

ISSN 2096-5915
CN 10-1565/TJ

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



抗疫专栏

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



2020.3
第3卷 NO.

公益宣传 我在行动

我们在一起

春暖花开

众志成城 抗击疫情

指导：北京师范大学出版科学研究院
倡议：花瓣美素 / 木铎书声 / 期刊强国
设计：张晓萌



无人系统技术

第3卷第3期 2020年5月

目次

抗疫专栏

人工智能在新冠疫情防控中的应用及分析	01
面向疫情防控的无人机关键技术综述	08
赵伟, 王正平, 张晓辉, 向乾, 贺云涛	
自动导引运输车发展现状及关键技术分析	19
刘劲纯	
人工智能技术在智能医疗领域的应用综述	25
朱小伶	

系统综述

室内定位技术综述	32
孙大洋, 章荣炜, 李赞	

技术研究

基于扩展卡尔曼滤波的矢量推进水下机器人姿态解算方法研究	47
丁明杰, 胡桥, 苏文斌, 李俊, 孙帅帅	
基于轨迹线性化的高超声速飞行器非线性姿态控制	56
邵星灵, 刘俊, 李东光	

前沿动态分析

量子计算的发展趋势综述	67
江逸楠	

《无人系统技术》办刊宗旨是刊载无人系统领域新进展、新成果、新技术,促进学术交流,推动成果转化,提高我国在该领域的科研装备水平。

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。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。



Unmanned Systems Technology

Vol.3 No.3 2020

Contents

Anti-COVID-19 Column

- Application and Analysis of Artificial Intelligence in Prevention and Control of COVID-19 Epidemic 01
- A Review on Key Technologies of UAV for Epidemic Prevention and Control 08
ZHAO Wei, WANG Zhengping, ZHANG Xiaohui, XIANG Qian, HE Yuntao
- The Analysis of Current Development and Key Technology of Automated Guided Vehicle 19
LIU Shaochun
- A Survey on Application of Artificial Intelligence for Intelligent Healthcare 25
ZHU Xiaoling

Systematic Review

- Survey of Indoor Localization 32
SUN Dayang, ZHANG Rongwei, LI Zan

Technical Study

- Research on Attitude Solution of Vector Propulsion Underwater Vehicle Based on Extended Kalman Filter..... 47
DING Mingjie, HU Qiao, SU Wenbin, LI Jun, SUN Shuaishuai
- Nonlinear Attitude Control for Hypersonic Vehicles Based on Trajectory Linearization..... 56
SHAO Xingling, LIU Jun, LI Dongguang

Frontier Dynamic Analysis

- A Survey on the Development Trend of Quantum Computing 67
JIANG Yinan

[引用格式] 人工智能在新冠疫情防控中的应用及分析[J]. 无人系统技术, 2020, 3(3): 1-7.

人工智能在新冠疫情防控中的应用及分析

摘要: 2020年初, 新型冠状病毒肺炎疫情席卷全球, 在抗疫过程中, 人工智能技术发挥了重要作用。首先介绍了人工智能在疫情防控中的应用情况, 涵盖了疫情监测分析、人员物资管控、后勤保障、药品研发、医疗救治和复工复产六个方向。接着, 对使用人工智能技术的智能服务机器人、大数据分析系统等抗疫产品和应用发展做了深度剖析。最后, 提出了加大政策支持和引导力量、加快人工智能新基础设施建设、加强人工智能核心技术攻关、积极培育人工智能产业新业态新模式、加紧构建人工智能基础数据平台和加速推进人工智能标准化体系建设的六项建议。从全方位、全阶段研究了人工智能技术对新冠疫情防控的积极作用, 对世界抗疫具有一定的参考价值。

关键词: 人工智能; 新型冠状病毒肺炎; 疫情防控; 智能服务机器人; 大数据分析; 智能识别

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2020)03-01-07

Application and Analysis of Artificial Intelligence in Prevention and Control of COVID-19 Epidemic

Abstract: At the beginning of 2020, COVID-19 swept the world. Artificial intelligence technology plays an important role in the anti-epidemic process. First, the application of artificial intelligence in epidemic prevention and control is introduced, covering six directions: epidemic monitoring and analysis, personnel and production control, logistics support, drug research and development, medical treatment and return to work. Then, the development and application of anti-epidemic products such as intelligent service robot and big data analysis system using artificial intelligence technology are deeply analyzed. Finally, six suggestions are put forward, including increasing policy support and guidance, speeding up the construction of new artificial intelligence infrastructure, strengthening the public relations of the core technology of artificial intelligence, actively cultivating new forms and modes of artificial intelligence industry, stepping up the construction of artificial intelligence basic data platform and accelerating the construction of artificial intelligence standardization system. The positive role of artificial intelligence technology in the prevention and control of COVID-19 is studied from all aspects and stages, which has a certain degree of reference value in the world anti-epidemic.

Key words: Artificial Intelligence; COVID-19; Epidemic Prevention and Control; Intelligent Service Robot; Big Data Analysis; Intelligent Identification

1 人工智能在疫情防控中的应用

截止2020年3月20日,共收集整理抗疫AI产品信息500余条,分布如图1所示。其中,智能服务机器人、大数据分析系统和智能识别(测温)产品数量居前三,计算机视觉、语音、大数据等人工智能技术成熟度相对较高,面向使用场景丰富,因此其代表产品在抗击疫情中也发挥了极大作用。智能医疗辅助诊断系统、基因组检测、药物研发等AI产品数量偏少,主要由于此类AI产品涉及算法与医学知识的结合,专业性高,研发需要的技术和成本门

槛高。

纵观此次疫情防控,人工智能应用基本全程覆盖了各个环节,大幅节约了人工成本,减少了人力资源消耗,提高了效率,并极大减少了病毒感染传播的风险。归纳起来,主要包括疫情监测分析、人员物资管控、后勤保障、药品研发、医疗救治、复工复产6个方向。

1.1 疫情监测分析

1.1.1 基于计算机视觉的自动体温监测

监测社会重点场所、重要部位,特别是人员密集区域(如火车站、地铁等)流动人员的体温,对于

及时发现疑似患者、防止疫情大范围传播扩散具有极其重要的意义。传统的人工检测手段,需要近距离接触,存在交叉感染的风险,检测效率不高又常常导致现场堵塞、秩序混乱。基于图像识别技术和红外热成像技术的自动测温系统,利用人体检测和人脸识别技术检测人体并标记人,然后根据红外成像技术对人流进行实时非接触式体温监测,快速甄别和筛选体温异常人员并进行预警;利用行人定位、跟踪以及人脸识别技术,还可配合对高危人员执行隔离任务。国内百度、商汤、旷视、大华、海康威视等公司推出的自动体温监测产品在火车站、机场、地铁站、社区等公共场所已大量使用,它们能够同时对多人实时检测,识别误差 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 。由于全程无接触,通行效率大大提高。

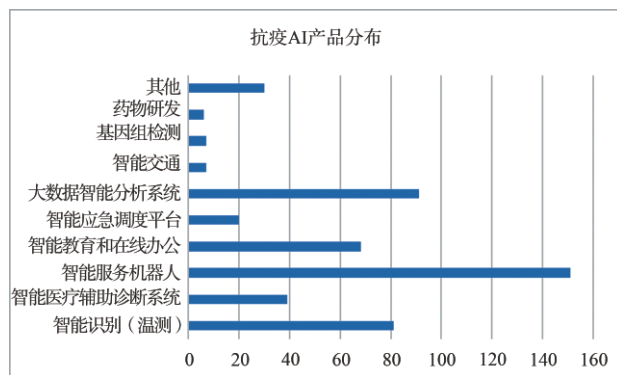


图1 抗疫AI产品分布

Fig. 1 Distribution of anti-epidemic AI products

1.1.2 基于大数据智能的疫情追踪

此次疫情爆发恰逢春节,人员流动性大,社会规模性聚集多,交叉传染传播的风险急剧上升,特别是病毒有2周左右的窗口期,处于潜伏期的患者很难在现场体温检测中被发现排查处理。如何事后精准倒查、追踪高风险人员,是对此次防疫工作的一次重大考验。利用数据挖掘技术对手机漫游信息、消费数据以及交通出行数据等进行快速筛查分析,帮助工作人员掌握人口流动信息,能够破解这一难题。基于这一思路,百度、搜狗、360等企业推出了疫情地图、疫情跟踪、同乘查询等信息服务系统,滴滴等网约车平台推出可追溯乘客出行记录,极大方便有关部门、普通用户自查疫情风险,搜集高风险人员信息系统,及时做好防范应对工作。北京经济技术开发区联合京东数科等推出疫情防

控可视化指挥平台——“战疫金盾”系统,目前已汇聚56个小区近4万居民健康信息,其在满足辖区内企业和居民自主上报疫情防控信息的同时,还具有支撑疫情态势研判、疫情防控部署功能。

1.2 人员物资管控

1.2.1 基于语音语义的人员摸排排查

由于社会人口流动性大,一线随访排查、通知宣教、重点群体监管等工作量急剧增加,单纯依靠人工,一方面人力不足,一方面效率低,并且加剧病毒感染传播的风险。百度、阿里巴巴、腾讯、科大讯飞、思必驰等企业研发的智能外呼机器人系统,利用语音合成、语音识别、语义理解等智能语音语义技术,可将疫情监测政策、防护知识等信息合成为语音传达给居民;同时与居民进行有效互动问答,识别并理解居民的意图,自动完成居民活动区域、接触人群、是否出现典型症状等关键信息收集,进行统计分析处理,从而高效、安全地服务医疗机构、基层社区等的防控工作。

1.2.2 智能应急调度平台

物资调度是做好防疫工作的一项重要任务。充分运用机器人、人工智能、移动互联网和大数据技术,通过专有网络或5G网络对所有前端应急救援装备进行综合管理和操控,收集、处理和分发前端信息和图像,打造智能应急调度平台,极大地提高了物资管理、流动的效率。京东推出了应急资源信息平台,撮合全国范围内的防护用品、物资等进行交易。东软的物资管理平台能够对区域内的现有物资做可视化展示,如物资储备分配热力图、数据量的柱形图等,对物资物流管理做到精细化跟踪监测统计;物资发放能够结合重要性、需求程度等提供智能化的分配方案。此外,还有一些智能系统能够提供仓库现场机器人巡检消杀、数据自动采集等服务。

1.3 后勤保障

1.3.1 无人机/机器人系统

无人机/机器人技术能够为疫情防控提供部分后勤保障能力,如现场消毒、监测、送药、物流、监控等。无人机/机器人通常会携带视觉、激光等传感器,通过图像理解技术、激光数据分析算法等可以实时感知外界环境,对其中的危险进行识别并规避,同时为路径规划导航提供信息,最后完成特定

任务。博鹰通航的卫生防疫无人机,通过旋翼下洗气流,可快速实现将消毒液液传播到防疫区域,防疫效率高于人工几十倍,且速度快、覆盖范围大。猎户星空的递送机器人“豹小递”已经应用于多家医院,不仅能够送药送餐,还可以实现化验单、药品、医疗防护物资、消毒工具、医疗废料的定点配送与运输。麦飞科技研发的无人机监测系统,可对疫情隔离观察区进行实时监测与分析,包括但不限于房屋人员分布情况,物资供应情况等。京东物流机器人、无人机也可为封闭的地区提供物流服务。

