAV and UAV

自主等级	交互内容	交互方式
A ₄ (例外管理)	无人机提供任务执行情况及系统状态	无人机主动反馈, 操作员在时限内不否定即执行
A ₃ (同意管理)	无人机提供态势认知结果和任务决策结果, 操作员认可或修改	无人机在降低动作等级之前等待操作员的反馈
A ₂ (有人决策)	无人机提供态势认知结果和任务参数, 操作员决策	无人机在自保之前等待操作员的决策
A ₁ (指令控制)	无人机提供态势参数, 操作员提供任务指令	无人机减缓行动速度等待操作员的指令

根据对现代战争形势的衡量, 研究判定: 在未来战场很长的一段时间内, 考虑有人控制操作员所面临的巨大压力以及无人控制下的不可估量的代价, 有人/无人机协同作战研究常规应采用的监督控制模式为同意管理模式。

但根据现代战争中无人机使用情况, 并结合本文对有人/无人机协同模式的研究, 本文设计了一种适用于指令控制模式的有人/无人机协同作战系统的控制架构, 如图 4 所示。

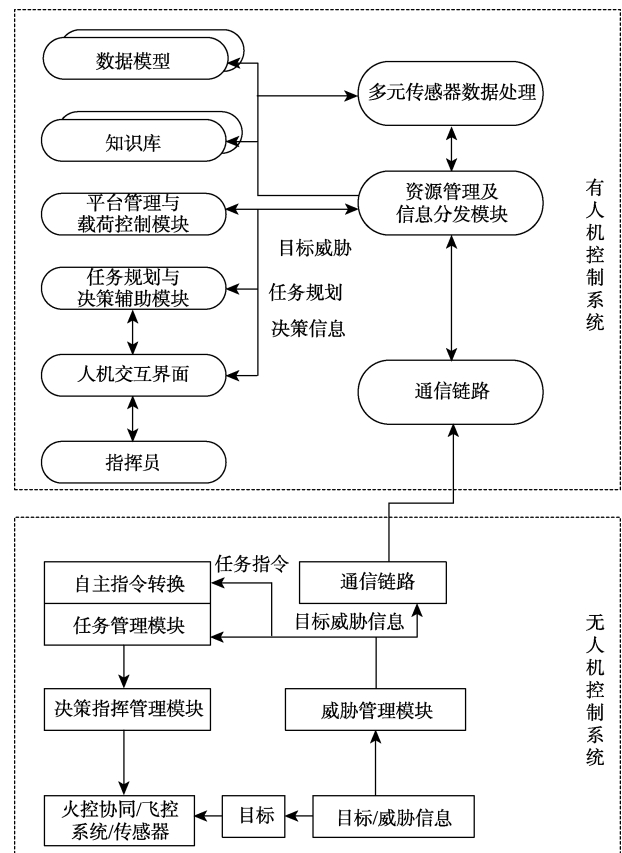


图 4 有人/无人机协同作战系统的控制架构

Fig. 4 Control architecture of MAV/ UAV cooperative operation system

无人机的控制模块主要包括任务管理、决策指挥管理、威胁管理, 无人机向指挥员提供目标、威胁信息, 指挥员向无人机发布任务指令, 体现了在现代战争中人依然要处于最终决策的重要位置, “人在回路”可充分将人机智能运用在实际作战中, 将高层次的决策交还于人是有人/无人机协同作战的核心原则。

3 有人/无人机协同作战效能评估

3.1 协同系统效能模型

基于空战理论和作战任务,构建有人/无人机协同作战效能评估指标体系层次,如图5所示。其中包括三个层次:整体效能层、系统能力层、指标层,下层详细描述了上层分系统的各种能力。

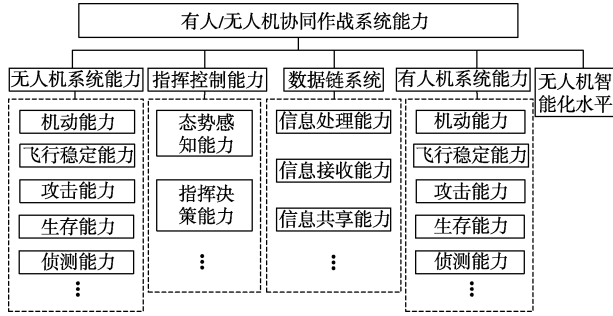


图5 有人/无人机协同作战效能评估指标体系

Fig. 5 Effectiveness evaluation system of MAV/UAV cooperative operation

本文评估有人/无人机协同作战系统效能主要是将其与纯无人机协同的作战效能进行对比,优选不同任务下的编队组合,系统评价结果均是相对关系,主客观因素定性综合评价,无需精确标准化来计算作战飞机的效能。

对有人/无人机协同作战系统来说,根据其典型协同作战的特点,指挥控制能力、无人机智能程度和数据链能力是耦合关系,有人战机的主要任务是辅助攻击,故有人战机能力与无人机能力权重采用统计相关性分析计算设定^[17],单机作战能力与其他能力无关,由此建立有人/无人机系统的协同作战数学模型 S 为

$$S = 0.9 \overline{D_C} \cdot \overline{A_D} \cdot I_{UAV_i} \sum_{i=1}^n C_{UAV_i} n^\mu + 0.1 \sum_{i=1}^m C_{MAV_i} m^\mu \quad (1)$$

其中, D_C 为系统数据链能力, A_D 为有人战机指挥决策能力, I_{UAV_i} 为第 i 架无人机智能水平, C_{UAV_i} 、 C_{MAV_i} 分别为第 i 架无人机、有人战机的单机效能, n, m 为无人机和有人战机架数。由于协同作战会降低单机能力优势, μ 表示飞机总数对单机效能的影响系数,根据专家经验, μ 与飞机架数的关系如表3所示。

表3 飞机总数对单机效能的影响

Table 3 Effect of total number of aircraft on efficiency of a single aircraft

飞机架数	2	3	4
μ	1	0.9	0.8

各分项能力指数上方的“—”是标准化处理后的数值,此时各指标数值都处于0到1之间,能够使得数据之间差异较小,有相对一致性。目前数据标准化处理方法有多种,可分为直线型方法、折线型方法、曲线型方法。考虑各种性能参数的物理意义,本文采用非线性S型可导函数归一法^[16],该方法能够突出指标的饱和特性。

$$f(x) = \frac{1}{1 + \alpha \cdot e^{-\beta x}}, \quad \alpha > 0, \beta > 0 \quad (2)$$

其中, $f(x)$ 的取值范围在0-1之间,某个指标的不断增大不会使评估的结果无限增大, α, β 为调节曲线的参数。

根据S型可导函数,对于数值越大越好的项,归一化准则为

$$\bar{A}_i = \frac{1}{1 + e^{-\left[\frac{6}{A_{i\max} - A_{i\min}} \left(A_i - \frac{A_{i\max} + A_{i\min}}{2} \right) \right]}} \quad (3)$$

其中, \bar{A}_i 是处理后的值, A_i 是输入的原始数据; $A_{i\max}$ 为每类指标数据的最大值, $A_{i\min}$ 是每类指标数据的最小值(对于数值越小性能越优的指标,采用 $A_{i\max} - A_{i\min}$ 作为分母)。

(1) 根据有人/无人机系统各分能力模型,参考数据链支撑能力评估方法^[18],系统的数据链能力的数学模型如下:

$$D_C = 0.2M_D + 0.2M_R + 0.6M_S \quad (4)$$

其中, M_R 为信息接收能力; M_D 为信息处理能力; M_S 为信息共享能力。

$$M_R = D_E = (D_{\max} - D_L) \cdot (t_c - t_p) \quad (5)$$

其中, D_E 为有效的数据率, t_p 为单位信息传播所需的时间, D_{\max} 为能达到的最大数据率, t_c 为单位接收信息的时隙的持续时间, D_L 为损失的数据率。

$$M_D = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n} \quad (6)$$

其中, q_i 是度量传递第 i 条信息时效性的量, n 为传递信息的总数。

$$M_S = \frac{1}{n_r} \cdot \frac{\sum_{y=1}^{n_r} (M_r)_y}{\sum_{x=1}^{n_s} (M_s)_x} \quad (7)$$

其中, M_r 代表各分系统接收的信息, n_s 代表发送信息的各分系统数目, n_r 代表接收信息的各分系统数目, M_s 为各分系统发送的信息。

(2) 系统的指挥控制决策能力的数学模型如下:

$$A_D = 0.4 \times \frac{U}{U_0} \times \sum_{i=1}^n (1 - E_i) q_i + 0.6 \times \frac{t_{\max}}{\sum_{j=1}^m \alpha_j t_j} \quad (8)$$

其中, U/U_0 代表信息的完备性; $1 - E_i$ 代表感知的精确度, E_i 代表感知到的目标特征与实际目标特征之间的偏差程度, q_i 是信息处理融合的时效性指标; t_{\max} 为决策可用最长时间, t_j 为做出单个决策所用的时间, α_j 为从第 i 个决策行动实施后任务的实际完成程度; 其能力权重参考在役考核体系架构^[19]。

I_{UAV} 是依据美国相关研究单位定义的自主控制 10 个等级计算出来的^[20]。

$$N = \frac{U}{U_0} \times \sum_{i=1}^n (1 - E_i) q_i \quad (9)$$

其中, U/U_0 代表信息的完备性, U 和 U_0 分别表示正确的目标数量和客观存在的目标数量, $(1 - E_i)$ 代表感知的精确度, E_i 代表感知到的目标特征与实际目标特征之间的偏差程度, q_i 是信息处理融合的时效性指标。

$$L = \frac{t_{\max}}{\sum_{j=1}^m \alpha_j t_j} \quad (10)$$

其中, t_{\max} 为决策可用最长时间, t_j 为做出单个决策所用的时间, α_j 为从第 i 个决策行动实施后任务的实际完成程度。

3.2 单机效能模型

根据单机的效能指标, 构建飞机作战能力的数学模型:

$$C = \omega_1 \cdot \overline{C_A} + \omega_2 \cdot \overline{C_t} + \omega_3 \cdot \overline{C_s} + \omega_4 \cdot \overline{I} + \omega_5 \cdot \overline{C_R} \quad (11)$$

其中, C_A 为攻击能力, C_t 为机动能力, C_s 为生存能力, I 为侦测能力, C_R 为飞行稳定能力, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$ 为各分能力的权重, 效能评估仅考虑飞机作战能力, 因而将环境影响因子、系统可靠性等外界因素忽略。受篇幅所限, 飞机各分能力数学模型给出简略说明, 各能力模型及其系数均为研究成果表达^[21-22]。

(1) 机动能力 C_t : 相关参数包括飞机平飞的最大单位重量剩余功率 SEP, 最大的瞬时转弯角速度 ω_{\max} , 最大推重比 (飞机的最大加力推力与飞机起飞重量的比值) $T_{m,\max}$, 最大稳定盘旋过载 N_{\max} , 计算公式如下:

$$C_t = 0.35 S \overline{SEP} + 0.25 \overline{N_{\max}} + 0.25 \overline{\omega_{\max}} + 0.15 \overline{T_{m,\max}} \quad (12)$$