1.3.2 远程办公、在线教育

疫情期间远程办公、上网课成为普遍现象。其中,文档在线协作、远程视频会议等综合运用了云计算、5G、人工智能、大数据、移动互联网等相关技术。例如,科大讯飞的智慧教育标准解决方案,在常规直播教学外,利用其智学网系统能帮助学生进行针对性的自主学习,根据学生对知识点的掌握情况规划最佳学习路径,并推荐针对弱项的视频学习和针对练习的“精准化练习”。科大讯飞最新C端办公产品,以人工智能为基础,在办公场景下的应用在这个产品上做了一系列的技术革新,其中AI语音转文字的功能可以将会议内容语音实时转写,在会议、记录场景下实现了设备代替人工速记;云端储存和语音搜索的功能在办公、学习、生活场景下手写记录、录音成文、语音搜索上体现了人工智能技术高效和便捷的优势。

1.4 药品研发

大数据、人工智能等正成为新药研发的重要手段,有利于加快新产品的研发速度,为药物研发提供计算机辅助研究,大大降低研发风险和研发成本。本次疫情中,利用人工智能辅助的虚拟药物筛选系统,能够以2019-nCoV冠状病毒主蛋白酶的高分辨率晶体结构对收录已上市药物进行计算筛选,获得打分较优的潜在有效药物。

1.5 医疗救治

1.5.1 基于影像视觉技术的肺部辅助分析

新型冠状病毒的感染者肺部存在病变,对病毒性病灶定量分析及疗效评价,有助于患者病情的管理和精准医制。目前需要专业医生手工勾画量化,耗时耗力且一致性较差。医疗影像视觉技术实现了对新型冠状病毒肺炎CT影像的智能化诊断与

定量评价,可对局部性病灶、弥漫性病变、全肺受累等各类肺炎疾病严重程度进行分级;通过目标检测技术和分割技术等定位肺部病灶,从而完成病灶形态、范围、密度等分析,测算疾病累计的肺炎负荷,实现临床病情的辅助判断。依图科技建设的“新型冠状病毒肺炎智能评价系统”在上海市公共卫生临床中心上线,能够实现病变区域的自动检测,将定量分析时间从5~6h缩短到在2~3s,极大提升了精准定量分析的效率,并且显示出高稳定性的诊断质量。北京推想科技与武汉同济医院、深圳市第三人民医院合作研发针对新型冠状病毒肺炎AI产品特别版,其利用人工智能技术的深度学习、图像识别等对检出的病灶进行测量、密度分析,支持患者前后片对照,提供量化数据对比结果,帮助医生更快完成疑似患者诊断。另外,商汤、腾讯觅影、深睿医疗研发的肺部影像分析系统也已经在一些医院部署投入使用。

1.5.2 基于人工智能算法的基因组检测

新型冠状病毒的主流检测手段为核酸检测方法,通常采用纯手工操作以防止病毒泄漏,并且为了确保检测的准确性还需要多次复核,导致实际检测时间较长。核酸检测方法还只能检测到病毒基因的局部,对于变异的病毒可能会存在漏检的情况。全基因组检测技术针对病毒基因建立了蛋白质三维结构预测模型,可以对疑似病例的样本进行全基因组序列分析比对,并大幅度缩短确诊时间。百度免费开放线性时间算法LinearFold,可将此次新型冠状病毒的全基因组二级结构预测从55min缩短至27s,提速120倍;阿里达摩院、杰毅生物和浙江省疾控中心联合研发的新型检测设备,通过训练BiLSTM+DNN的模型,可以将原来数小时的疑似病例基因分析缩短至半小时,大幅缩短疑似患者确诊时间。

1.5.3 基于自然语言理解的智能问诊

智能问诊系统能够在线为病患提供问诊服务,其使用应用语义理解、情感分析等人工智能技术,通过问题预判、意图反问、分类识别、相似度匹配等方法,不仅能够解答何种情况需要就医,还能实现疫情防控动态进展、科学防护知识、谣言鉴别等问题精准解答,并支持人机协作、自主学习、会话引导等功能。百度灵医智慧推出的“智能咨询助手”倍

数级提升咨询效率,每日调用近万次。阿里巴巴在“浙里办”(一款基于浙江政务服务网一体化平台能力的APP)提供的网上智能问诊服务上线第一天对用户咨询的解决率超过92%。

1.6 复工复产

1.6.1 清扫消毒

保持工作环境的干净整洁及定时消毒,是复工复产的重要安全保障。看似简单的工作,如果单纯依靠人工,很难不留死角彻底消毒。智能服务机器人运用计算机视觉、智能语音语义等核心AI技术,支持强大的清洁功能,能够提供多种服务模式,如采用清扫+喷洒消毒液体的组合清扫方案,有效降低二次传染,起到高效控尘、消毒的作用。深兰科技研发的智能扫路机,具备可自主规划路线、自主识别障碍物、自动识别红绿灯等功能,能够实现区域覆盖式清扫,拥有循环闭环清扫等作业模式。

1.6.2 口罩生产

口罩是复工复产急需的紧缺物品。口罩生产可以通过口罩生产机进行,但包装往往需要人工参与,为此制约了口罩的产能。解决这个问题,工业机器人可以发挥关键作用。广州普理司科技将原有生产线改造为柔性AI视觉全自动口罩机,利用AI人工智能(计算机视觉)进行鉴别和包装操控,单机产量可达每分钟120片,日产口罩超15万片;拓野机器人推出了口罩自动化生产线并投入使用,截至2月4日已生产超过4万只医用一次性口罩;滴普科技利用AI视觉检测,辅助口罩生产质检,替代部分人工检验,也助力提升了口罩生产效率。

1.6.3 物流运输

物流运输是恢复正常生产的一大瓶颈,一旦受限,对企业来说,无论是原料供应,还是产品销售都会受到影响。为了保障物资供应链高效运转,京东物流公司的智能仓储AGV机器人24小时不停歇地实现大规模、全流程、多场景应用,提高物资仓储运转工作效率。京东物流近期还在武汉等地区开展智能机器人配送服务,杭州未来科技城还利用无人机运送医疗物品,大幅提升了物流的时效性。

1.6.4 园区厂区巡检

智能巡逻机器人、无人机通过AI智能化识别分析算法,实现对特定目标追踪凝视和深度挖掘疫情防控数据价值。大疆、京东、湖北电鹰、成都纵横、中国电科、云圣智能等企业协助在园区厂区隔离防控、工厂区域巡视等,大大减轻一线人员现场巡逻安保的负担。

2 对人工智能应用的剖析

2.1 热门抗疫AI产品分析

基于搜集到的500余个人工智能抗疫案例数据,智能服务机器人、大数据分析系统、智能识别(测温)产品为在抗击疫情中使用最热的产品,以下为对三款产品的分析。

在智能服务机器人产品中,智能外呼机器人和医疗场景的智能服务机器人(实体)应用量最高。智能外呼机器人的应用场景包括通知、回访、筛查、宣教等,其特点是机器能够代替人进行并发呼叫。据中国人工智能产业联盟智能外呼机器人的首轮评测统计的参评产品截至2月7日的呼叫情况,如图3所示,其中,54%的产品总呼叫量为百万级,15%的产品总呼叫量达千万级;38%的产品日呼叫量达到万级,31%的产品日呼叫量达十万级。智能外呼机器人提高了筛查效率,减轻了基层工作者压力;另外,目前医疗服务场景的实体智能服务机器人的主要应用场景为清洁、消毒和配送,以替代人力完成重复性、机械性、简单的工作为主。

大数据分析系统的应用场景主要有疫情地图、人群追踪、同乘查询、趋势预测以及舆情分析。大数据分析系统面向的对象包括医院、疾控中心、政府机关、企业、社区以及群众。以百度为例,其疫情地图产品提供针对新型冠状病毒肺炎疫情的实时大数据报告,包括疫情分布、疫情动态、迁徙地图、全民热搜、疫情实时播报等内容。同乘查询服务根据公开披露数据实时更新信息,用户可以查询自己所乘的飞机、火车、公交车等公共场所是否有确诊新冠肺炎病例。

智能识别(测温)产品基本实现多人同时非接触测温,并在体温异常时报警,能够在戴口罩情况下人脸识别,并对数据进行实时上云、跟踪管理。

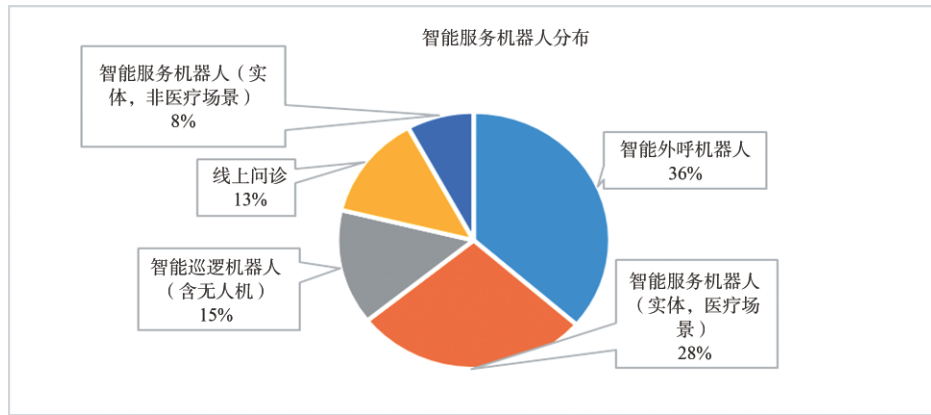


图 2 智能服务机器人具体分布

Fig. 2 Specific distribution of intelligent service robots

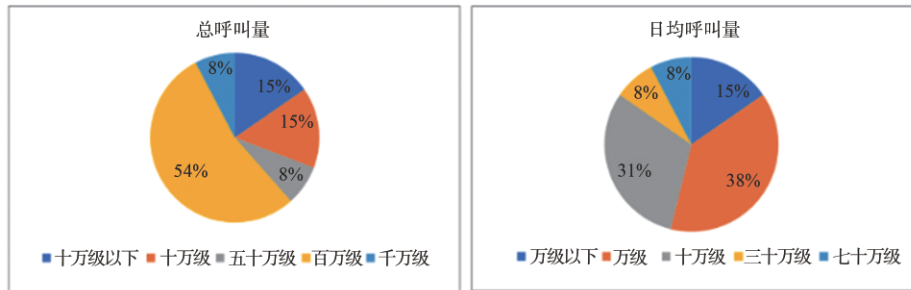


图 3 中国人工智能产业联盟外呼机器人首轮评测结果呼叫量规模

Fig. 3 Call volume scale of the first round evaluation result of outbound call robot of China artificial intelligence industry alliance

表 1 智能识别(测温)产品概况

Table 1 Overview of intelligent identification (temperature measurement) products

主要功能	使用场景
多人同时非接触测温	机场、车站、海关、地铁等核心通道
智能告警	
人脸识别	医院、学校、社区、企业园区
实时上云	等室内主要出入口
数据管理	

其中,智能告警和数据管理是AI测温系统区别于传统测温系统的两大重要功能。据中国人工智能产业联盟AI人体测温系统评测结果,产品在测温误差、最大测温距离和人脸抓拍准确率这几方面较为出色,充分利用自身优势助力疫情防控。在测温误差方面,参评产品的误差都不超过0.25℃;在人脸抓拍能力方面,参评产品的准确率主要保证在90%以上;在最大测温距离能力上,因为参评产品