(2) 攻击能力 C_A 的相关变量有: 载弹量 W 、发射武器的距离 L 、发现目标能力 Det (取值准则参考文献[18])、武器的挂载数量 n 和武器精度系数 C_c (取值准则参考文献[18]), 计算公式为

$$C_A = \text{Det} \cdot \sum_{i=1}^k W_i \cdot L_i \cdot C_c \cdot \sqrt{n_i} \quad (13)$$

(3) 生存能力模型仅考虑其自身参数, 以下为其数学模型:

$$C_s = \left(\frac{10}{l} \times \frac{15}{w} \times \frac{5}{\text{RCS}} \right)^{0.0625} \quad (14)$$

其中, w 代表飞机全长, RCS 为雷达反射截面积, l 代表翼展。

(4) 侦测能力模型分为目标侦察能力和目标识别能力。

目标侦察能力: 装备高性能雷达的无人机可配合有人战机进行联合侦察, 延伸作战半径, 飞机雷达扫描波成扇形, 则探测领域为

$$T_A = \frac{2\pi r_{\max}^3 \theta_A}{3} \quad (15)$$

其中, θ_A 为扫描波仰角; r_{\max} 指雷达扫描波的最远传播距离。

扫描频率:

$$T_t = \frac{1}{T_s} \quad (16)$$

其中, T_s 为扫描周期, 最终目标侦察能力为 (ρ_1 、 ρ_2 为比例系数):

$$I_T = \rho_1 \overline{T_A} + \rho_2 \overline{T_I} \quad (17)$$

目标识别能力: 目标发现概率越高, 越容易抓住作战时机, 进而掌握制空权。因而, 高分辨率的雷达是目标识别的重要设备, 本文用雷达分辨率来表示目标识别能力。

雷达分辨率的计算公式为

$$P_c = \frac{2^k \beta n_\beta n_\varepsilon T_d}{\left(\frac{d}{2}\right) R_0^3 \theta_x} \quad (18)$$

其中, d 为天线孔径, k 是单位距离的采样次数, n_β 为方位角测量误差加权系数, T_d 是波束在任务方向上停留的时间, θ_x 为空间方位角, β 指信号带宽, R_0 是雷达识别能力的参考距离。

比幅测角的计算公式为

$$n_\varepsilon = 0.6\sqrt{N} \quad (19)$$

根据战场实际情况给目标侦测、识别能力取不同权重 ε_1 、 ε_2 , 得到侦测能力指标模型为

$$I = \varepsilon_1 \overline{I_d} + \varepsilon_2 \overline{I_t} \quad (20)$$

(5) 飞行稳定能力 C_R : 相关参数包括作战半径 R , 飞机升限 H , 最大平飞马赫数 V_{\max} 以及巡航马赫数 V_s , 计算公式如下:

$$C_R = \frac{R}{1270} \times \frac{H}{18000} \times \sqrt{\frac{V_{\max}}{1.95} \times \frac{V_s}{0.8}} \quad (21)$$

飞机的作战效能评估模型采用层次分析法建立, 根据不同作战任务的需求, 采用专家打分法, 构建各层次的判断矩阵, 并通过一致性检验, 得到飞机单机效能的各项能力权重如表 4 所示。

表 4 飞机单机效能的各项能力权重

Table 4 Each capability weight of single aircraft efficiency

能力指标	侦察任务	打击任务
攻击能力	0.1117	0.4105
侦测能力	0.4163	0.1036
机动能力	0.2387	0.2368
生存能力	0.1557	0.1725
飞行稳定能力	0.0776	0.0766

4 仿真结果及分析

4.1 试验想定说明

针对有人/无人机协同作战模式作战流程中最重要的两个任务环节——协同侦察探测任务和协同目标打击任务提出了两个作战想定。有人/无人机协同应用场景及作战元素如表 5 所示。

表 5 有人/无人机协同应用场景说明

Table 5 Background description of MAV/ UAV cooperative operation

作战任务	蓝方作战元素	红方作战元素	想定特点
协同侦察探测	机场 1	机场 1	①协同侦察选择具有针对性的探测雷达, 突出典型作战任务。②涵盖协同样式中主要内容。③考虑了协同战斗类型的可机动性。④加入了实际作战场景中的随机因素, 例如命中概率等。⑤体现了协同行动的优先级控制以及多层级的指控关系。⑥考虑了实际武器装备的作战性能, 选择具有典型的任务执行策略
	机场 2	红 12 地空导弹武器系统	
	雷达站	红方雷达站	
	无人机 A	红方地面指挥所	
	无人机 B	/	
	F-16	/	
协同目标打击	蓝方地面指挥所	/	
	机场 1	机场 1	
	机场 2	机场 2	
	爱国者防空导弹武器系统	红 12 地空导弹武器系统	
	雷达站	红方雷达站	
	无人机 A	J-11	
无人机 B	红方地面指挥所		
F-16	地面群防指挥所		
蓝方地面指挥所	/		

以美军典型侦察打击一体无人机 RQ/MQ-1A (无人机 A)、MQ-9 (无人机 B) 和典型战斗机 F-16 (F) 的基本数据为参考, 仿真过程采用北京华如科技股份有限公司的 Xsim Studio 可扩展仿真平台 (简称 Xsim) 进行作战效能评估, 如图 6 所示。

Xsim 仿真平台为国内知名权威的协同作战与效能评估的仿真系统, 根据其可靠的仿真评估结果与理论计算整体效能以及各项分能力并对数据进行归一化处理结果对比^[23-26], 可定性验证理论评估模型与方法的准确性。

4.2 试验结果分析

只考虑一种型号的有人战机参与编队的情况

下, 认为混合编队的指挥决策能力基本无变化, 但高于无人机编队的指挥决策能力。以 A、B、F 代指“捕食者”无人机、“死神”无人机和战斗机 F-16, 则基于具体任务有人/无人机协同作战系统的飞机综合能力理论评估如表 6 所示。

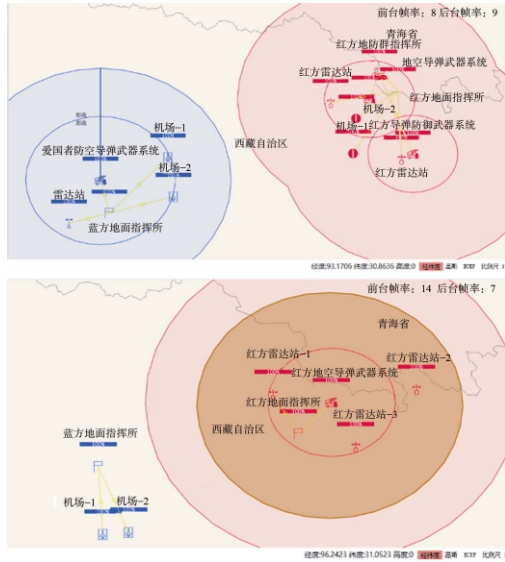


图 6 协同侦察/打击任务作战想定

Fig. 6 Cooperative reconnaissance/attack mission combat scenarios

表 6 飞机综合能力评估结果

Table 6 Aircraft comprehensive capability assessment results

任务	F-16	捕食者 A	死神
S 侦察	0.8117	0.3048	0.2288
S 打击	0.7965	0.2325	0.2682

仿真试验选取 Xsim Studio 评估任务的方案事后评估分析, 将作战想定进行 100 次仿真后得到的所有数据计入仿真评估系统中, 主要包括武器发射态势信息、实体毁伤态势信息、实体信息等, 可以得到协同侦察与打击的多方案样本评估对比结果, 如表 7 所示。

由表 7 理论与仿真评估结果可知, 理论效能评估与仿真效能评估结果相吻合, 即在协同侦察探测任务中, 一架 F-16 带领两架无人机 A 编队 (1F2A) 的作战效能最高; 一架 F-16 带领两架无人机的编队 (1F2B) 进行协同打击效能最高。同时, 其余几种组合方式的协同打击效能、协同侦察效能的大小排序也一致, 由此验证了效能评

估模型的相对可靠性和可用性。

表 7 有人/无人机协同作战多方案样本评估对比

Table 7 Comparison of multi-program sample on MAV/UAV cooperative operation

作战任务	想定名称	仿真评估结果	理论评估结果
协同侦察探测	1F2B	0.5812	0.6900
	1F2A	0.8753	0.8922
	1F1A1B	0.8334	0.7911
	3B	0.0762	0.3563
	3A	0.1181	0.4613
协同目标打击	1F2B	0.7845	0.7948
	1F2A	0.4127	0.6999
	1F1A1B	0.5859	0.7473
	3B	0.3772	0.4111
	3A	0.3441	0.3615

5 结 论

本文以有人/无人机协同执行作战相关任务为背景, 对其效能评估的指标体系和模型进行了深入的研究, 将两种典型作战任务想定下在高可信度的仿真软件中推演, 并分析了仿真结果。

(1) 分析有人/无人机协同的作战模式, 包括典型的作战任务、作战流程和作战样式, 以此提出了有人/无人机协同作战的使用规则。

(2) 构建了一种有人/无人机协同作战系统的效能评估指标体系并建立了综合指数模型, 对有人/无人机混合编队组合方式进行了优化。

(3) 提出了协同侦察、协同打击的作战想定, 对 100 次仿真的数据进行分析处理, 评估系统作战效能, 与理论结果对比, 对效能评估模型的合理性进行验证。

未来在对有人战机和无人机进行组合编队时, 可预先对不同类型的无人机进行单机效能的评估, 基于不同的协同样式, 选择最优的编队组合方式。现阶段有人战机的性能在很多方面都优于无人机, 有人/无人机协同作战中可以由指挥员根据战场态势做出临机决策。

有人/无人机协同作战是未来空中作战的主要方式之一, 涉及多个方面的复杂问题, 本文仅对其中某些重点问题进行了研究, 忽略了其中一

些实际因素。进一步的研究考虑在效能评估中加入飞机可用度、可靠性、效费比等多种因素,完善评估方法,并进行半实物仿真试验,以实际数据为模型提供支撑,可使评估结果更具有真实性。

参 考 文 献

- [1] Li B, Wang Y, Zhang Y. Cooperative task assignment algorithm of manned/unmanned aerial vehicle in uncertain environment[A], ITNEC 2017: 5.
- [2] 丁达理, 谢磊, 王渊. 有人机/无人机协同作战运用及对战争形态影响[J]. 无人系统技术, 2020, 4: 1-9.
- [3] 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, 4: 83-90.
- [4] 姜禹呈, 郭基联. 有人/无人机协同效果评估模型设计[J]. 军事运筹与系统工程, 2016, 30(3): 28-31.
- [5] 马向玲, 雷宇曜. 有人/无人机协同作战关键技术[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(1): 78-81.
- [6] 王焱. 有人/无人机协同作战[J]. 电讯技术, 2013, 53(9): 1253-1258.
- [7] 刘纪文, 袁胜智, 漆云海. 有人战机/无人机协同作战系统关键技术研究[J]. 舰船电子工程, 2012(6): 1-3.
- [8] 闫晔. 有人/无人机协同中的交互控制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [9] 姜禹呈, 郭基联. 有人/无人机协同效果评估模型设计[J]. 军事运筹与系统工程, 2016, 30(3): 28-31.
- [10] 龚喜盈, 周洲. 无人战斗机作战效能分析[J]. 飞行力学, 2006(3): 30-32.
- [11] 阴小晖. 有人/无人机协同作战效能评估研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013.
- [12] 张永利, 孙治水, 周荣坤. 基于 AHP-模糊综合评判法的有人/无人机协同作战效能评估[J]. 舰船电子对抗, 2015, 38(6): 80-84.
- [13] 王新尧, 孙厚俊, 王朝阳, 等. 有人机/无人机编队协同作战决策系统架构设计[J]. 无人系统技术, 2020, 4: 66-72.
- [14] 刘宏强, 魏贤智, 付昭旺. 有人战机/无人机编队协同攻击任务分配方法研究[J]. 电光与控制, 2013, 20(6): 16-19.
- [15] 刘树光, 茹乐, 王柯. 无人机自主性评价方法新进展[J]. 飞航导弹, 2019(2): 43-49.
- [16] 张国忠, 沈林成, 朱华勇. 多无人机监督控制技术的发展现状及启示[J]. 国防科技, 2009, 30(4): 5-10.
- [17] 李璇. 基于作战数据分析的装备评价与运用方案决策研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [18] 魏立柱, 彭益. 基于模糊层次分析法的数据链支撑能力评估[J]. 山东工业技术, 2015(16): 254-271.
- [19] 彭文成, 张超. 指控分系统在役考核作战能力指标体系构建[J]. 信息系统工程, 2017(12): 132-134.
- [20] 高劲松, 王朝阳, 陈哨东. 对美国无人机自主控制等级的研究[J]. 航空科学技术, 2010(2): 40-43.
- [21] 刘东洋, 孙鹏, 张杰勇. 基于 GAHP 的战斗机综合作战能力评估[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(5): 65-69.
- [22] 朱宝臻, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 2版. 北京: 航空工业出版社, 2006.
- [23] 陈焯平. 基于 ADC 法的武器系统效能评估研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [24] 董彦非, 崔巍, 张旺. 有人/无人机协同空战效能评估的综合指数模型[J]. 飞行力学, 2014, 32(5): 472-476.
- [25] 刘静静. F-16 战斗机及其 AN/APG-66/68/80 火控雷达[J]. 电子工程信息, 2005(5): 47-55.
- [26] 王蕾. 捕食者无人机综述[C]. 中国航空学会轻型飞行器专业委员会 2005 年学术交流会议论文集, 2005.

作者简介:



尹昊 (1989-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为武器系统总体技术、无人系统分析与设计、多机协同与智能控制。



侯婷婷 (1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为武器系统总体技术、多智能体协同控制。



李东光 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为微小型武器系统分析与设计、灵巧弹药与引信、动态测控技术。本文通讯作者。

[引用格式] 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.

陆战分队空地一体无人作战系统装备体系构想研究

龚旻¹, 卜昭鹏², 陈梅¹, 王庆彪³, 王鸿³

(1. 中国华腾工业有限公司, 北京 100080; 2. 31663 部队, 云南 650032; 3. 77126 部队, 云南 661600)

摘要: 在智能战争时代数字陆战场形势下, 智能化、无人化、网络化陆战分队空地一体无人作战系统装备体系已成为未来陆战装备的重要发展方向。首先, 重点研析美、俄分队级无人作战系统装备体系发展趋势, 明确其以构建陆战分队部队新质战斗力为核心, 大力开展陆战分队级新型无人作战装备建设的发展方向; 其次, 从独立作战、持续作战、指挥控制、情报侦察、火力毁伤等层面, 对比分析新型无人作战排作战优势; 然后, 以构建一个轻量级 C⁴ISRK 作战装备体系为目标, 提出一种以“有/无人协同作战指控”为核心的陆战分队空地一体无人作战系统构建方式; 最后, 指出装备研发重点关键技术, 以期重塑“人与机器”的战场功能配置, 为未来陆战分队作战装备体系建设发展研究提供有益参考。

关键词: 智能战争; 陆战分队; 新型无人作战排; 空地一体; 有/无人协同; 作战指控系统

中图分类号: E917

文献标识码: A

文章编号: 2096-5915(2021)01-71-08

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.1.009

Construction Strategy Study on Air-ground Unmanned Operation System for Land Combat Units

GONG Min¹, BU Zhaopeng², CHEN Mei¹, WANG Qingbiao³, WANG Hong³

(1. China Volant Industry Co., Ltd., CASIC, Beijing 100080, China; 2. 31663 PLA Troops, Yunnan 650032, China; 3. 77126 PLA Troops, Yunnan 661600, China)

Abstract: Air-ground unmanned operation system, featured with intelligence, unmanned operation and networking, becomes a key trend for land combat equipment compelled by the requirements of digital battlefields in intelligent war. Firstly, trends of unmanned combat systems in USA & Russia are studied, and their emphasis on new-style unmanned operation system for land combat units with new combat capability as the core is shown. Secondly, combat advantages of a new-type unmanned platoon are analyzed from independent and continuous operation, command and control, reconnaissance, firepower damage, etc. Thirdly, aiming to build a light C⁴ISRK system, a construction strategy on an air-ground combat system with command & control of manned-unmanned cooperative engagement as the core is proposed. Finally, key technologies to be developed are pointed out, so as to reinvent the functional allocation of man and machine on the battlefield and provide references for the development of unmanned combat system in the future.

Key words: Intelligent War; Land Combat Units; New-type Unmanned Platoon; Air-Ground Operation; Manned-unmanned Cooperative Engagement; Command & Control System

1 引言

伊拉克、叙利亚、也门等国际热点地区实战战例表明,分队级中小规模编组作战已成为现代战场主要作战形式之一。随着智能化战争时代来临,传统陆战分队以层级式指挥、“机动平台”为中心、集中兵力优势、地面攻击为主的作战模式,逐步向集任务中心式智能指挥决策、战场综合态势感知、有/无人协同指控^[1]、分布式空地无人编队作战、火力网络化集群射击^[2]、无中心自组网通信为一体的新型空地一体无人作战模式发生深刻演变。未来陆战分队需适应全天候、全时段复杂多变的战场环境,在敌我犬牙交错的时敏变化态势下,有效应对小规模、高烈度特殊作战任务,充分利用天、空、地、电磁、网络等多域信息优势,将作战人员与新型作战装备(察打一体无人机、无人导弹战车)及智能弹药进行有机结合^[3-5],创新空地一体无人体系破击战等新型战法,形成非对称信息优势、决策优势和行动优势。因此,研究如何构建智能战争时代陆战分队空地一体无人作战系统装备体系,对实现陆战分队快速自我构建新型有/无人协同、空地协同作战能力,快速形成新质多域作战能力具有重要意义。

2 美俄分队级无人作战系统装备体系发展趋势及优势分析

2.1 美国机器人战车部队装备体系建设

无人装备体系建设是美国陆军建设的重点,也是未来的主要发展方向之一。2009—2019年,美国国防部、陆军能力集成中心、陆军部、陆军机器人系统联合项目办公室等单位陆续发布了《机器人战略白皮书》《陆军无人地面车辆战略》《无人地面系统路线图》《美无人系统一体化路线图》《机器人和自主系统战略》《美国陆军科学与技术项目备忘录》等规划文件^[6-7],全面勾画未来25年无人系统的建设发展思路(见图1):自2020年起实现扩大作战人员作战范围,2025

年实现有/无人情报编组,2030年完成自主编队行动,2040年最终实现联合兵种机动(见图2),把无人系统部署至反介入/区域拒止(A2/AD)区域,以实现在该区域的行动自由权。美军以陆战分队级作战部队装备建设为核心,计划在2026年装备第一支以智能无人装备为合作伙伴的机器人战车部队。



图1 美国陆军2015—2040年机器人和自主系统能力发展规划^[8]

Fig. 1 Robotic and autonomous systems roadmap of the U.S. army FY 2015—2040^[8]



图2 美国陆军机器人和自主系统战略

Fig. 2 Robotic and autonomous systems strategy of the U.S. army

2.1.1 美陆军多域作战机动排设想及作战效能推演

2019 年, 美陆军发布 2028 年多域作战机动排设想^[9], 给出一个典型的排级多域作战任务场景(见图 3)。排级智能有/无人协同作战指控系统可快速整合情报侦察、指挥控制、火力毁伤、机动突击、整体防护和综合保障等能力, 通过无人机和无人战车混合编队进行空地一体全方位态势感知, 将作战任务和战术行动图通过战术网络实时传送到作战单兵信息化装备, 引导班组级作战单位快速到达指定位置, 协助友军识别目标和作战评估。利用无人装备执行高危作战任务, 并通过智能弹药精确打击降低附带损伤, 人员非接触快速击败威胁目标, 瓦解敌方作战意志。同期, 美陆军机动作战实验室进行了“有/无人混编步兵排作战实验”推演, 设置一个装备无人机和地面机器人的美步兵排进攻假想敌 1 个步兵连的作战场景, 其控制面积从传统步兵排不足 1 km² 扩大到 75 km² 以上, 火力臂增加近 10 倍, 作战士兵通过网络化智能控制无人机和地面机器人混合编队, 战斗力突破了传统作战理论攻防兵力 3:1 限制, 展示了巨大作战优势。

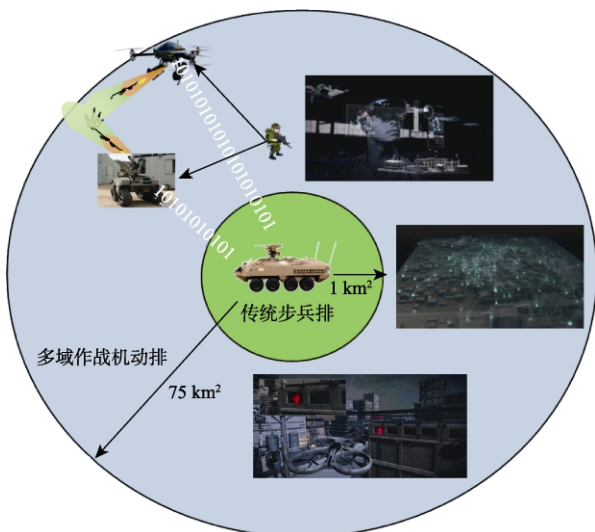


图 3 美国 2028 年多域作战机动排设想示意图
Fig. 3 Diagram of the U.S. Army in multi-domain operation 2028