使用场景不同,各家最大测温距离在2~8m之内波动,基本保障达到各自使用场景的需求。

2.2 人工智能应用发展剖析

此次疫情防控大量人工智能技术投入实际应用,充分说明以人工智能、大数据等为代表的新一代信息技术通过前期的快速发展和实践积累,已经越来越商业化、市场化、普及化;说明我国人工智能产业规模不断发展壮大,和实体经济的融合持续深入,智能社会形态逐渐显现,数字经济不断壮大,并正在呈现蓬勃兴起的良好势头。从趋势上看,一是人工智能产业迎来难得的发展新机遇。人工智能是引领当前这一轮科技革命和产业变革的战略性技术,此次疫情对人工智能产业发展来说,既是挑战也是机遇。总的看,是机遇大于挑战。人工智能在医疗、教育、后勤、社会综合治理等多个领域都已凸显出其特殊价值,尤其在医疗和教育等民生领域,价值更为明显。智能制造、无人配送、在线消费、医疗健康、在线办公、服务机器人等新兴产业展

现出强大成长潜力。以服务机器人为例,在这次疫情期间优异且全面的表现,市场、用户都给予了高度认可与赞誉。从市场角度分析,服务机器人在对抗疫情的许多环节都进行了“实战”部署,并取得不错的应用成绩,有利于相关产品在消费者群体中赢得更多的信任,未来市场前景显著向好。二是人工智能给各行业的赋能作用日益显现。在助力疫情防控过程中,人工智能技术按照“可能与需要”的原则,与5G、大数据、区块链、工业互联网、车联网等新一代信息技术相互融合,加紧升级改造、探索创新各行各业的传统产品,一批新产品、新产业、新业态大量涌现,极大拓展了未来人工智能产业新空间。随着疫情结束全面复工复产,随着“新基建”的落地实施,人工智能将进一步与制造、交通、农业等基础产业融合,推动产业智能化升级。把握未来,抢占先机,积极搭建人工智能深度应用场景和赛道,大力释放人工智能新技术、新产品的“赋能”效应,对于深入推进人工智能产业发展意义十分重大。三是人工智能应用在提升国家治理能力方面的作用正在逐步凸显。这次疫情充分展现出了人工智能技术在解决国家治理问题、提高国家综合治理能力现代化方面显著的优势。例如,人工智能在疫情监控、风险分析预警、交通出行方面的应用,实质是提升智慧化城市、智慧化政府的能力,其通过强大的大数据采集和智能分析,结合社会治理理论和互联网技术,将复杂的社会运行体系映射在多维、动态的数据体系之中,实现了对社会运行规律、社会偏好(诉求)变化趋势及规律、政府回应机制及效果差异等实时化、数量化、可视化的监控预警,有效服务了政府决策,保障了民众的信息知情权,保证了社会良好运转秩序。可以预见,未来随着社会运行数据特征的不断积累,人工智能将进入经济政治决策、控制系统、仿真系统,推动传统型社会治理向智慧型社会治理转化,推动国家治理能力的智慧化。总的看,人工智能已成为推动社会发展、经济发展质量变革、效率变革、动力变革的重要驱动力。

分析发现,目前人工智能应用还存在一些影响未来产业发展的薄弱环节,需要引起高度重视。一是数据积累不足。数据是人工智能应用的重要基础。此次突发疫情下,人工智能技术在有数据积累的场景能快速落地,例如行人检测、人脸识别、肺部

病灶检测分割,以及智能语音语义理解等方向能够快速部署响应;而在其他场景下,例如病毒传播扩散途径检测、病毒源头的追溯等,由于缺少充足的已标注行业数据,人工智能技术还没有发挥出应有的作用。二是产品鱼龙混杂质量参差不齐。随着疫情的发展,越来越多企业提供抗疫的人工智能产品服务。由于开发周期短、技术实力和成本等原因,市场上每个类型的产品同质化、质量良莠不齐等问题大量存在,缺乏相关评估规范对产品功能、性能进行约束。例如,疫情中投入的无人机、服务机器人,产品普遍功能雷同,技术水平也存在较大差异。三是智能化程度尚有较大提升空间。体温检测产品基于口罩人脸识别的能力、人脸识别领域人脸跟踪、全景拼接等功能还未完善,以实现更加智能化的异常人员定位功能;多数医疗服务机器人在路径规划、柔性控制、多模信息精准感知与可视化、人机交互等核心技术方面尚未满足智能化水平;外呼机器人的对话水平还未达到自然顺畅交流的程度,语义理解能力也有待提升。四是基础技术积累不足。相关企业对人工智能基础理论、核心关键技术积累,与国外先进国家相比还相对薄弱,核心算法、芯片及基础元器件的掌握与国外差距较大,缺乏重大原创科技成果。核心环节受制于人,不利于国内企业参与国际竞争,随时可能被卡脖子,也使国民经济和国家安全存在远期隐忧。

3 人工智能发展建议

人工智能是引领未来的重要战略性技术,是新一轮产业革命和技术革命的重要驱动力,也是推动国家经济社会全面健康可持续发展的新引擎。我们必须紧紧抓住这一重大机遇期,加强统筹谋划、顶层设计,巩固前期成果,突破发展瓶颈,补齐短板,推动人工智能产业再上新台阶,并以此带动国家竞争力整体跃升和跨越式发展。

(1) 加大政策支持和引导力量

建议政府尽快制定出台进一步支持人工智能产业更好更快发展的实施方案,探索和完善相关机制、体制的改革创新。开辟专门渠道、专门政策实现高精尖人才的精准引进;推动人工智能成果转化、重大产品集成创新和示范应用;完善孵化服务体系,支持人工智能创新创业;通过资金支持、税收

减免等优惠政策,支持培养一批有核心技术的人工智能“独角兽”企业;设立人工智能产业发展与应用专项资金或专项基金,重点支持人工智能基础理论及关键核心技术研发与产业化。

(2) 加快人工智能新基础设施建设

网络基础设施、大数据基础设施、计算基础设施建设是支撑新一代人工智能广泛应用的基础设施体系,也是强化人工智能创新发展的条件支撑。建议加快建设人工智能研发基地和开放创新平台,推动公共数据安全有序开放,强化人工智能研发创新的基础条件支撑。通过人工智能新基础设施建设加强行业落地,推动人工智能开放平台、行业大数据中心、典型应用场景的深度融合。

(3) 加强人工智能核心技术攻关

人工智能芯片、传感器、算法等核心技术是我国人工智能产业发展所面临的关键问题和挑战。建议产学研协作以关键技术为基础,以支撑解决方案打造和深化应用为目标,瞄准人工智能算法、智能芯片、智能传感器等基础领域和情绪感知、认知智能等前沿领域,推进关键核心领域攻关。同时要在图像和语音识别、自动驾驶等场景方面加大算法、芯片研发力度,顺应产业平台化、开源化发展趋势,以行业为主体构建我国人工智能自主可控的开源、开放的开发平台、系统和生态。

(4) 积极培育人工智能新业态新模式

建议人工智能企业以需求为导向,围绕教育、医疗、养老以及政务服务等迫切民生需求,加快人工智能创新应用,培育人工智能新业态新模式。面向医疗卫生、社会治理、公共安全等领域,突破人工智能产业发展短板瓶颈,加速人工智能新技术、新产品的应用推广和产业化。积极培育人工智能创新产品和服务,推进人工智能技术产业化,形成科技创新和产业应用互相促进的良好发展局面。

(5) 加紧构建人工智能基础数据平台

缺乏高质量的数据集已经成为制约人工智能领域发展的瓶颈之一。美、英等国已将构建高质量人工智能数据集和行业资源数据集列为人工智能战略计划任务。建议加快以企业为主体的人工智能基础数据平台建设,面向语音识别、视觉识别、自然语言处理等基础领域及工业、医疗、金融、交通等行业领域,建设高质量人工智能训练资源库、标准测试数据集,以及包括云服务平台等在内的人工智能基础数据平台,推动不同行业的人工智能行业资源训练库等相互共享,形成公共服务支撑体系,提高数据获取和行业数据访问的便利性。

(6) 加速推进人工智能标准化体系建设

标准化是推动人工智能产业发展的重要一环。通过推进人工智能标准化体系建设,建立相应的评估评测指标,可以为人工智能产业发展提供科学有效的评价依据。针对人工智能重点产品研发和行业应用需求,协同推进国家标准、行业标准与团体标准制定工作。从基础术语、框架到平台,再到关键技术、产品服务和应用,制定人工智能的技术标准和应用规范,并开展人工智能产品和服务评估评测工作,提升人工智能产品和服务质量,以促进人工智能高质量产业发展。

(来源:中国人工智能产业发展联盟)

中国人工智能产业发展联盟是在国家发展和改革委员会、科学技术部、工业和信息化部、中央网信办等部门的指导和支持下,于2017年10月由中国信息通信研究院牵头,会同相关单位共同发起成立的联盟组织。联盟旨在构建我国人工智能产业生态,提升我国人工智能产业的竞争力,强化人工智能与经济社会各领域深度融合,促进技术进步、提高生产效率,推动传统行业数字化转型,支持新技术、新产业、新业态、新模式加快发展。

[引用格式] 赵伟, 王正平, 张晓辉, 等. 面向疫情防控的无人机关键技术综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(3): 8-18.

面向疫情防控的无人机关键技术综述

赵伟¹, 王正平¹, 张晓辉², 向乾¹, 贺云涛¹

(1. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081)

摘要: 在国内新型冠状病毒的疫情防控中, 无人机及其相关技术发挥了积极的抗疫作用, 展现出了巨大的应用潜力。对适用于疫情防控的无人机关键技术进行综述, 主要涉及计算机视觉技术、视觉导航技术、混合电动长航时技术, 以及机载小型喊话器技术等其它抗疫载荷技术。这些技术对无人机的场景理解、自主导航、续航能力, 以及疫情监控效果等具有直接、重要的影响。最后, 对所涉及技术的发展现状进行总结, 分析相应技术的特点并给出未来的发展趋势, 为无人机在疫情防控、紧急灾害救援等任务中的广泛应用指明了技术突破的方向。

关键词: 防疫无人机; 计算机视觉; 视觉导航; 混合电动长航时; 红外测温

中图分类号: V19 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2020)03-08-11

A Review on Key Technologies of UAV for Epidemic Prevention and Control

ZHAO Wei¹, WANG Zhengping¹, ZHANG Xiaohui², XIANG Qian¹, HE Yuntao¹

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In the prevention and control of new coronavirus (COVID-19) in China, UAV and its related technology have played an active anti-epidemic role, showing great application potential. This article reviews the key technologies of UAVs for epidemic prevention, mainly involving the computer vision technology, the visual-based navigation technology, the electric long-endurance technology and some other anti-epidemic load related technologies such as airborne small-sized technology. These technologies directly determine the scene understanding, the autonomous navigation, and the sustainability of UAVs, as well as the monitoring effect of the epidemic. Based on the summary of the development status of the involved technologies, this paper analyzes the corresponding technical features, gives the future development trends, and indicates the direction of technological breakthrough for the extensive application of UAVs in missions such as epidemic prevention and emergency disaster rescue.