2.1.2 美 DARPA “班组 X” 试验项目

美国国防预先研究计划局 (DARPA) 于 2016

年 3 月正式启动“班组 X”试验项目(见图 4)。该项目通过系统集成无人机、无人地面车辆、先进传感器等新装备和机器学习等新技术, 从而提升班组多域作战环境中的共享态势感知与有/无人协同组网作战能力。2018 年 11 月, 美军对洛克希德·马丁公司的“变形班组增强频谱态势感知与独立定位系统”以及 CACI 国际公司的“电子攻击模块班组系统”进行了有/无人编队试验, 验证了人工智能装备与步兵班组的高效协同作战能力^[10-11]。美军重点推进“班组 X”试验项目, 计划构建智能无人装备为合作伙伴的作战部队, 通过利用身体、认知和装备资源来降低班组机动时间并扩大机动空间; 通过有/无人火力和机动同步来塑造战场优势(见图 5)。由此可见, 有/无人协同班组将成为未来陆战分队配置的新亮点。

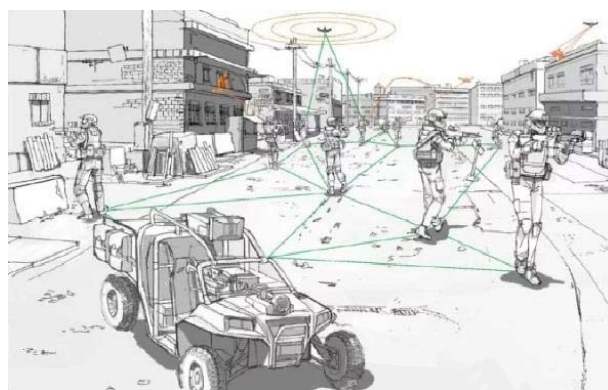


图 4 美国“班组 X”试验示意图
Fig. 4 Diagram of Squad X experimentation

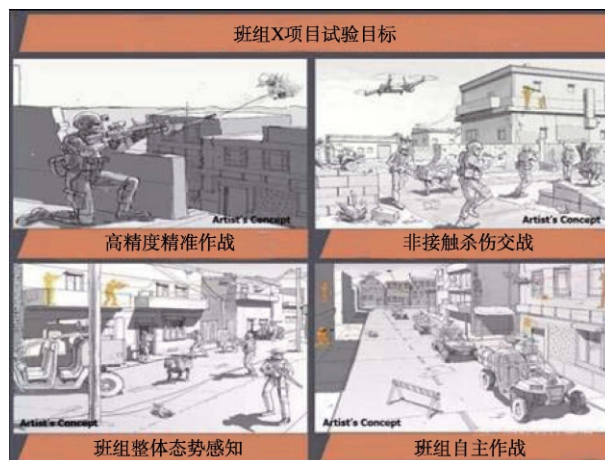


图 5 美国“班组 X”试验目标
Fig. 5 Squad X experimentation goals

2.1.3 美“龙骑兵”班组小队 (MDS)

美国国防咨询公司总裁兼高级分析师杰夫·贝克尔 (Jeff Becker) 提出了多域“龙骑兵”小队 (MDS) 设想, 给出了 2035—2050 年推荐的班组编成、武器装备及作战模式^[12]。MDS 由 4 个火力队共 12 名士兵 (信息化单兵)、4 辆机动步兵战车 (IMV)、8 个战斗侦察机器人、1 辆机动无人支援车 (MRS-V)、1 辆间瞄火力支援车 (IFS-V) 和 12 架近空支援无人机编队组成, 构建班组空地一体无人作战能力 (见图 6)。

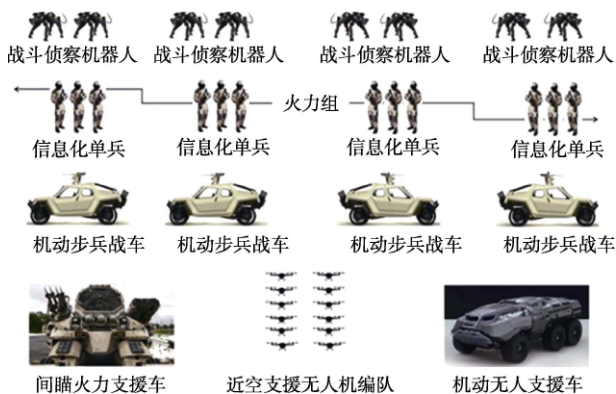


图 6 美“龙骑兵”班组小队

Fig. 6 Diagram of MDS

2.2 俄罗斯无人作战系统建设

俄罗斯在无人作战平台领域虽然起步较晚, 但研发速度较快, 成为近年来俄罗斯军队建设不可忽视的亮点。2014 年 2 月 15 日, 俄罗斯总理梅德韦杰夫签署命令, 宣布成立机器人技术科研试验中心; 2015 年 12 月 16 日, 俄罗斯总统普京签署总统令, 宣布成立国家机器人技术发展中心。这两个机构的成立, 意味着俄罗斯已经开始在国家层面对无人作战系统的建设发展进行总体规划, 重点关注无人机和地面无人战车的发展。俄军《2025 年前未来军用机器人技术装备研发》综合计划表明, 2020 年开始制定“机器人部队组建任务”路线图, 2025 年完成组建战斗机器人部队, 目标是无人装备在俄军装备比重达 30%。

2.2.1 俄罗斯“仙女座-D”自动化指控系统

俄军在叙利亚首次使用“仙女座-D”自动化指控系统 (见图 7)。该系统具有实时综合态势信

息收集、处理和分发能力, 可实现分队级作战指挥部到士兵一体化指挥, 曾指控 6 辆“平台-M”无人战车、4 辆“暗语”轮式无人侦察车与 3 架侦察无人机主导拉塔基亚某高地正面作战行动, 仅以协同参战士兵 4 人轻伤的代价, 击毙了大约 70 名武装分子^[11-13], 显示出陆战分队级有/无人协同作战的巨大行动优势。俄罗斯正发展天王星-9、“战友升级型”、“风暴 R&D”等重型无人装甲作战平台, 并逐步提升其自动化分析情报数据、自主探测、目标分类识别, 独立决策和攻击等作战能力^[14], 未来“仙女座-D”自动化指控系统和重型无人装甲作战平台组成的分队级战斗机器人部队将具备机动灵活、指挥网络抗毁伤能力好、高危作战任务执行力强、低附带损伤等显著优势。



图 7 俄罗斯“仙女座-D”自动化指控系统

Fig. 7 “Andromeda-D” automatic command and control system

2.2.2 俄罗斯新型反坦克集群系统

2019 年, 俄罗斯 Dahir Insaat 新概念公司宣传了新型反坦克集群系统作战设想^[15] (见图 8)。武器系统中反坦克无人机火箭发射车采取皮卡等小型车辆加装火箭模块 (2 个), 具有伪装、快速机动、灵活部署和简易维修等特点; 反坦克无人机与火箭弹实现共形设计, 发射时呈现火箭弹姿态, 快速到达指定空域, 侦察时呈现无人机空中集群值守态势, 攻击时再次转换成火箭弹制导模式对坦克目标实现精准攻击; 指控系统采用人机交互可视化指控系统, 快速控制反坦克无人机集群建立战场态势, 并完成攻击无人机集群时空位置分布。



图 8 新型反坦克集群系统作战设想

Fig. 8 Operational conception of anti-tank swarm system

2.3 作战能力优势分析

未来,美俄以构建陆战分队级部队新质战斗力为核心,大力开展陆战分队级新型无人作战系统装备建设,创新实践有/无人协同新型战术战法,与传统机步排相比具有以下作战优势,见表 1。

表 1 新型无人作战排与传统机步排作战能力对比

Table 1 Combat capability comparison between new-type unmanned platoon and traditional unmanned platoon

单要素能力	新型无人作战排	传统机步排
独立作战任务能力	可独立遂行空地一体、有/无人协同作战任务。	需配属其他兵种作战。
持续作战能力	不受人体生理极限限制,主要作战装备均为无人装备,持续作战能力较强。	受人体生理极限限制,时间越长战斗力会呈现下降趋势。
指挥控制能力	指控系统机动中规划任务、运动中指挥行动,同时指挥空中无人编队、地面无人战车编队和信息化作战单兵。	层级式指挥模式,对作战人员进行有限指挥,具体作战主要依靠先期制定的协同计划及指挥员临机处置能力。
情报侦察能力	空地立体多载荷侦察,实时情报共享,侦察空域及火力打击范围显著增加。	需配属地面人员侦察,火力打击范围非常有限。
火力毁伤能力	多弹种共架,防空、对地打击(直瞄、间瞄)。	单一、固定直瞄火力。
心理防护能力	不受人员心理因素影响。	受人员心理因素影响。

3 陆战分队空地一体无人作战系统构想

本文认为陆战分队空地一体无人作战系统应以构建一个轻量级 C⁴ISRK 作战装备体系为目标。新型无人作战系统不是直接替代现有分队级制式装备,而是通过配置“分队级有/无人协同作

战指控系统”(以下简称:分队级指控系统)重塑“人与机器”的战场功能配置,在区域/方向快速构建一个相对独立的有/无人协同作战体系;通过通信集群组网的方式,使有人作战分队战斗人员(配单兵信息终端)、空中无人平台、地面无人平台等作战单元和节点深度交联,无人装备平台携带火力、通信、侦察、电抗等任务载荷,战斗人员配备单兵信息终端,通过智能化的指挥控制系统,从“时间、空间、情报类型/手段、火力密度/强度、攻击距离/方向”等方面对分队的作战能力进行全方位拓展,实现空地协同与有/无人协同体系战斗力聚合,有效解决陆战场地面分队级作战缺乏近距离空中情报、快速火力支援、自主通信保障的迫切需求,缩短反应时间,掌握实时态势,快速指挥决策,形成立体交战能力,实现作战效能倍增,最大限度地降低作战人员的伤亡风险。

3.1 分队级有/无人协同指控系统

按照分队级、排级配属相应机动作战智能有/无人协同指挥控制系统。分队级指控系统能集中指挥 1—3 个作战排进行集中式作战,也可以通过高速宽带战术网络分布式指挥作战排应对不同方向的作战威胁;分队级指控系统能融入上级陆战指挥体系,也能与友邻分队进行有效协同。排级指控系统具有独立指挥作战能力及必要时替代指挥能力,应具备作战任务规划、装备与火力规划、通信组网、情报融合、战场综合态势构建、作战任务分配、目标指示及对网内无人作战平台编队集群火力控制等功能,充分发挥无人作战平台机动灵活、集群作战、高危任务替代的特点和作战人员的现场决策与操控优势。新型空地一体无人作战排组成构想如图 9 所示。

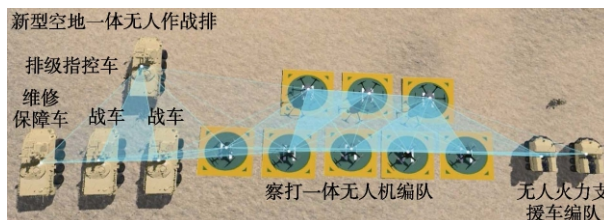


图 9 新型空地一体无人作战排组成构想

Fig. 9 Operational conception of new-type air-ground unmanned platoon

3.2 空中无人察打一体编队

空中无人编队主要执行侦察、打击、通信中继、战勤支援等作战任务，集群协同搜索快速构建战场态势，搜索、跟踪和识别任务目标，既可为友军火力提供目标指示，又可快速穿越复杂地形对敌军进行集群集火攻击或定点摧毁。鉴于分队级部队配备的空中无人平台载荷能力相对有限，应聚焦于打击轻型战术车辆、简易工事、临时指挥所、作战人员等易摧毁和高时敏性目标。空中无人平台武器载荷类型包括制导/非制导火箭弹/炸弹/榴弹、末敏弹、集束手榴弹、机枪等。

3.3 地面无人火力支援编队

地面无人火力支援编队应注重与有人作战分队进行战术协同，与分队现有武器装备配置形成有效协同，通过配置多重量及一定基数智能弹药，对防御工事、坦克及装甲车辆、武装直升机等坚固或高价值目标进行毁灭性打击，并通过换装不同载荷实现抵近侦察、步战协同、火力突击、战术防空、战勤支援等多类作战任务，单辆无人战车应具备复杂地形通过能力，配备火力强度应不低于一个班的反装甲火力。地面无人火力支援编队应与空中无人编队典型作战目标侧重有所不同，更加注重于火力突击、开辟通路、夺控前沿等高危作战任务。

3.4 信息化战斗人员

作战部队战斗人员应配备单兵智能装备，作为信息节点加入分队级网络，能与空中无人平台、地面无人平台进行信息交互，具备战场接管并操控无人平台近距作战的能力。

3.5 机动装备维修保障系统

通过配置现场级机动装备维修保障系统，对无人机、无人车及相关载荷进行现场维修保障，保证无人作战装备具备持续战斗能力。

综上所述，陆战分队空地一体无人作战系统（见图10）以构建排级独立作战单元为基础，将异构型空中和地面无人装备、地面作战人员、近后方指挥控制人员等组成整体协同作战编队。无人装备与作战人员之间在信息、资源、任务计划、装备控制等多方面实现数据共享及协同；快速制

订和更新作战计划、战场态势、可用资源等，进行协同作战的任务规划，完成火力分配和任务调度，并将任务规划的结果以指令形式发送至无人作战装备及地面战斗人员，在计算服务的支持下实现智能化的指挥控制。无人装备依据作战指令及各参数诸元的接收和解算，自主执行特定行动，并在地面指挥控制席的监控和指挥下或被控制接管的地面作战人员控制下，完成攻击目标的稳瞄解算、打击时间和条件、火力发射与制导等工作，实现地面目标打击，并同步进行毁伤效果监视和效能评估。

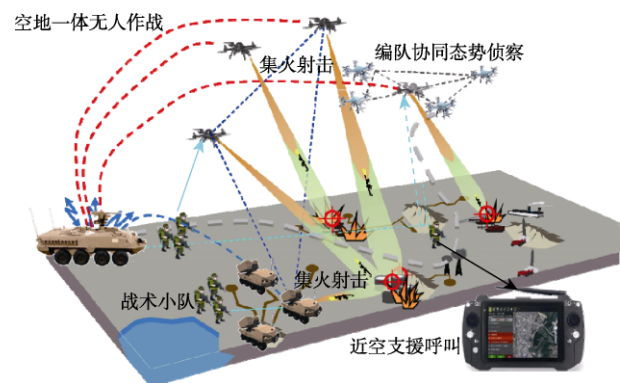


图10 陆战分队空地一体无人作战示意图

Fig. 10 Diagram of air-ground unmanned operation for land units

4 系统未来关注重点技术方向

4.1 情报-决策-打击-评估一体化集成

多个无人平台实施协同作战的特点之一就是在夺取火力优势的同时，制信息权争夺也空前激烈，且二者交织，呈现信息火力一体化的趋势^[16]。有/无人协同空地一体化作战支援系统设计注重“情报、监视、侦察、打击”（ISR+K）功能整合方法研究，通过研究系统一体化集成技术，加强前端信息探测感知能力对末端火力系统的控制和支持，挖掘信息链式运动基础上“传感器即战斗力”的本质，通过综合运用系统软硬件设备集成、功能集成、信息集成和业务集成等方法，将无人平台上传统的ISR系统与协同探测、协同打击能力紧密结合起来，实现“支援请求-侦察-决策

- 杀伤 - 响应 - 毁伤评估”过程的一体化, 提高命中精度并增强杀伤力, 并带动周边形成体系作战能力。

4.2 多平台多传感器协同探测技术

(1) 编队协同探测总体技术。研究编队协同探测总体技术, 分析无人平台挂载的声、光电、红外等多种传感器或小型雷达实施编队协同探测的方式方法。研究不同无人平台配备不同的探测任务模块的匹配方法^[17], 研究协同探测编队的航线规划方法, 使群体间通过资源共享弥补单平台能力的不足, 扩大任务执行范围, 通过合理规划探测资源和路径, 以缩短作业时间, 覆盖更大的工作区域。通过多平台组成分布式、可灵活快速布放的空地探测网络, 实现多角度、多方位提高远程目标探测概率与精度。

(2) 多传感器复合跟踪技术。研究多传感器复合跟踪技术, 提高组网无人平台分布式光电吊舱或雷达传感器的系统综合检测概率。研究在相关无人平台和指控节点处理设备中统一部署复合跟踪算法, 进行目标复合航迹管理, 每个节点将自身传感器的检测结果与其他协同作战单元的检测结果融合处理、综合建批、合理使用、形成闭环, 使各作战平台获得高精度的统一战斗态势。

4.3 高动态分布式自组网管理技术

(1) 网络拓扑结构动态管理。为了满足系统抗摧毁、抗干扰及高机动作战平台需求, 编队协同作战系统的网络结构应具有分布式、无中心等特点, 各作战节点通过分布式算法协调进行通信资源的调度管理, 网络拓扑结构的组织管理需采用自适应、动态管理的方法。因此, 动态网络管理技术的研究包括能量保护、移动管理、拓扑控制、路由协议等多个相应的基础技术环节与系统动态背景的关联关系。

(2) 协同信息资源传输分发。在有限通信带宽资源等条件下, 编队中多个协同作战节点动态入网、交互协同数据时, 会加大节点间的数据传输流量, 节点处理外部到达消息的频率也随之剧增, 对网络带宽、处理能力和可扩展性都提出了进一步的要求。因此, 在拓扑结构、动态路由管

理的基础上, 必须考虑解决数据信息发送造成的系统资源需求急剧上升的问题, 进一步从数据传输分发和信息管理调度的角度进行设计改进, 通过在业务层面的具体优化, 实现传输分发质量和效率的大幅度提高。

4.4 编队无人系统时空一致技术

(1) 区域高精度低时延时间同步。编队无人平台协同作战系统在区域分布式、自组织动态拓扑条件下, 面临网络结构快速变化、作战节点频繁移动、多跳时延误差累积等问题, 影响节点间通信链路稳定性的同时, 在同步过程中数据分发的分组碰撞率及丢包率也将显著增大, 因此需要深入研究解决自组织、多跳、动态拓扑条件下的高精度、低时延时间同步方法。

(2) 基于运动平台感知的空间配准。空间一致性配准方面, 围绕编队无人平台协同作战系统在动平台、动目标方面的显著特点, 有针对性地研究基于运动平台的传感器、火力任务载荷空间误差在线估计和补偿方法。首先研究利用无人机、无人车等合作目标的已知位置, 把目标状态与传感器偏差进行解耦估计, 将载体平台姿态角偏差转换为传感器测量偏差中的一部分, 并建立传感器极坐标测量系中各坐标轴的偏差解耦模型。在此基础上, 利用广义最小二乘等具体算法进行平台载体的姿态偏差和测量偏差等实时估计。进一步利用目标量测的时空耦合机理, 在传统异步空间配准的基础上, 按照内插外推算法的时间配准机制, 先完成各传感器量测的数据对齐, 然后根据时间配准结果建立与目标运动状态无关的空间配准伪量测方程, 从而通过耦合、解耦、再耦合的思路, 有效解决平台运动、目标机动条件下的异步空间配准问题。

4.5 编队无人系统误差链分析补偿技术

在明确系统误差链与精度控制机理的基础上, 综合应用多种技术手段, 进一步研究解决无人平台典型传感器与武器载荷的误差修正与精度控制问题。重点研究网络条件下无人平台制导武器系统的误差修正技术, 分析武器系统对网络化制导信息的精度、数据率、实时性等要求, 通过

研究制导信息误差建模、误差修正与精度补偿控制等问题,有效降低网络条件下多平台跟踪制导过程中,影响跨平台跟踪制导火力控制数据传输分发与处理质量的各种系统误差与随机误差,满足制导武器指令修正、中制导等网络化制导模式对弹目相对误差精度的要求。

5 结束语

智能战争时代正在加速到来,美国、俄罗斯等战斗机器人部队组建、无人作战装备研制及世界局部战争冲突中展现的战术战法正对现代作战模式产生深远影响。未来,陆战分队在中小规模近距离作战和反恐特种作战模式的转变值得高度关注。陆战分队空地一体无人作战系统应更加注重无人平台兼容性、任务载荷多样性、信息火力一体化时效性,加大指挥控制与有人和无人平台交联深度,重视编队集群控制和低成本精确打击武器的运用,逐渐形成体系化发展趋势。

参 考 文 献

- [1] 王新尧,孙厚俊,王朝阳,等.有人机/无人机编队协同作战决策系统架构设计[J].无人系统技术,2020,3(4):66-72.
- [2] 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.
- [3] 李林林,张承龙,卓志敏.智能无人作战系统发展及关键技术[J].现代防御技术,2020,48(3):37-43.
- [4] 白天翔,徐德,王飞跃.局域网络化自主作战的概念与展望[J].指挥与控制学报,2017,3(1):1-9.
- [5] 蒋晓原,邓克波.面向未来信息化作战的指挥信息系统需求[J].指挥信息系统与技术,2016,7(4):1-5.
- [6] Fahey K M, Miller M J. U.S. department of defense. Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2017-2042[R]. U.S. Department of Defense, 2017.
- [7] Louisa H. The U.S. army robotic and autonomous systems strategy[J]. Technology Review, 2017, 120(6): 75-78.
- [8] 姚红霞.美陆军无人系统发展规划及建设情况研究[J].现代军事,2017(9):86-91.
- [9] The U.S. Army in Multi-domain Operation 2028[R]. USA: CCDC, 2018.
- [10] 申森. DARPA“班组 X 实验”项目首次演示验证取得成功[EB/OL]. 2018[2021]. https://m.sohu.com/a/27997940_635792.
- [11] DARPA. Squad X Improves Situational Awareness, Coordination for Dismounted Units [EB/OL]. 2018[2021]. <https://www.domesticpreparedness.com/updates/squad-x-improves-situational-awareness-coordination-for-dismounted-units>.
- [12] Jeff B, How L. Mobile, protected and aware [EB/OL]. 2017 [2021]. <https://smallwarsjournal.com/jrnl/art/how-lethal-mobile-protected-and-aware>.
- [13] 周小程,袁艺.人机协同将成为未来战场的主旋律[N].北京:光明日报,2019-03-23:07.
- [14] 李元超,毛保全,杨雨迎,等.智能辅助决策系统在武器站中的研究及应用[J].兵器装备工程学报,2020,41(3):97-101.
- [15] Insaat D. 新型反坦克集群系统作战设想宣传片 [EB/OL]. 2019[2021]. <https://xw.qq.com/cmsid/20191202A0JGPA00>.
- [16] 范海洲,黄楷,魏兵卓,等.一体化火力控制与指挥控制关键技术研究[J].数字技术与应用,2020,38(2):159-164.
- [17] 韩志钢,卿利.多节点传感器协同探测技术综述与展望[J].电讯技术,2020,60(3):358-364.