Key words: UAV for Epidemic Prevention; Computer Vision; Visual-based Navigation; Hybrid Electric Long-endurance; Infrared Thermometry

1 引言

随着无人机技术的发展, 无人机在管线检测、地质勘探、公路巡检以及抢险救灾等领域的应用价值得到了越来越多的体现^[1]。新冠疫情期间, 为避免疫情传播, 各种无人机出现在了楼宇、村庄、城市

街道、高速路口等场景, 发挥了创新性作用, 成为了疫情防控的得力手段^[2]。用无人机平台进行“非接触式”疫情防控, 可以提高工作效率, 降低人员的接触感染风险, 开创立体疫情防控模式。目前, 防控无人机的应用领域主要包括安全巡查、物资投递、消杀喷雾、热感测温以及防控宣传等。

本文针对疫情防控无人机应用的关键技术展开综述,对相关领域近十年的研究状况进行了总结,其中第2章分析了计算机视觉技术的研究现状,第3章分析了无人机视觉导航系统的组成与技术方

2 计算机视觉技术

新冠疫情期间,广东肇庆等地使用无人机取代了车辆进行巡检,从高空监测车流、人流情况,将监控视频实时传回公安局指挥部等地,帮助工作人员进行监控和督导。然而,由于人力监控成本较高,容易发生错漏,需要引入计算机视觉技术作为疫情监控的辅助方法。计算机视觉(Computer Vision, CV)是指使用计算机及相关设备模拟人类的观察行为,从而具有通过视觉观察和理解世界的能力。近十年来,计算机视觉技术与无人机技术的结合越来越紧密,为无人机应对感知问题及广泛开发应用解除了根本的技术限制^[3]。

2.1 图像预处理

在实际的生产生活中,无人机搭载的视觉传感器拍摄图像往往因为成像技术、拍摄环境、物体间的相对运动以及相机本身的抖动等问题造成图像退化。噪声和模糊是最典型的图像退化现象,需要经过图像预处理才能投入使用。图像预处理是计算机视觉技术的基石,是基于一定假设条件下的信号重建,具体技术包括图像去噪和图像去模糊等。

(1)图像去噪:高斯噪声是去噪最常见的对象,其概率密度函数服从高斯分布。相比于词典学习和稀疏编码等传统方法,基于深度学习的方法在降低图像噪声方面具有明显的优势^[4]。

基于深度学习的去噪方法主要包括以下两种:去噪卷积神经网络(Denoising Convolutional Neural Network, DnCNN)是以卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)为基础的图像去噪方法的代表,采用残差学习和批量归一化训练一个端到端的CNN网络,是网络能够学习到加性高斯白噪声,模型包括卷积层(Convolutional Layer, Conv)、整流线

性单元层(Rectified Linear Units, ReLU)和批量标准化层(Batch Normalization, BN),并组合成三种层^[5](如图1),可以通过单一模型处理多个低级任务;Guo等^[6]提出卷积盲去噪网络模型(Convolutional Blind Denoising Network, CBD Net),包括一个噪声估计子网络和一个非盲去噪子网络(如图2),结合了噪声建模和非对称学习等特点,可以实现图像的盲去噪。盲去噪是指未知噪声水平的去噪,将噪声水平的估计值作为可调节的参数输入到网络结构中,可以改变网络结构的性能,提高鲁棒性和实用性。

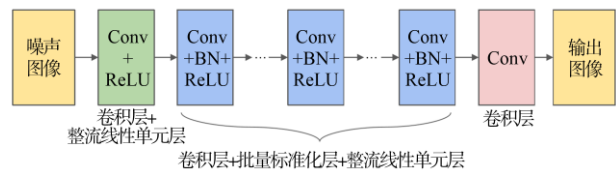


图1 DnCNN算法模型^[5]

Fig. 1 Model of DnCNN^[5]

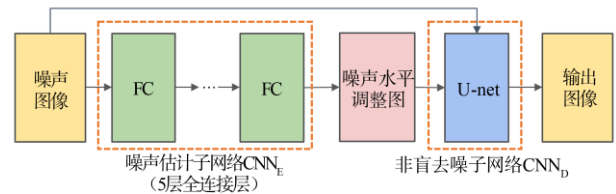


图2 CBDNet盲去噪架构图^[6]

Fig. 2 Illustration of CBDNet for blind denoising^[6]

(2)图像去模糊:无人机航拍时,无人机的机械振动、失焦、风力影响以及拍摄目标的快速移动等,都可能影响航拍图像效果,使得图像丢失细节信息而变得模糊,难以进行后续处理。由于无人机抗风能力较差,飞行姿态易受气流影响,因此无人机图像模糊主要是运动图像模糊。除了对硬件设备进行稳像处理以及搭建稳定拍摄控制系统等方法,主要的运动图像去模糊方法是对成像后的图像进行处理,通过对图像运动模糊去除算法的研究,达到图像复原的目的。

模糊图像可看作清晰图像和模糊核进行卷积的结果^[7]。根据模糊核是否已知,将去模糊方法分为非盲去模糊和盲去模糊。非盲去模糊中,模糊核已知,可直接通过反卷积的方法去除图像模糊;实

际应用中,模糊核一般是未知的,使用的多是盲去模糊法,需要求解出模糊核,再利用反卷积的方法去除图像模糊,或将模糊核估计的过程和图像去模糊的过程交替进行,具体包括基于图像梯度分布的方法、基于图像L1范数和L2范数比值的方法等。然而,这些方法的数学模型和求解方法相对复杂,算法鲁棒性不强,很难处理不同数据集和不同因素造成的模糊。

基于深度学习的图像去模糊算法可以兼顾图像复原的效果以及网络模型的自适应性,在一般的任务场景中具有明显的优势。其中,基于CNN的盲去模糊方法,其基本思想是将模糊图像和对应的清晰图像作为训练样本,输入CNN进行训练,训练完成后得到优化后的网络模型,使用时将模糊图像作为网络输入,网络输出即为去模糊后的图像。在此基础上,Seungjun等人^[8]为解决实测清晰图像和模糊图像对难以获得,以及非均匀模糊图像局部模糊核难以确定的问题,提出了一种多尺度CNN方法,以端到端的方式恢复清晰的图像。

在生成对抗网络模型^[9]的基础上,Kupyn等^[10]提出了DeblurGAN模型,这是一种基于感知损失和条件生成对抗网络的端到端模型,改善了视觉效果、峰值信噪比和结构相似性指标。但使用DeblurGAN进行单张图片的动态场景去模糊时,会出现棋盘效应和色块偏移等问题,Shao等^[11]对此设计了一种基于反向信道的判别先验器,以及代替DeblurGAN中原始生成器的自动编码器,这种方法被命名为DeblurGAN+,这是单张图片动态场景去模糊的最新技术。

2.2 目标检测

目标检测是泛身份识别(如人群计数)领域的基础性的算法,是智能化疫情监控系统的核心部分。目标检测的任务是对目标位置进行定位,同时获得该目标的类别信息,方法可大致分为传统检测方法与基于深度学习的检测方法^[12],2012年以前,目标检测主要利用梯度直方图、局部二值模式等基于特征的方法;2012年以后,基于深度学习的目标检测方法逐渐占据主导地位,并使目标检测算法实现了质的提升^[13]。根据技术路径,目标检测可分为单阶段检测算法与两阶段检测算法(如图3)。

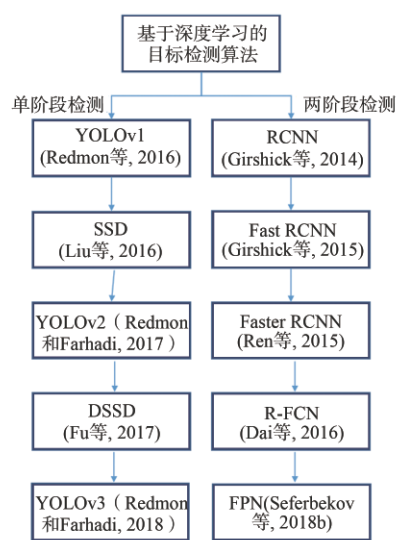


图3 基于深度学习的目标检测算法发展路线图

Fig. 3 A road map of object detection based on deep learning

两阶段检测多为基于分类的检测算法,此类方法的核心思想是将候选区域与CNN相结合,将目标检测问题通过分类进行解决。这类方法检测精度较高,检测速度较慢。单阶段检测多为基于回归的检测算法,相比于两阶段检测,单阶段检测降低了部分精度,但很好地提高了目标检测算法的实时性。单阶段算法将整张图片作为输入,使得目标框及目标类别信息从给定图像的多个位置直接回归得出,同时进行分类和回归也使完整的单次训练得以实现特征共享,实现了端到端的检测过程。单阶段算法在保证精度的同时,明显提升了计算速度^[13]。

目标检测效果的评价指标通常为平均精度均值(mean Average Precision, mAP)。平均精度(Average Precision, AP)用于衡量检测器在每个类别上的检测性能,mAP是得到每个类别的平均精度值后再取所有类别的平均值,用于评价多目标的检测器性能。表1为几种目标检测算法在COCO数据集上的检测精度和速度对比^[14]。由表可得,YOLOv3系列算法兼顾了准确度和实时性,检测效果最好。

此外,疫情防控无人机多为低空或超低空无人机,搭载的视觉传感器为低空视角,需要针对具体的任务场景建立数据集。

表1 目标检测算法检测性能对比

Table 1 Comparison of different object detection algorithms

目标检测方法	mAP	检测时间/ms
SSD321	45.4	61
DSSD321	46.1	85
R-FCN	51.9	85
SSD513	50.4	125
DSSD513	53.3	156
FPN FRCN	59.1	172
YOLOv3-320	51.5	22
YOLOv3-416	55.3	29
YOLOv3-608	57.9	51

2.3 密度估计与人群计数

在视频监控、交通监控和公共安全等领域,密度估算与人群计数有着广泛的应用^[15],相关技术也可推广用于车辆计数等领域。新冠疫情防控期间,有关部门持续加大监控力度,出动了许多无人机在小区和村庄等地进行巡逻督查和防疫宣传。但是,单纯依靠人力视频监控依然存在局限性。如果能充分利用视频监控的密度估计和人群计数技术,一方面可以大量节省人力物力,另一方面也可以对一些紧急情况进行高效地分析、预防和处理。

影响人群计数的因素主要包括遮挡、密度差异、光照不均和视角变化等。传统的依赖人为设计特征的方法通常局限于人流密集程度较低和目标尺度变化较小的情况,难以进行实际应用。相对于传统方法,基于CNN的方法可以广泛应用于复杂的场景^[15],如不同密集程度,目标尺度变化,视角透视,目标遮挡的场景。

单张图像的人群计数问题目前主要有两种解决途径:一是根据输入的图像,经由某一特定算法,直接得到预估的整张图像中包含的人数;二是先由输入的图像生成对应的密度图,再将密度图的各像素值累加并得到总人数。基于密度图的人群计数方法不仅可以获取总人数,从密度图中还能直观地得到人群分布信息,这对于许多应用场景都有极大的意义^[16],也适用于疫情监控。基于密度图的人群计数算法流程(如图4)为:输入的图像经过CNN网络计算,得到对应的密度图像,通过密度图像可以清晰地看出人群分布特征、密集和稀疏的区域等信息,并将像素值累加得到总人数。