作者简介:



龚 旻 (1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为有人/无人协同作战、无人战车。本文通讯作者。



卜昭鹏 (1980-), 男, 学士, 上校, 主要研究方向为热带山岳丛林作战、地炮指挥。



陈 梅 (1972-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为有人/无人协同作战、国际军贸市场研究。



王庆彪 (1986-), 男, 硕士, 中校, 主要研究方向为热带山岳丛林作战、协同战术。



王 鸿 (1990-), 男, 学士, 少校, 主要研究方向为热带山岳丛林作战、高寒山地作战。

[引用格式] 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.

基于数据分发服务的无人机任务载荷 综合仿真平台研究

杜越洋¹, 赵盾¹, 闫智超²

(1. 海鹰航空通用装备有限责任公司, 北京 100074; 2. 北京交通大学计算机与信息技术学院, 北京 100044)

摘要: 现代无人机在军用、民用等领域都有着越来越广泛的应用, 而载荷是无人机完成特定重要任务的必要设备, 对载荷设备的选型和验证是非常重要的一个环节。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。该平台以载荷仿真为主体, 同时结合任务仿真、通信仿真、飞行控制仿真以及效能评估, 实现了多系统分布式联合仿真, 可以有效对载荷设备进行仿真验证。介绍了该仿真平台的系统架构以及系统工作流程, 并对平台实际应用效果进行展示分析。研究表明, 本套仿真平台为后续无人机研发提供了新思路、新工具。

关键词: 无人机; 任务载荷; 数据分发服务; 综合仿真平台; DDS 总线

中图分类号: TP391.9; V279 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)01-79-08

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.1.010

Research on DDS-based Integrated Simulation Platform for UAV Mission Payload

DU Yueyang¹, ZHAO Dun¹, YAN Zhichao²

(1. Hiwing Aviation General Equipment Co., LTD, Beijing 100074, China;

2. School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Modern Unmanned Aerial Vehicles (UAV) have a wider range of applications in military, civilian and other fields. Meanwhile, the payload is the necessary equipment for the UAV to complete specific important tasks. The selection and verification of payload equipment is an essential part of using payload. A UAV payload integrated simulation platform based on data distribution service communication technology is designed for the problems of UAV load selection and complicated load test process. The platform is composed of payload simulation system, communication simulation system, flight control simulation system and efficiency evaluation system, which can effectively simulate and verify the load equipment. The system architecture and system workflow of the simulation platform are introduced, and the actual application effects of the platform are demonstrated and analyzed. The research shows that the simulation platform provides new ideas and tools for the follow-up UAV research and development.

Key words: UAV; Mission Payload; Data Distribution Service; Integrated Simulation Platform; DDS Bus

1 引言

现代无人机主要执行战场侦察与监视、目标截获、火力校正、摧毁评估以及电子诱骗与电子干扰等任务,在军事与民用领域发挥着日益重要的作用^[1-2]。无人机通过装备各种任务载荷完成上述各项目标。无人机任务载荷是指那些装备到无人机上为完成特定任务的设备,包括执行电子战、侦察和武器运输等任务所需的设备,如信号发射机、传感器等,但不包括飞行控制设备、数据链路和燃油等^[3]。无人机任务载荷的快速发展极大地扩展了无人机的应用领域,根据无人机的功能和类型的不同,其上装备的任务载荷也不同^[4]。

在无人机载荷选型过程中,为了论证载荷设备是否匹配任务需求,一般需要进行多次的实验室和外场机载试验^[5]。外场机载试验受设备、天气、场地和时间等诸多因素限制,每次试验的准备和进行过程复杂、时间周期长且实验成本很高。为了解决上述问题,仿真实验手段在载荷选型论证过程中得到广泛应用^[6]。

利用载荷仿真实验进行无人机载荷选型论证,可以加快选型过程,减少载荷选型中的客观因素影响,做到载荷选型有据可依、选型效果直观可见。具体来说,其主要优势在于:(1)可以实现全天候、全地形、全时段的载荷试验,不受天气、空间和时间的限制;(2)不受实际载荷设备的限制,只需要获取某一载荷的参数指标,就可以进行载荷试验;(3)大幅减少实物载荷外场试验的次数,从而大幅降低载荷选型费用;(4)可以构建和积累品种、型号丰富齐全的载荷库,快速、重复地进行载荷试验,在实验中任意搭配载荷产品;(5)通过大量仿真实验还可以尽快发现各品种型号载荷传感器的问题和缺陷,在实际应用过程中发现载荷传感器能力的不足之处,尽快实现从应用到研发的正反馈。

无人机任务载荷综合仿真涉及的学科种类繁多,如飞行控制、任务规划、通信仿真、载荷仿真等,多仿真系统集成有利于解决不同仿真软件碎片化严重、仿真系统灵活性差、仿真效率低及

仿真结果展示不够直观等问题^[7],国内很多高校和研究所已开展有关方面的研究。北京交通大学设计了一种适应于多种型号的无人机地面综合实验平台,包括无人机地面飞行仿真、地面检测和故障诊断三个部分,实现对无人机的数据采集、分析和智能故障诊断^[8]。西北工业大学设计的无人机综合仿真系统将飞控系统、航电设备、遥控设备、数据链、导航算法等形成大的闭环进行仿真验证,能够对飞行过程进行高逼真度的模拟训练^[9]。然而很多系统仍然存在仿真平台功能受限、仿真数据量大且冗余度高、仿真结果展示不够具象等方面的问题。

本文中的无人机载荷综合仿真平台,以载荷仿真为主体,结合分组对抗、通信仿真和效能评估一体化,是一种可以支持仿真模型开发、产品与系统功能验证以及系统展示的综合性仿真平台,支持纯数字仿真、有人参与的“人在回路”仿真和实物设备接入的“系统在回路”的半实物仿真^[10]。在整个仿真过程中,仿真平台同步展示仿真场景态势,实时回传和显示无人机载荷画面,模拟网络通信效果,并在仿真结束后可以收集各项仿真结果并进行仿真效能评估。

2 仿真平台架构设计

2.1 系统架构

无人机任务载荷综合仿真平台是由多个软件子系统组成的综合仿真平台,每个软件子系统部署在一台或多台计算机上,所有计算机通过一台千兆以太网交换机连接在一起。交换机和计算机之间通过双绞线网线连接,网络环境为千兆局域网。系统硬件结构如图1所示。

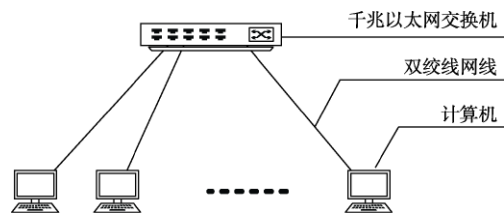


图1 系统硬件结构

Fig. 1 System hardware structure

每个子系统通过消息通信接口接入整体系统当中, 子系统直接通过公共的总线即消息交互总线(简称为总线或消息总线)进行消息交互, 实现分布式联合仿真。系统架构如图 2 所示。

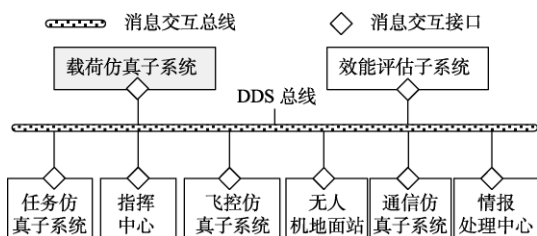


图 2 系统架构
Fig. 2 System structure

各个子系统间使用数据分发服务(Data Distribution Service, DDS)进行通信, DDS 是以数据为中心的数据分布消息中间件, 采用发布/订阅体系架构, 能够提供实时信息传送, 强调以数据为中心, 提供丰富的 QoS 服务质量策略, 能保障数据进行实时、高效、灵活的分发, 可满足各种分布式实时通信应用需求。其最大的优势就是松耦合, 应用程序可以使用一个简单的 Topic 名称来指定它想要读或者写的的数据, 以及使用以数据为中心的 API 来直接读写数据, 数据仅存在于那些对它感兴趣的应用程序的本地缓存中^[11]。它将创建和发送数据(数据发布者, Publisher)的软件与接收和使用数据(数据订阅者, Subscriber)的软件分离开, 可以很好地兼容系统中各个组件、

实体以及操作系统的异构性^[11]。图 3 展示了任务仿真子系统向其他子系统下发环境态势的 DDS 交互流程。

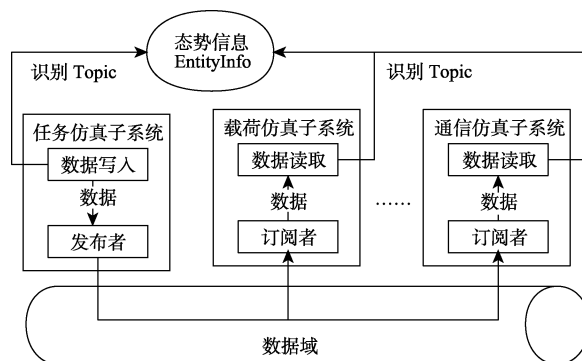


图 3 DDS 数据传递过程
Fig. 3 Data transmission process based on DDS

2.2 软件组成

无人机任务载荷综合仿真平台包含多个软件子系统, 分别是任务仿真子系统、指挥中心、三维展示软件、载荷仿真子系统、情报中心、总控软件、飞控仿真子系统、无人机地面站、通信仿真子系统以及效能评估子系统, 为无人机载荷验证提供需要的仿真场景, 所有软件及子系统均连接在 DDS 总线上进行消息交互。除此之外系统还包括多个数据库, 包括设备实体库、三维模型库以及载荷库, 为系统提供真实的仿真模型及参数信息。系统软件组成如图 4 所示。