图4 基于密度图的人群计数流程图

Fig. 4 Work flow chart of crowd count based on density map

对于基于密度图的人群计数方法,多尺度特征表达和高分辨率密度图构建是两个关键问题。Zhang等^[17]提出了一种多列结构的CNN模型MCNN,通过使用多个卷积核大小不同的网络来捕捉不同尺度的目标特征信息,以增强模型的稳定性,适应人群的尺度变化。Sindagi等^[18]提出了CP-CNN模型,通过在模型中引入局部和全局的上下文信息来抑制背景响应,减小了估计误差。Sam等^[19]考虑到图像中不同区域的差异性提出了Switching-CNN模型,在多个独立的回归模型中为每块区域选择一个最优模型进行密度估计。Liu等^[20]提出了一个仅需要点监督的新深度检测网络PSSDN,可以同时检测人体头部的大小和位置并计数,且不需要复杂的边界框注释。在这些工作基础上, Sam等^[21]提出了LSC-CNN模型,采用多列体系结构,具有自上而下的反馈处理功能,能可靠地检测稀疏人群以及密集人群中人体头部以执行人群计数任务,并在多种分辨率下均可生成精确的预测,解决了多尺度人群检测和高分辨率密度图构建的问题,是目前密度估计与人群计数的最新方法。

3 视觉导航技术

视觉导航(Vision-Based Navigation, VBN)是一种利用可见光与不可见光成像技术进行导航的方法,已广泛应用于无人机(如图5)、各类巡航导弹、深空探测器以及室内外机器人等领域^[22]。随着计算机视觉与无人机控制技术的发展,将计算机视觉技术应用于无人机视觉导航是目前研究的趋势。无人机视觉导航,本质是通过计算机视觉技术对周围环境进行图像采集,经过处理后输出有指导意义的导航信息,具有快速灵活、自主性强、不易受干扰等优点,是实现无人机长航时自主导航飞行的重要技术^[23]。在新冠疫情的防控工作中,许多政府工作部门增加了无人机的采购数量,却缺少成熟的无人机操作人员,影响了无人机的实际应用。视觉导航技术,可以减少工作人员的培训时间,降低无人机的操作难度,还可在工作人员的视距外和弱GPS环

境下进行工作,有利于疫情防控工作的展开和工作区域的拓展。



图5 无人机视觉导航技术的应用
Fig. 5 Application of UAV visual-based navigation

3.1 视觉导航系统组成

无人机视觉导航系统有两种构成方式,一种是将计算单元安放于地面,另一种是将图像处理算法计算单元安装在飞行器上。对于第一种方式,无人机上需要安装远距离无线高速图像传输装置,并且存在时延和信号干扰问题,存在一定技术障碍。对于第二种方式,可将英伟达 Jetson TX1 和 Jetson Nano 等板载计算机(如图6)作为图像处理算法计算单元,直接与图像采集设备进行硬件线路的连接,这种方法几乎没有延时,可以通过优化算法等方式满足实时性要求。

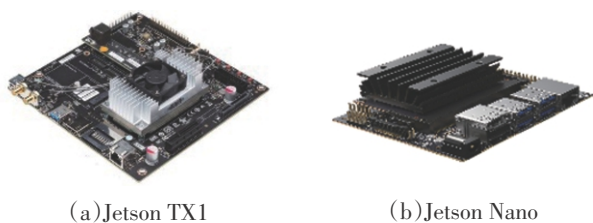


图6 英伟达板载计算机示例
Fig. 6 On-board computer of NVIDIA

视觉导航系统一般包括远程计算机、导航模块、控制模块及动力模块(如图7)。视觉导航系统在工作时,由图像采集模块中的各类视觉传感器采集目标区域或目标物体表面的特征图像数据,传输给板载计算机,由板载计算机进行计算机视觉与导航信息提取算法处理,融合 IMU 惯性导航信息和 GPS 信息等,向飞行控制单元输出控制指令。

3.2 视觉导航技术方案

视觉导航可分为无地图导航和地图型导航^[23],

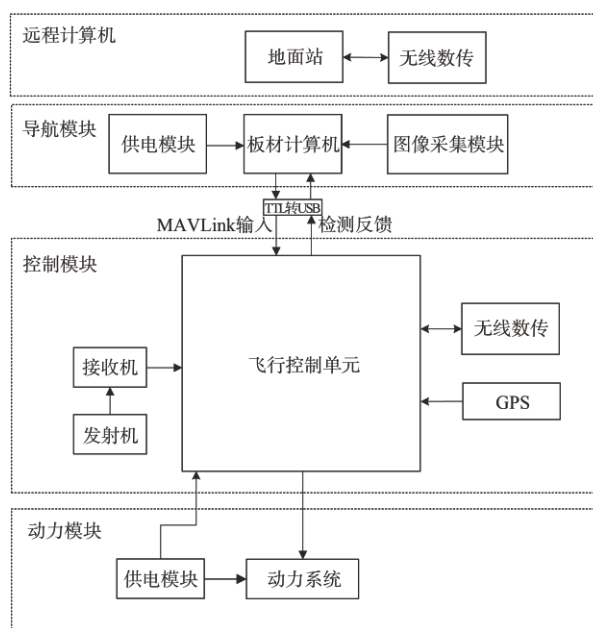


图7 视觉导航系统模块组成示意图

Fig. 7 Composition of vision-based navigation system

无地图导航主要使用视觉里程计,是基于序列图像的运动估计的导航,可通过对环境的感知获取特征,利用相邻两帧间的特征变化关系估计帧间的相对运动,通过多帧累积计算实现对飞行器的导航,可以应用于非固定的疫情防控任务场景。地图型导航主要为景象匹配导航,需要预先存储包含精确地理信息的导航地图,利用一帧实拍图像与导航地图匹配即可实现飞行器的绝对定位,可以应用于固定的疫情防控任务场景。

(1)里程计是感知载体运动状态变化的一类传感器,视觉里程计通过分析处理相关图像序列确定载体的位置和姿态,使用视觉传感器,如光学相机、深度相机等,通过相机运动过程中捕获的在时间上连续的图像流进行相机位姿递推估计^[24]。使用一个相机的里程计被称为单目视觉里程计,使用两个或以上相机的里程计被称为立体视觉里程计。在视觉里程计技术的基础上,同步定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)快速发展,也成为一种重要的室内视觉导航方法。

视觉里程计的工作方法可以分为特征点法和直接法。特征点法通过提取序列图像中的特征点,计算其描述子,进行相邻图像帧的特征点匹配,最终解算出相机的位置和姿态变化。特征点法运算稳定,但计算量大,适用于光照适宜和纹理丰富的

场景。由于需要保证序列图像中相邻图像帧的内容有足够的重叠区域,无人机需要相对平稳地飞行。经典的特征点检测与描述子计算方法包括SIFT、SURF以及ORB等;特征点匹配方法包括暴力匹配法以及快速近似最近邻法;相机位姿估计法包括对极几何(单目相机)、PnP(含3D点且位于相机的投影位置)和ICP(双目、RDB-G相机)等^[24],著名开源项目包括PTAM和ORB-SLAM2等。

直接法以光度不变性假设为基础,以光流法或者计算光度误差的方式,直接进行像素跟踪。相较于特征点法,直接法无需提取特征点与计算描述子,所以处理速度优于特征点法,结果更加鲁棒^[25]。直接法包括稀疏直接法、稠密直接法和半稠密直接法,著名开源项目包括SVO以及LSD-SLAM等^[25]。

(2)景象匹配导航采用视觉传感器获取飞行或目标附近的区域图像,与存储的基准图像进行匹配以获取飞行器的位置数据^[26]。无人机景象匹配视觉导航的算法流程包括适配区选取、图像匹配与导航定位。

适配区选取时需要考虑的图像特征包括信息量、稳定性、显著性等,选取方法可分为两种,一种是将选定区域进行适配性检验比较从而得出适配区,这种方法比较简单也比较常用,但是因为备选适配区是随机选定的,适配区的位置有可能并不是全图最优^[27];另一种是直接对所有像素点进行适配性计算,先确定适配最佳点,再将以此为区域的区域作为适配区,这种方法计算量大,一般可以找到全图最优适配区^[28]。

图像匹配方法一般可分为两类,即基于灰度区域的图像匹配方法和基于特征的图像匹配方法。基于灰度区域的匹配方法首先提取图像的灰度信息,再对灰度信息进行相似性度量匹配,这样的方法易受环境干扰,匹配结果稳定性差,在真实环境中可用性差,目前在飞行器导航中采用的基于灰度区域的匹配算法有平均绝对差算法等^[28];基于特征的图像匹配通过提取待匹配图像的特征点并比较相似度来匹配图像,包括基于SURF特征的鲁棒景象匹配算法^[29]、基于SIFT特征实现的雷达景象匹配方法^[30]以及加权Hausdorff距离图像匹配算法^[31]等。

导航定位的实质是将实时的地物景象图与预

先存储的地物景象数字基准图进行匹配比较,从而获得位置信息,可实现飞行器导航的绝对定位。其中,地物景象实测图像是通过高分辨率视觉传感器实时拍摄的,标注真实地理信息的地物景象数字基准图则需要预先存储于机载计算机中。这种方法可以精确地计算出飞行器位置以修正航向误差,同时可借助获得的位置信息来消除惯导系统长时间工作的累积误差^[26]。

4 混合电动长航时技术

抗击疫情时,通常需要无人机在大区域范围内进行长时间监控宣传或喷洒消杀作业,所以要求无人机具有一定的载荷能力,同时具备长航时滞空能力。混合电动长航时技术作为当前无人机的前沿技术,主要包括混合动力系统和能源管理技术,该技术的发展可为无人机在疫区的广泛应用起到重要的推动作用。混合动力系统主要有两类:油电混合动力系统和多种新能源混合的电动力系统(简称为新能源混合动力系统)。其中,油电混合动力系统主要是内燃机与电机的混合应用,兼具传统油动无人机的高比能优势和电动飞机动力控制简单稳定的优势。新能源混合动力系统主要涉及蓄电池、太阳能电池、燃料电池的混合应用,采用该技术的飞机本质上是一种电动飞机,仅采用电机推进装置。

4.1 混合动力技术

(1)油电混合动力系统

油电混合动力系统主要有动力耦合式和动力分离式两种构成方式,油动系统的高比能可以满足长航时需求,而利用电动系统主要有两个目的,一是配合发动机的高效工作模式,使系统处于高效经济的状态,主要针对动力耦合式构成方式;二是用于固定翼的多旋翼动力模式,实现垂直起降功能,主要针对动力分离式构成方式。动力耦合式的混合动力系统,具有串联结构、并联结构以及串并联结构三种形式^[32],动力装置之间通过机械连接耦合,如皮带和行星齿。动力分离式主要是指两套动力系统之间没有机械连接关系,是独立运行的,如垂直起降固定翼无人机,其油动系统用于固定翼模式飞行,电动力系统用于旋翼模式飞行。油电混合动力系统既可用于固定翼无人机,也可适用于旋翼无人机,且对旋翼无人机的航时