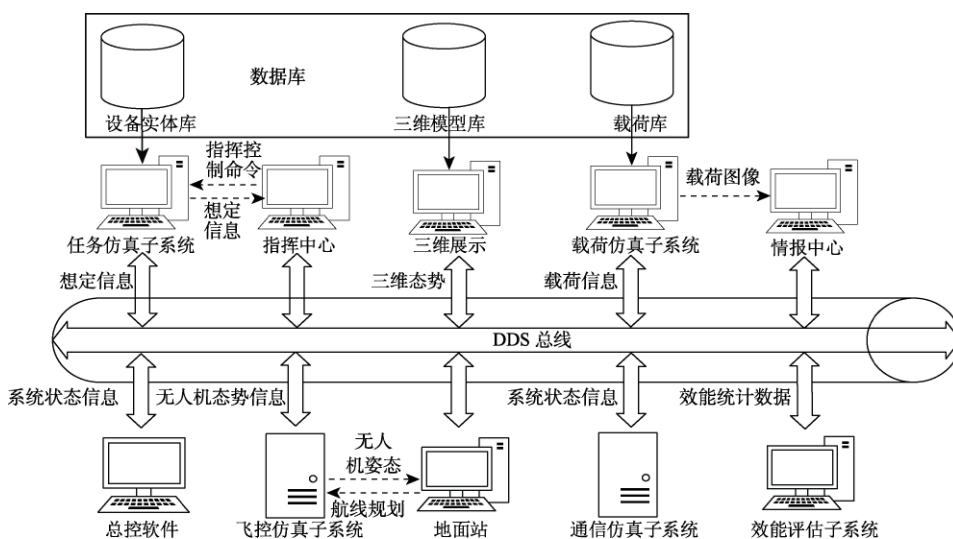


图 4 系统软件组成
Fig. 4 System software components

总控软件负责控制整个系统的运行状态,并实时监控各个子系统的当前状态。任务仿真子系统用于试验无人机载荷在一定的任务想定下的工作能力,可以模拟虚拟环境中各方对抗过程,提供设备部署、任务规划、剧情编辑和仿真推演功能;在仿真过程中,通过指挥中心的控制可以实现“人在回路”,使各方操作人员参与到仿真推演过程当中。飞控仿真子系统接收任务仿真子系统的想定信息以及地面站所规划的航线,调整控制无人机姿态,实时产生精确的飞行轨迹,系统提供模块化的多机协同控制算法,包含行为控制法、深度学习法等多种协同控制方法。

载荷仿真子系统实现对无人机载荷系统的模型仿真和控制、监视功能,包括对载荷信息源和载荷工作状态的仿真,指令控制、状态回报、载荷下传信息的仿真。实时模拟无人机机载电视、红外观测设备生成动态红外辐射场景以及机载合成孔径雷达的生成及目标图像,具备提供不同传感器成像仿真的能力。载荷仿真子系统所生成的图像在情报中心集中显示,供无人机操作员判断和下达指令。三维展示软件可以根据任务想定及三维实体库中的模型生成整个场景的三维态势,便于了解整个仿真场景的概况。

通信仿真子系统能够为任务仿真子系统、载荷仿真子系统、无人机地面站之间提供通信支持,实现不同场景下无人机之间、无人机与地面站之间的数据链通信功能,模拟通信过程中丢包、延迟等网络特性。效能评估子系统收集通信仿真子系统、任务仿真子系统和载荷仿真子系统的实时数据和效能统计数据,将所有信息进行综合评估,自动生成效能评估分析报告,对任务达成程度进行评估,并给出改进建议,为仿真计划的制订与载荷的配置提供参考。

3 仿真平台工作流程

3.1 系统执行流程

无人机载荷综合仿真平台支持整个系统当中的所有软件子系统进行协同仿真。通过系统协同

仿真,既可以为工程技术人员提供软硬件技术和设备的仿真实验环境,以分析各子模块产品的适用性,也可以为用户提供直观的演示效果,验证整套无人机任务系统的效能。

对于所有软件子系统全部参与的系统综合仿真应用来说,分为三个阶段:想定准备阶段、仿真运行阶段和仿真收尾阶段。

想定准备阶段主要是完成各个子系统的准备工作。首先要完成无人机任务的制定,并在任务仿真子系统中根据任务需求进行仿真剧情编辑以及想定的编写,同时对其他所有参与此次仿真的子系统完成相应的实体参数和模型配置。当所有子系统完成配置且加入总线上后,可以进入仿真运行阶段。仿真运行阶段由总控软件下达仿真开始指令,任务仿真子系统将想定信息下发给其他子系统,然后按照预先规划好的任务逻辑进行推演,并将无人机姿态等环境态势信息定时发布到消息总线上。地面站为每个无人机规划飞行航迹,飞控仿真子系统根据规划的航迹,调整控制无人机姿态,实时产生精确的飞行轨迹,并将精确的无人机姿态返回到总线上,供其他系统使用。载荷仿真子系统不断通过传感器获得仿真场景图像,经过通信仿真子系统发送到情报中心进行集中显示,由情报中心人员根据获取到的图像进行判断。指挥中心收集己方信息,并通过无人机载荷收集对方情报,进行信息综合后,发出指令给任务仿真子系统。三维展示软件对整个场景的三维态势进行展示。通信仿真子系统对无人机与无人机之间以及无人机与地面站之间的通信进行仿真,模拟环境中真实的通信环境。仿真收尾阶段由效能评估子系统根据仿真过程中各子系统生成的仿真数据进行汇总分析,对整个无人机任务进行评估。整个系统的仿真流程如图5所示。

3.2 系统数据交互流程

无人机任务载荷综合仿真平台采用仿真模拟的技术手段,构造出接近实际场景的虚拟无人机环境信息传递给任务载荷仿真软件,载荷仿真软件实时渲染仿真出的数据并回传给无人机任务载荷基础仿真实验环境系统,用于进一步数据分析

处理, 二者关系如图 6 所示。

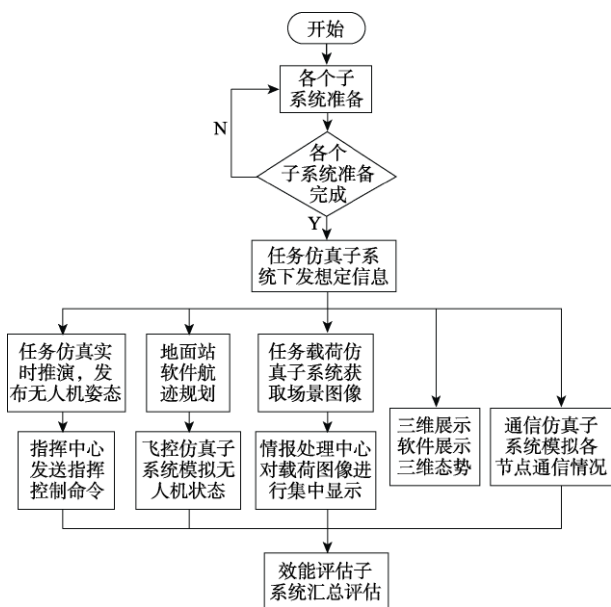


图 5 系统综合仿真应用场景流程图

Fig. 5 Flow chart of application of integrated simulation system

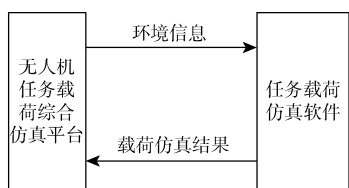


图 6 无人机任务载荷基础仿真实验环境系统
Fig. 6 Basic simulation experiment environment system of UAV mission payload

对于整个综合仿真平台, 涉及的子系统软件众多, 并且软件之间存在大量的信息交互和信息依赖, 软件之间的信息交互复杂, 仿真平台内部各个子系统的仿真数据流动如图 7 所示。

仿真人员在任务仿真子系统进行任务想定的编辑, 任务仿真子系统根据兵力实体库中读取的实体参数, 生成整个仿真场景的态势信息, 并下发给其他所有子系统。飞控仿真子系统根据地面站的无人机航线信息对无人机飞行状态进行模拟, 并将精确的无人机姿态返回给任务仿真子系统。载荷仿真子系统根据载荷库中的载荷参数配置进行载荷图像的模拟仿真, 并将图像发送给通信仿真子系统。通信仿真子系统根据当前无人机通信状态模拟数据传输, 将传回的载荷图像发送到情报中心进行集中显示。仿真过程中, 指挥人员通

过指挥中心下达指令, 发送给任务仿真子系统, 对仿真节点进行实时控制。仿真结束后, 各个子系统将效能统计数据发送给效能评估子系统, 效能评估子系统总结效能评估结果并生成效能评估报告。

4 仿真平台应用

4.1 仿真平台效果

通过一次全系统联合仿真实验对平台具体应用流程进行叙述, 并对平台展示效果和仿真结果进行分析, 具体流程如下:

首先构建本次任务的仿真场景, 红方作为作战任务的防守方, 部署了无人预警机和地面雷达对敌方来袭目标进行发现和跟踪, 从而保护地面重要目标; 蓝方为作战任务的攻击方, 在海面上部署了进攻兵力, 攻击机从航母上起飞攻击红方重要目标。

根据此次任务在任务仿真子系统进行想定的编辑, 首先设置任务对应的场景和气象环境参数, 然后根据任务需求对红蓝方的各个兵力进行部署和装备配置, 并编写每个实体的任务逻辑, 各个兵力的逻辑共同构成整个场景的仿真推演剧情。任务仿真子系统完成想定编辑后结果如图 8 所示。

仿真开始后任务仿真子系统将仿真场景中红蓝双方兵力的实时态势发送到总线上, 各个仿真子系统根据收到的数据进行仿真推演。飞控仿真子系统根据系统模拟仿真, 调整无人机姿态, 产生精确的飞行轨迹和各种飞行参数, 并将其发送回任务仿真子系统, 修正飞机态势。地面站软件接收己方飞控发来的飞机参数, 并进行实时显示, 飞行操控人员可以对飞机的姿态以及飞行路径做出调整。

载荷仿真子系统根据无人机位置姿态、无人机所挂载的载荷类型、参数以及实时状态, 对载荷信息进行解析和显示, 生成对应的载荷图像, 其中载荷类型包括可见光载荷、红外载荷和雷达载荷; 并且在仿真过程中, 无人机操作人员可以通过鼠标及摇杆对载荷的姿态、视场角等进行实时控制, 适应不同任务的需求。当蓝方飞机靠近红方重要目标时, 红方无人机发现来袭的蓝方实体, 并对蓝方实体进行跟踪。图 9 为红方无人机载荷观测到的载荷画面。

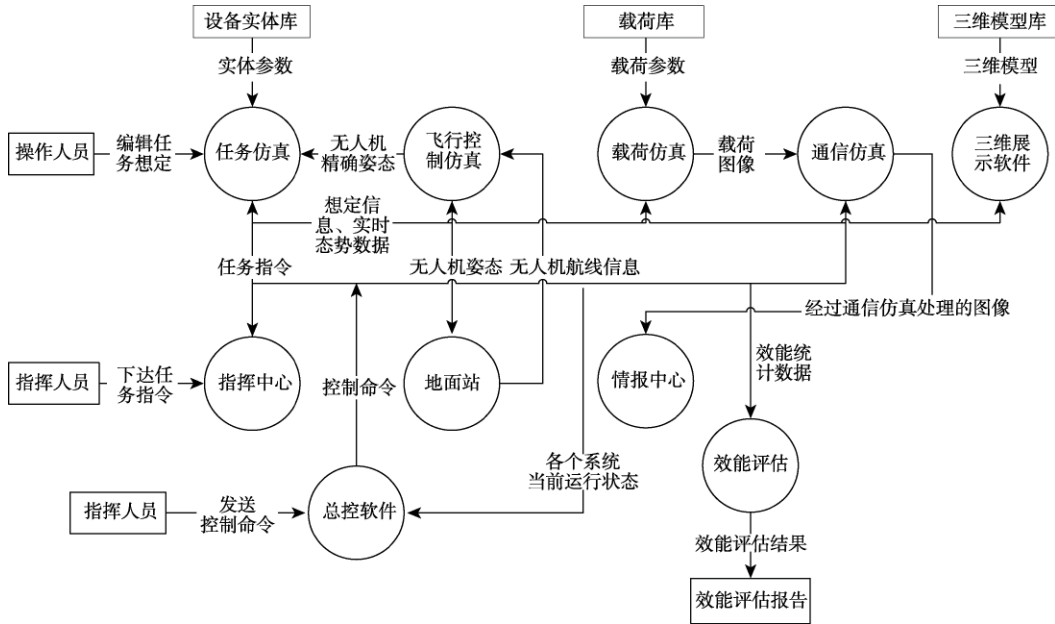


图 7 综合仿真平台数据流图

Fig. 7 Data flow diagram of integrated simulation platform

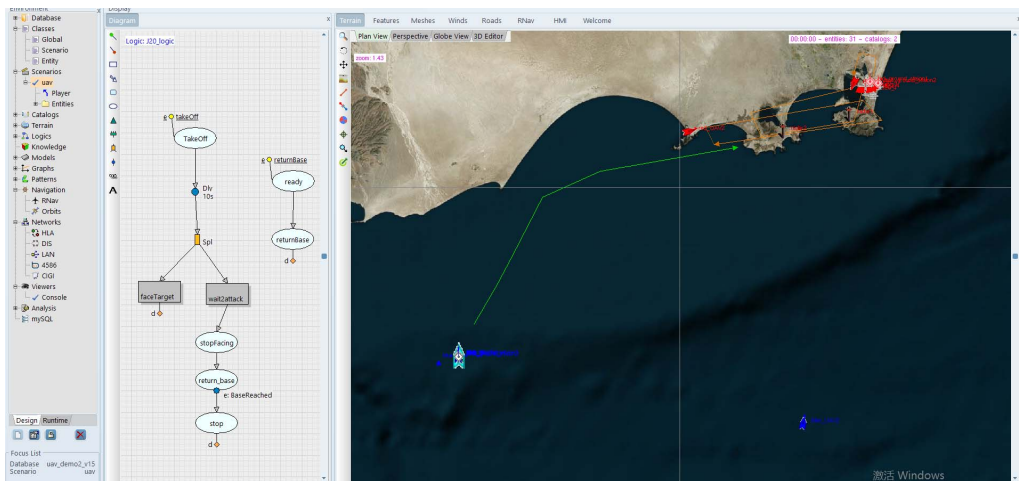


图 8 任务仿真任务规划界面

Fig. 8 Task planning interface of task simulation system

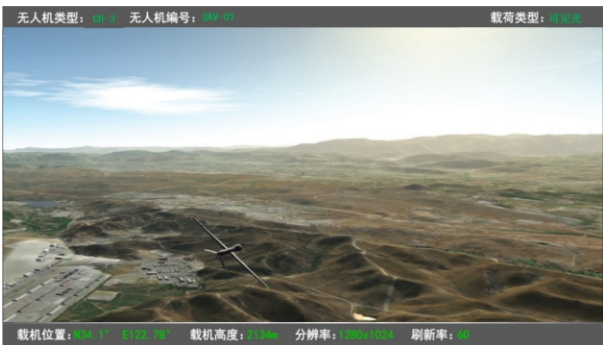


图 9 红方无人机载荷图像画面

Fig. 9 Payload image screen of red UAV

在仿真过程中，各方指挥人员可以通过各自指挥中心软件观测到己方实体的实时位置和状态，以及己方所探测到的对方单位；根据实时情况可以在仿真过程中进行任务规划，对无人机及载荷的行为逻辑进行调整，实现对己方单位“人在回路”的控制，有利于探索更为有效的无人机及载荷使用模式。

通信仿真子系统、任务仿真子系统和载荷仿真子系统会在仿真过程中将实时收集到的数据发送给效能评估子系统，并且在仿真结束后，统一将收

集好的全部相关数据发送给效能评估子系统。由效能评估子系统将所有信息进行统计和评估,自动生成效能评估分析报告,对整个任务进行评估。

以通信仿真效能分析为例,针对无人机与无人机之间以及无人机与地面站之间的通信链路负载、链路占用、链路时延、吞吐量、丢包率等典型通信质量评价指标进行评估并打分,可以及时发现网络异常,评估整体网络效能和网络瓶颈。图 10 为效能评估子系统对通信仿真的综合评估页面。

除了可以对单次仿真结果进行评估,还可以对同一场景进行多次仿真综合评估。通过改变无人机部署情况、无人机行为逻辑、无人机装备参

数以及载荷参数等,对任务流程和任务结果产生影响,效能评估将多次仿真结果进行综合评估,可以比较不同任务模式以及不同装备参数下对任务的影响,从而选取更为合适的无人机使用模式和装备,为实际任务提供参考。

以任务仿真综合效能评估为例,针对作战任务中的兵力部署情况、兵力损失情况、导弹命中率、发现目标概率、作战任务完成率以及根据不同作战任务所制定的作战效能指标进行评估。对同一场景下不同作战模式结果进行对比,有利于选取最为合适的作战部署和作战模式。图 11 为同一场景下多次仿真的任务仿真综合评估页面。

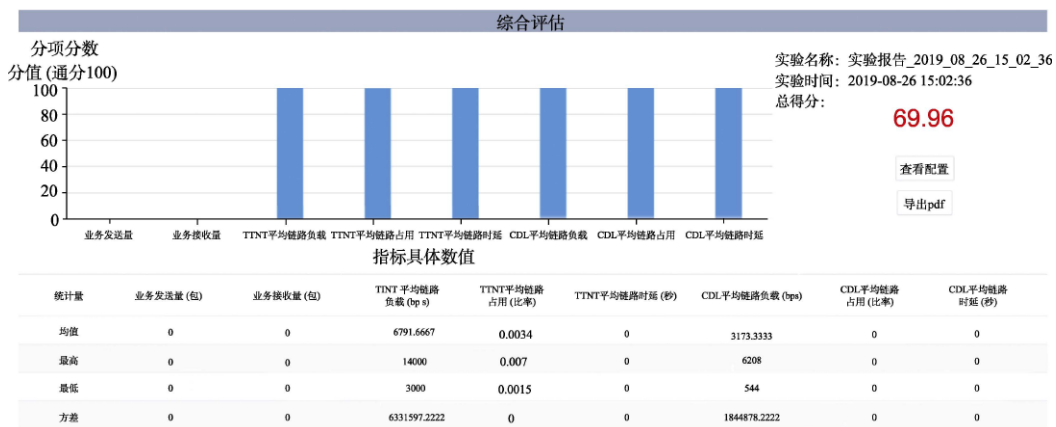


图 10 通信仿真综合评估页面

Fig. 10 Comprehensive evaluation page of communication simulation system



图 11 任务仿真综合评估页面

Fig. 11 Comprehensive evaluation page of task simulation system

4.2 仿真平台意义

该仿真平台功能完善,涵盖无人机载荷验证的各个环节。该平台可以灵活地进行无人机任务的部署,操作人员通过观察整个场景的二维及三维态势,可以快速了解整个场景概况,根据场景实际情况可以动态地调整无人机与载荷状态,为探索无人机以及载荷的使用模式提供了便利条件。载荷仿真子系统支持多种类型载荷,具有丰富的载荷库,并且支持载荷参数自由配置,可以实现载荷的全天候、全地形、全时段的仿真分析。综合效能评估可以直观地对仿真结果进行汇总和评估,便于研究人员分析当前无人机与载荷使用模式的弊端与不足,发现载荷装备的瓶颈,为载荷研发与选型咨询提供参考。

该仿真平台系统采用 DDS 总线的分布式仿真架构,为系统的更新和扩展提供了天然的优势。在各个仿真节点,将界面显示、仿真模型、应用软件与总线通信接口分离,分别独立开发,实现了数据和业务功能的分离。

5 结束语

本文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,设计了一种以载荷仿真为主体,同时结合任务仿真、通信仿真、飞行控制仿真以及效能评估的综合仿真平台,该平台采用 DDS 通信技术简化了不同软件的数据交互流程,可以方便地实现多系统分布式联合仿真。并且该平台可适用于各种载荷试验场景,不受天气、时间、空间以及实际载荷设备的限制,通过大量仿真试验可以尽快确定载荷选型、载荷设备缺陷以及适合的载荷使用模式,极大地提高了载荷测试效率,为实际载荷设备的改进以

及使用提供了参考。

参考文献

- [1] 淳于江民,张珩.无人机的发展现状与展望[J].飞航导弹,2005(2):23-27.
- [2] 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.
- [3] 李全忠.无人机任务载荷云台技术研究[D].南昌:南昌航空大学,2012.
- [4] Xiang H, Tian L. Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. Biosystems Engineering, 2011, 108(2): 174-190.
- [5] 李传荣.无人机遥感载荷综合验证系统技术[M].北京:科学出版社,2014.
- [6] 白俊强,吕敏,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.
- [7] 王健明.面向临近空间飞行器测控通信的综合仿真平台设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2017.
- [8] 王文亮,马磊,韩蕾.无人机综合仿真与测试平台技术研究[J].计算机测量与控制,2019,27(9):13-17,27.
- [9] 张剑锋,程雪梅.无人机综合仿真系统开发与应用[J].弹箭与制导学报,2019,39(3):13-16.
- [10] Bojan G. Pseudosimulation and the distributed simulation of clustered processes [J]. Distributed Computing, 1991(3).
- [11] 谢阳杰,吴家铸.数据分发服务 DDS 的研究[C].全国第19届计算机技术与应用(CACIS)学术会议论文集(上册),2008.

作者简介:



杜越洋(1979-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为载荷产品及各类仿真系统软件平台的研发。本文通讯作者。



赵盾(1988-)男,学士,工程师,主要研究方向为无人机任务数据处理。



闫智超(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向为无人机编队控制。



《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1期 2021年1月

UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY

(Bimonthly)

(Started in 2018)

Vol.4 No.1 January 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: 杨文钰

ISSN 2096-5915
CN 10-1565/TJ

国内定价: 30元/期