提升效果更为明显。

(2) 新能源混合动力系统

用于无人机的新能源混合动力系统主要有：太阳能电池/蓄电池混合动力系统^[33-35]、燃料电池/蓄电池混合动力系统^[36-39]、以及太阳能电池/燃料电池/蓄电池混合动力系统^[40]。太阳能电池/蓄电池混合动力系统对于太阳能的利用比较充分，理论上能够无限航时，但受限于电源系统的退化以及蓄电池充放电次数限制，实际无法达到无限航时，而该类型的无人机最大的问题是受天气条件影响较大。目前，持续航时最长的太阳能无人机是苏黎世联邦理工大学的 AtlantikSolar 无人机，其创造了 81h 的持续航时记录^[41]。燃料电池/蓄电池混合动力系统充分利用燃料电池高能比和蓄电池高比功率的优势，使得电动无人机兼具机动灵活和长航滞空能力，且受天气影响较小，是目前中低空电动长航时飞机具有竞争力的动力解决方案。目前，该类型的无人机的最大持续滞空时间是美国离子虎无人机保持的 48h 的记录^[42]。太阳能电池/燃料电池/蓄电池混合动力系统是现阶段最复杂的新能源混合动力系统，其核心思想是“优势互补”，实现更长航时的飞行，但同时会带来复杂的电力匹配设计和能源管理方

法。然而，目前该类型的无人机尚未达到超长航时的目标，尚处于探索研究阶段，仅韩国的 EAV-2 太阳能无人机进行了 22h 的飞行试验^[43-44]。最近，美国为了进一步延长离子虎的航时，提出了“混合虎”的概念^[45]，即为离子虎增加了太阳能电池机翼，作为能量的补充，但目前还未见样机和试飞结果的相关报道。

(3) 各类混合动力无人机对比

表 2 和表 3 分别给出了各类混合动力固定翼无人机和混合动力旋翼无人机的载荷与航时特点，所列机型均为同类机型中技术指标较为先进的典型代表。虽然锂电池动力无人机因成本低、可靠性高的特点，是当前应用最为广泛的机型，但其能量密度低严重限制了续航能力。相比之下，各类混合动力系统所带来的航时优势十分明显，且各有特点。对于混合动力固定翼无人机，油电混合动力所带来的载荷能力优势明显，航时提升效果一般；太阳能与锂电池的混合（太锂混合）动力能够支持长航时，甚至超长航时飞行，但相比其它类型的无人机其载荷能力最小；燃料电池与锂电池的混合（燃锂混合）动力则兼具载荷能力和航时优势；太阳能电池/燃料电池/锂电池混合（太燃锂混合）目前尚处于探索

表 2 各类典型混合动力固定翼无人机
Table 2 Typical hybrid electric fixed-wing UAVs






类别	公司	型号	最大起飞质量/kg	最大载荷/kg	航时/h	图例
锂电池	云影飞扬	C200	29	6	2	
油电混合	成都纵横	CW-100	105	20	4-8	
太锂混合	ETH Zurich	Atlantik Solar	6.93	0.9	81.5	
燃锂混合	NRL	IonTiger	16	2	48	
太燃锂混合	KARI	EAV-2	18.5	0.5	22	

表3 各类典型混合电动旋翼无人机
Table 3 Typical hybrid electric rotor-wing UAVs

类别	公司	型号	最大起飞质量/kg	最大载荷/kg	航时/h	图例
锂电池	大疆	经纬 M210	6.1	2.3	0.6	
	华科尔	QL1200	18	3	1.5	
油电混合	Top Flight	Airborg™ H8 10K	50	10	2	
	深圳艾特	AT-1290	22	10	2	
燃锂混合	新研氢能	-	15	6	1.5	
	武汉众宇	游骑兵	15	3	3.5	
	科比特	HyDrone 1800	8	5	4	

阶段,载荷与航时潜力尚未完全释放。对于混合动力旋翼无人机,太阳能电池受限于较小的功率面密度,不适合作为高功耗旋翼飞机的动力源。相比锂电池动力,油电混合动力可有效提升旋翼无人机的载荷能力和续航能力,但其动力系统十分复杂,使用和维护成本更高。相比之下,燃锂混合动力系统则能够兼具大载荷和长航时优势,且仅有电机动力系统,维护成本较低。在抗击疫情期间,可根据任务需求选择合适的动力方案,如需长航时小载荷的监控宣传工作可用新能源混合动力方案,对大载荷的喷洒消杀工作可以选择油电混合和燃锂混合动力方案。

4.2 能源管理技术

能源管理技术是混合动力系统的研究热点和难点,是混合电动无人机的核心技术,直接决定了

无人机燃料的经济性、可靠性和健康工作条件^[46]。能源管理是在满足无人机需求功率的前提下,实现对动力源功率优化分配,使整体性能最佳。该技术在混合动力汽车领域发展较快,但在混合动力无人机领域发展相对较慢,目前应用于无人机的能源管理策略主要为基于规则的控制策略。近期,也有学者开始探索基于实时优化的控制策略,如模型预测控制策略^[47]。

基于规则的能源管理策略因其简单可靠等特点,成为目前应用最广泛的控制策略,主要包括状态机控制策略和模糊逻辑控制策略。状态机控制策略主要根据无人机需求功率和系统的状态输入,确定各动力源的输出功率,使动力系统长期处于高效工作区,同时保证各动力源健康工作。模糊控制策略的基本原理是模仿人脑的不确定性判断、推理

思维方式,对于一些模型未知的黑箱系统或者较高不确定性和大滞后的非线性系统,应用模糊控制策略可以解决常规方法难以解决的规则型模糊信息问题^[48-49]。基于规则的能源管理策略算法设计简单,便于实时控制,受外界干扰小,但缺点是规则设计依赖设计者的工程经验,很难获得最优控制效果。因此,基于优化的控制策略开始应用于混合动力无人机,如模型预测控制器策略,其基于滚动优化机制,将最优控制问题转化为有限时域内的非线性约束优化问题,以燃料经济性为目标,探索高效次优能源管理方法。随着高性能、小型计算单元的模块化,基于人工智能的能源管理方法,如深度强化学习方法,也将是未来的研究热点和发展趋势。此外,目前的能源管理多局限于能源与动力系统本身,对飞行运动考虑较少,而能源系统与飞行运动具有强耦合的特点,从飞机整体层面考虑能量的综合优化控制也将是混合电动无人机的发展重点^[50]。

5 其它抗疫载荷技术

5.1 机载小型喊话器技术

新冠疫情防控期间,无人机携带喊话器直接参与了防疫督导和消息广播的抗疫工作,在提高工作人员执勤效率的同时,避免了疫情的传播。图8为张掖甘州滨河新区某小区无人机携带喊话器进行防疫宣传。无人机携带的喊话器主要分为有线式(手持式)喊话器和无线式喊话器,其中无线式喊话器由地面手持端和机载喊话喇叭组成,工作人员可结合监控视频,利用地面手持端进行实时喊话;工作人员也可将疫情防控话语录制在有线式喊话器中反复播放,再将喊话器悬挂于无人机上,大范围传播防疫宣传内容。表4给出了当前适用于无人机的有线式与无线式喊话器的指标参数。



(a)无人机携带喊话器

(b)执勤人员喊话

图8 无人机携带喊话器进行防疫宣传

Fig. 8 UAV carries megaphone for epidemic prevention propaganda

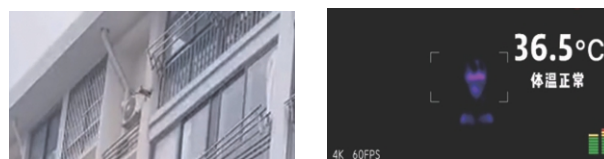
表4 喊话器参数对比

Table 4 Comparison of horn performance

品牌	传音距离/m	扩音距离/m	续航/h	质量/g
SMRC	2000	200	2	95
普宙	5000	300	外接	496
宜工	-	500	8	100
谋福	-	800	6	250

5.2 机载红外测温技术

在新冠疫情爆发之前,红外测温无人机曾应用于国家电网的电力巡检。此次疫情激活了体温测量的需求,也使红外测温无人机得以应用。红外测温技术是一项比较先进的非接触式体温测量技术,可通过红外探测器采集待测人体的红外辐射能量分析得出温度结果。无人机搭载红外测温仪,可以为执勤人员对管控区域的居民进行非接触式体温监测,避免交叉感染。图9为南京市浦口区汤泉街道某小区,利用无人机实现无接触测量体温。



(a)无人机红外测温

(b)测温仪图像显示

图9 使用无人机进行非接触式温度测量

Fig. 9 Non-contact temperature measurement with UAV

红外测温仪按照测量方式的不同分为红外耳温计、红外额温计和红外热像仪^[51],由于红外耳温计和红外额温计的工作距离在10cm以内,无人机上只适合搭载红外热像仪进行体温测量。表5中给出了国内外先进的红外热像仪的性能参数。

表5 红外热像仪性能对比

Table 5 Comparison of infrared thermal imager performance

品牌	型号	测温测距/m	范围/°C	精度/°C
高德红外	IR236	2~10	-10~50	±0.3
新瀚光电	TMT-9000	0.5~3	30~42	±0.2
恩莱科技	EL-TPC-A	3	30~45	±0.3
艾睿光电	ITS300/600	5~10	0~60	±0.5
FOTRIC	692PRO	5~10	20~60	±0.5

6 结束语

无人机及其相关技术在国内新型冠状病毒的疫情防控中发挥了积极的抗疫作用,尤其在防疫监控宣传和消杀喷洒等方面显示了较大的应用潜力。计算机视觉技术可以满足对重点防疫区域的监控任务,视觉导航技术能够支持对敏感目标的自主寻找和跟踪,长航时技术的发展能够保证大范围的持续作业能力。然而,当前仍是离散的技术发展导向,缺少直面防疫任务的综合集成优化;且当前的应用对人在回路的处理与决策依赖严重,要求使用人员具备专业的飞行操控技能,使得应用成本较高,限制了无人机在防疫过程中的大规模应用。

为了更好地释放无人机在疫情防控、应急救援等领域的应用潜能,未来需要在智能监控、自主导航和增长航时等方面取得进一步突破的同时,面向具体的任务开展综合优化设计,相关抗疫载荷技术也需要进一步针对无人机平台进行适应性发展。总之,此次疫情为无人机的发展提供了新的应用需求,也带来了新的挑战,未来无人机的发展也需要由技术导向转向为直面应用的需求导向,并向着自主化、智能化以及无人化的方向不断发展。

参考文献

- [1] 张莞玲. 无人机低空摄影测量系统的应用[J]. 工程技术研究, 2017, (4):24+110.
- [2] 董可. 无人机应用及公共服务前景展望[N]. 中国航空报, 2020.
- [3] Abdulla A, David M, Fernando G, et al. Survey of computer vision algorithms and applications for unmanned aerial vehicles [J]. Expert Systems With Applications, 2018, 92: 447-463.
- [4] Liu B Z, Liu J B. Overview of image denoising based on deep learning[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1176 (2): 22010.
- [5] Zhang K, Wang M Z, Chen Y J, et al. Beyond a gaussian denoiser: residual learning of deep CNN for image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(7): 3142-3155.
- [6] Guo S, Yan Z, Zhang K, et al. Toward convolutional blind denoising of real photographs [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Los Angeles, USA, 2019.
- [7] 杨东. 模糊降质图像恢复技术研究进展[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(10): 2881-2888.
- [8] Nah S, Kim T H, Lee K M. Deep multi-scale convolutional neural network for dynamic scene deblurring [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Hawaii, USA, 2017.
- [9] Goodfellow I, Pouget J, Mirza M, et al. Generative adversarial networks [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2014, 3: 2672-2680.
- [10] Kupyn O, Budzan V, Mykhailych M, et al. DeblurGAN: blind motion deblurring using conditional adversarial networks [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Salt Lake City, USA, 2018.
- [11] Shao W, Liu Y, Ye L, et al. DeblurGAN+: revisiting blind motion deblurring using conditional adversarial networks [J]. Signal Processing, 2020, 168: 107338.
- [12] 李章维, 胡安顺, 王晓飞. 基于视觉的目标检测方法综述[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(8): 1-9.
- [13] 赵永强, 饶元, 董世鹏, 等. 深度学习目标检测方法综述[J]. 中国图像图形学报, 2020, 25(4): 629-654.
- [14] Redmon J, Farhadi A. YOLOv3: An incremental improvement [J]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2018, ArXiv Preprint ArXiv: 1804.02767.
- [15] Vishwanath A S, Vishal M P. A survey of recent advances in CNN-based single image crowd counting and density estimation [J]. Pattern Recognition Letters, 2017, 107: 3-16.
- [16] 薛致远. 基于卷积神经网络的人群计数方法研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [17] Zhang Y, Zhou D, Chen S, et al. Single-image crowd counting via multi-column convolutional neural network [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, USA, 2016.
- [18] Sindagi V A, Patel V M. CNN-Based cascaded multi-task learning of high-level prior and density estimation for crowd counting [C]. IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), Lecce, Italy, 2017.
- [19] Sam D B, Surya S, Babu R V, et al. Switching convolutional neural network for crowd counting [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Hawaii, USA, 2017.
- [20] Liu Y, Shi M, Zhao Q, et al. Point in, box out: beyond counting persons in crowds [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Los Angeles, USA, 2019.
- [21] Sam D B, Peri S V, Sundararaman M N, et al. Locate, size and count: accurately resolving people in dense crowds via detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, arXiv:1906.07538
- [22] 管叙军, 王新龙. 视觉导航技术发展综述[J]. 航空兵器, 2014(5): 3-8+14.
- [23] 宋琳. 无人机飞行途中视觉导航关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- [24] 李一博. 微小型飞行器视觉感知与自主导航关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [25] 涂金戈, 谢仁平, 赵鹏程. 一种双目直接法视觉里程计[J].

- 测绘地理信息, 2020, 45(2): 111-115.
- [26] 赵春晖, 周昞慧, 林钊, 等. 无人机景象匹配视觉导航技术综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(5): 507-519.
- [27] 张阳阳, 苏娟, 李彬. 基于多属性综合评价的SAR景象匹配区选取方法[J]. 弹箭与制导学报, 2016, 36(3): 104-108.
- [28] Luo H B, Chang Z, Yu X R, et al. Automatic suitable-matching area selection method based on multi-feature fusion [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2037-2041.
- [29] 熊智, 陈方, 王丹, 等. SAR/INS组合导航中基于SURF的鲁棒景象匹配算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(1): 49-54.
- [30] 杨朝辉, 陈鹰, 邵永社, 等. 基于SIFT特征的合成孔径雷达景象匹配方法[J]. 计算机应用, 2008(9): 2404-2406.
- [31] 冷雪飞, 刘建业, 熊智. 基于分支特征点的导航用实时图像匹配算法[J]. 自动化学报, 2007(7): 678-682.
- [32] 宋佳, 王鑫海, 徐文龙, 等. 混合动力电动汽车电驱系研究综述[J]. 时代汽车, 2019(10): 59-61.
- [33] 刘莉, 曹潇, 张晓辉, 等. 轻小型太阳能/氢能无人机发展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 6-33.
- [34] Steve C A, David G, Paul D M, et al. Energy management of solar-powered aircraft-based high altitude platform for wireless communications[J]. *Electronics*, 2020, 9(1): 179.
- [35] 吴健发, 王宏伦, 黄宇. 大跨时空任务背景下的太阳能无人机任务规划技术研究进展[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 64-84.
- [36] Zehra U B, Ufuk K, Eyyup O. Investigation of PEMFC performance for cruising hybrid powered fixed-wing electric UAV in different temperatures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(11): 7036-7045.
- [37] Renau J, Sanchez F, Lozano A, et al. Analysis of the performance of a passive hybrid powerplant to power a lightweight unmanned aerial vehicle for a high altitude mission [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 356: 124-132.
- [38] 张晓辉. 燃料电池混合动力无人机能源管理研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [39] 张晓辉, 刘莉, 戴月领, 等. 燃料电池无人机动系统方案设计与试验[J]. 航空学报, 2018, 39(8): 162-171.
- [40] Zhang X H, Li L, Xu G T. Energy management strategy of hybrid PEMFC-PV-Battery propulsion system for low altitude UAVs [C]. *AIAA/SAE/ASCE Joint Propulsion Conference*, the Salt City, 2016.
- [41] Oettershagen P, Melzer A, Mantel T, et al. Design of small hand-launched solar-powered UAVs: From concept study to a multiday world endurance record flight [J]. *Journal of Field Robotics*, 2017, 34(7): 1352-1377.
- [42] Swider K E, MacKrell J A, Rodgers J A, et al. Hydrogen fuel cell propulsion for long endurance small UAVs [C]. *AIAA Centennial of Naval Aviation Forum "100 Years of Achievement and Progress"*, Virginia Beach, 2011.
- [43] Lee B, Park P, Kim K, et al. The flight test and power simulations of an UAV powered by solar cells, a fuel cell and batteries [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(1): 399-405.
- [44] Lee B, Kwon S, Park P, et al. Active power management system for an unmanned aerial vehicle powered by solar cells, a fuel cell, and batteries [J]. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2014, 50(4): 3167-3177.
- [45] NRL completes first flight of Ion Tiger with custom fuel cell [J]. *Fuel Cells Bulletin*, 2017, (1): 5.
- [46] Lei T, Yang Z, Lin Z C, et al. State of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(6): 1488-1503.
- [47] 戴月领. 基于模型预测的燃料电池无人机能源管理策略研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2019.
- [48] 苏岭, 曾育平, 秦大同. 插电式混合动力汽车能量管理策略研究现状和发展趋势[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(2): 1-19.
- [49] Yang Z, Lei T, Lin Z, et al. The testing platform of hybrid electric power system for a fuel cell unmanned aerial vehicle [C]. *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference*, Nottingham, UK, 2018.
- [50] 孙侠生, 程文渊, 穆作栋, 等. 电动飞机发展白皮书[J]. 航空科学技术, 2019, 30(11): 1-7.
- [51] 葛泽勋. 医用红外测温仪及其关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.

作者简介:



赵伟(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为飞行器智能感知与控制。



王正平(1971-), 男, 高级实验师, 主要研究方向为飞行器总体设计。



张晓辉(1988-), 男, 博士后, 主要研究方向为新能源飞行器总体设计与能源管理。本文通信作者。



向乾(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源飞行器总体设计与能源管理。



贺云涛(1990-), 男, 实验师, 主要研究方向为飞行器智能感知与控制。

[引用格式] 刘劭纯. 自动导引运输车发展现状及关键技术分析[J]. 无人系统技术, 2020, 3(3): 19-24.

自动导引运输车发展现状及关键技术分析

刘劭纯

(北京特种机械研究所, 北京 100143)

摘要: 自动导引车 (AGV) 是集机、电、信息为一体的自动化系统。对 AGV 领域的发展现状及关键技术进行了分析, 并对其未来发展方向进行了展望。首先介绍了 AGV 的发展历程以及 AGV 在 2020 年新冠病毒疫情期间发挥的重要作用, 随后对国内外 AGV 的主要制造商及 AGV 技术的发展现状进行了介绍, 接着对 AGV 系统的关键技术进行了分析, 对 AGV 系统的驱动技术、导航技术、轨迹规划技术以及调度技术做了介绍, 最后对于 AGV 领域的发展方向做出了预测。随着“中国智能制造 2025”的不断推进, AGV 各项技术的不断成熟, AGV 系统有着广阔的市场前景和发展潜力, 其大规模的应用将进一步解放生产力, 提升生产效率, 促进行业变革及社会发展。

关键词: 自动导引运输车; 轮组驱动; 导航定位; 轨迹规划; 调度系统

中图分类号: TP242.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2020)03-19-06

The Analysis of Current Development and Key Technology of Automated Guided Vehicle

LIU Shaochun

(Beijing Specialized Machinery Institute, Beijing 100143, China)

Abstract: Automatic Guided Vehicle (AGV) is an automatic system that integrates mechanical engineering, electric engineering and information technology. This article aims to analyse the current status of AGV technologies and several critical technologies. Meanwhile, the future technical potentials and trends are prospected in this article. Firstly, the article introduces development history of AGV and analyzes the important role that AGV plays during COVID-19 period in 2020. Secondly, popular national and abroad AGV suppliers and their main AGV technologies are compared. In addition, the 3rd section analyzes critical AGV technical components, including AGV technologies of driving, navigation, trajectory and dispatch. In the end, this paper forecasts future development trends and directions of AGV. As the policy of “Made in China 2025” is being implemented, AGV technologies are developed more mature. AGV system has a very promising and potential market. More and more application scenarios in the automation field of logistics and production have been recognized. The application of AGV in different industries will increase production efficiency. Together with other related technologies, it will bring industrial revolution.

Key words: Automated Guided Vehicle; Wheel Drive; Navigation and Location; Trajectory Planning; Dispatching System

1 引言

2020 年新春伊始, 新冠病毒肺炎肆虐全国。为了抗击疫情, 绝大多数行业停工、停产。在这种特殊形势下, 各种不同功能的机器人成为了疫情防控

的一支重要力量。消毒机器人能够根据设定好的消毒需求、消毒模式, 自主沿规划路径消毒。消毒机器人可连续工作, 消毒效率高, 减少了医护人员交叉感染的几率; 餐饮服务机器人在完成地图绘制、路线规划后, 自主导航为方舱医院内的轻症患者

者们配送药品、餐品,回收垃圾,减轻了医护人员的工作负担^[1]。物流机器人、测温机器人、巡逻机器人等也在相关领域发挥了重要作用。这些机器人都属于自动导引运输车(Automatic Guided Vehicle, AGV)的范畴。

AGV是一种由电池提供动力,根据电磁或光学等导引装置自动判断行驶路径,具有安全保护及各种运载功能的运输车辆。由于其具备可定位、运动灵活、工作效率高、安全性好等优点,已经广泛应用于航天、航空、高铁、汽车、港口、医药、服务业等各个领域,成为柔性生产线、智能化工厂、仓储物流自动化系统的重要组成。

第一辆AGV诞生于1953年,由一辆牵引式拖拉机改造而成。它带有车兜,负责在一间杂货仓库中沿空中布置的导线运输货物。1973年,沃尔沃汽车位于瑞典卡尔马市的装配厂,用计算机控制的装配型AGV替代了传统的传送带式的装配线。20世纪70年代中期,首辆负载AGV研发成功并投入使用。由于负载AGV能够为物料处理领域提供多功能的服务,被广泛应用于各种工、商业领域,使得AGV产业得到了一次较大幅度的发展。20世纪80年代,激光和惯导的无线导引技术引入了AGV领域,大大提高了AGV系统的灵活性和准确性。目前,由于计算机技术、互联网技术、导航技术、人工智能技术的不断发展,用于智能物流行业的AGV产业迎来了新的发展机遇。AGV单机系统功能强化、多AGV系统的物流调度、复杂任务的多AGV系统协作技术成为了新的研究方向。



图1 AGV的典型应用

Fig. 1 Typical applications of AGV

2 国内外AGV的发展现状

AGV技术经过60多年的发展,目前技术方向主要分为两大类。

一类是以欧美为代表的全自动AGV技术,这类技术追求AGV产品的高效自动化,几乎完全不需要人工的干预。其路径规划和生产流程复杂多变,能够运用在几乎所有的搬运场合。这些AGV功能完善,技术先进。为了能够采用模块化设计,降低设计成本,提高批量生产的标准,欧美的AGV放弃了对外观造型的追求,采用大部件组装的形式进行生产。相应系列产品覆盖面广,功能齐全,系列产品的载重量可从50kg到60000kg不等。国外知名的AGV厂商有KUKA、Egemin、Atab、Axter、Omniroll等。

第二类是以日本为代表的简易型AGV(AGC)技术。该技术着力于简单的应用,让用户在最短的时间内收回投资成本。该产品只用于简单的生产场合,进行简单的重复性搬运工作,导引采用简易的电磁导引方式。通过简化功能,大大降低了AGC的制造成本,从而使其获得大范围的应用。

国外AGV领域研究开始较早,但研究进展缓慢,主要集中于仓储物流及自动化领域。网上购物商城巨头亚马逊公司,作为最早使用AGV的电商企业之一,其研发的物流机器人kiva已经大量应用于其商品仓库;国际知名物流巨头DHL公司,也已经在全球范围内部署了各类型的AGV机器人;在电动汽车领域,大众汽车集团为了解决充电设施短缺日益严重的问题研发了一款可移动的充电AGV。在停车场内,该AGV能够自动导航至需要充电的车辆附近,与车辆进行身份确认后,充电枪自动连接车辆,为车辆充电。该AGV能够有效缓解停车场充电设施的不足给电动汽车出行带来的不便,目前该AGV还在研发中。

我国AGV技术起步较晚。20世纪70年代后期,北京起重运输机械研究所研制了第一台三轮式AGV。80年代后期,北京机械工业自动化研究所为二汽研制了应用在立体化仓库中的AGV。90年代,清华大学国家CIMS工程中心成功将国外引进的AGV应用于CIMS试验。后经引进和试验研发,1992年我国第一次将国产AGV应用在柔性生产



图2 国外部分AGV产品图
Fig. 2 Foreign AGV products

线上。目前,国内具备自主研发AGV的企业有北京特种机械研究所、沈阳新松、云南昆船、松科等企业。根据中国移动机器人产业联盟、新战略机器人产业研究所数据统计,2019年度,中国移动机器人市场规模达到61.75亿元,较之于2018年增长幅度为45.2%^[2]。由此可见,国内AGV产业目前发展十分迅速。

目前,国内5G、物联网、人工智能、大数据等高新技术发展迅速,这些技术与AGV技术相结合,使AGV产品性能进一步提升。旷世科技作为国内人工智能领域行业的佼佼者,2018年全资收购了艾瑞思机器人,主要研发用于物流仓储、智能工厂等行业的AGV机器人。得益于旷世科技公司强大的深度学习及智能调度算法,艾瑞思的物流AGV生产



图3 国内部分AGV产品图
Fig. 3 National AGV products

效率和人工协作效率进一步提高。此外,新电商零售的思路与AGV技术相结合,也催生出了一系列AGV应用的新领域。目前京东、美团、阿里等互联网企业研发的AGV在新零售、无人配送领域处于领先地位。

3 AGV系统的关键技术

3.1 轮组驱动技术

轮组作为AGV的唯一移动机构,其重要性不言而喻。目前AGV的轮组形式主要有:麦克纳姆轮、差速轮、舵轮、普通轮等。根据不同轮组的运动形式,其驱动形式也不尽相同。大多数厂商采用电机+减速机作为轮组的驱动部件。目前大多AGV采用定制形式,结构尺寸受限。因此,开发小体积、大扭矩、集成度高的驱动部件将有利于AGV体积小、大型化。此外,大多数AGV为多轮组驱动,驱动部件的多轴协同控制、运动异常处理等也是影响AGV轮组运动性能的关键因素。



图4 不同的轮组形式
Fig. 4 Different wheels styles

3.2 定位导航技术

曾经,国外专家对AGV系统工作的核心做出了恰当的比喻,即:在哪里,要去哪,如何去。这三个问题对应了AGV系统的三个关键技术:自动导航、路径规划和导航控制。AGV的导航技术根据选择传感器的不同,可以分为:电磁、激光、视觉、惯导、GPS等不同形式。

电磁导航是最早应用于AGV的导航方式。该方式原理简单,技术成熟,直到目前仍然有很多AGV生产厂家采用这种导航方式。电磁导航通过

在AGV行驶路径上铺设金属线,利用其电磁特性来实现导航。其原理简单,制造成本低,可靠性高,控制方便。主要缺点在于AGV路径改变相对困难,地面施工成本高,大大降低了系统的柔性。

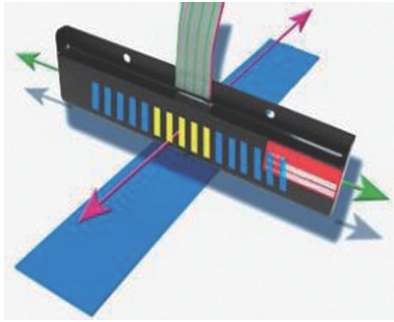


图5 电磁导航

Fig. 5 Electromagnetic navigation

激光导航主要分为两种形式。一种是在AGV行驶路径周围安装位置精确的激光反射板,AGV通过激光扫描器时发射激光束,同时采集由反射板反射的激光束,确定当前AGV的位置和航向。另一种是基于同步定位于地图创建技术的无反射板的激光导航。激光导航定位精确,行驶路径灵活多变,地面无需其他定位设备,已经成为目前多数AGV生产厂家优先采用的导航方案。但是,其制造成本高,对工作环境要求相对苛刻,周围环境干扰较大也成为制约其大规模使用的因素。

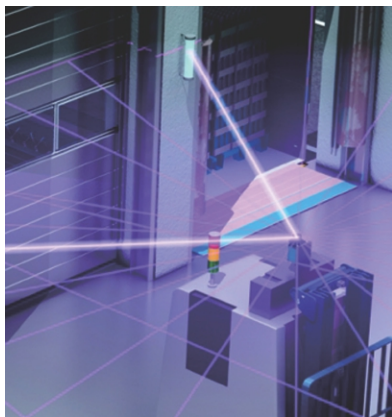


图6 激光导航

Fig. 6 Laser navigation

视觉导航方式根据建立的环境模型又可以分为2D视觉导航和3D视觉导航。2D视觉导航是在AGV行驶路径上铺设区别于地面颜色、灰度的色带

或者二维码,AGV通过视觉传感器采集图像信息,利用图像处理技术识别色带进行导航。该导航方式灵活性好,路径更改容易,色带铺设简单,但对光照及地面清洁度要求较高。3D视觉导航是通过立体视觉技术建立环境的3D地图,通过路径学习实现自主导航。该项技术复杂性较高,开发难度大,定位精度低,目前使用较少。



图7 2D视觉导航

Fig. 7 2D Visual navigation

惯性导航是在AGV上安装陀螺仪,在其行驶的路径上安装定位块,AGV通过对陀螺仪偏差信号的计算及地面定位块信号的采集来确定自身的位置和方向。惯性导航AGV通过与已知的地图路线进行比较来控制AGV的运动方向,实现自主导航。惯性导航方式定位准确,灵活性强,组合和兼容性好,使用领域广。缺点是陀螺仪对震动较为敏感,地面条件对AGV运行的可靠性影响较大,后期维护成本高,且需要矫正定位。



图8 惯性导航

Fig. 8 Inertial navigation

AGV不同导航方式的特点如表1所示。

表1 AGV不同导航技术的特点
Table 1 Characteristics of different AGV navigations

导航方式	适用环境	路径 柔性	导航 精度	技术 难度	适用 成本
电磁导航	地面平整	差	低	低	低
激光导航	条件较高	好	高	一般	高
2D视觉导航	地面清洁	较好	高	一般	一般
3D视觉导航	室内光线好	好	低	一般	一般
惯性导航	地面平整	较好	低	一般	高

AGV的导航控制,是根据当前AGV导航所得到的位置信息,按照路径规划中规定的目标位置来控制AGV的速度和航向角。在复杂的环境因素中如何达到对AGV的精确控制,是AGV导航技术的关键。在实际的控制环节中,往往采用“追踪导引法”,即在AGV行驶路径的前方设置一个虚拟目标点,这个点始终在AGV当前位置前方的不远处。将该点作为目标点能够满足对AGV行驶的控制要求但又不会丢失路径信息。通过周期性调节,逐渐消除AGV与目标点的位置误差,从而达到精确控制的目的。

3.3 轨迹规划技术

AGV系统的路径规划的应用场景主要包括静态环境和动态环境两类。静态环境下的路径规划,主要研究在环境信息相对确定的环境中,AGV如何行驶来避让环境中的静态障碍物。静态环境下的路径规划的衡量指标主要是轨迹的连续性和平滑性。规划的路径越平滑,AGV控制越容易实现。目前绝大多数的AGV的路径规划是静态规划。动态环境下的路径规划是指在具有诸多不确定环境因素的情况下的路径规划。不确定的环境因素主要来源有厂房内移动的工人、执行其他运输任务的AGV或车辆等,动态环境中的路径规划需要综合考虑安全性和时间性。AGV能够对当前行驶路径上的危险因素进行分析,及时停止或修改运动路线。在保证安全的同时,确保能够按时完成指定的运送任务。应用路径动态规划的典型AGV就是家庭扫地机器人。

3.4 调度技术

调度系统是上位机控制系统中用于AGV车辆管理、任务调度及交通情况管理的控制软件。目前

在物流系统或自动化生产线上,往往同时有十几台甚至数十台AGV同时运行,调度系统的复杂度随着AGV数量的增加呈指数型增长。因此,调度系统必须能够掌握海量的生产信息,并且根据生产情况高效、灵活、准确地为每台AGV分配任务。同时,调度系统还要具有极高的容错能力。如果生产线的某一环节出现问题,调度系统能够及时修改当前的方案,重新为AGV的生产任务寻找最优解。目前随着人工智能及深度学习技术的不断发展,调度系统的功能日益强大。但在数量更多的AGV的使用场景下,调度技术仍需要进一步发展。

4 AGV的发展趋势

当前,我国正处于产业转型升级的关键时期。为了实现由制造业大国向强国的转变,提升我国产业核心竞争力,必须大力培育和发展高端装备制造业。随着工业化和信息化的深度融合,生产制造过程中自动化和智能化的水平越来越高,整个生产过程必然离不开智能化物流设备。AGV主要有以下几个发展趋势:

(1) 性能不断提升。主要体现在高速度、高精度、高可靠性、方便操作及维修方面。成本进一步降低,促进AGV的大范围使用。

(2) 环境适应性更强。目前AGV的使用往往只局限于一种场景下,绝大多数是室内环境。随着相关传感器技术和防护技术的不断发展,单台AGV能够在室内、室外环境使用,也能够白天、黑夜环境下使用,还能够在雨天、雪天等恶劣环境下使用。AGV逐渐发展成为一种全天候的设备。

(3) 智能化水平越来越高。随着大数据、深度学习、人工智能等技术的不断发展,AGV能够对现场环境、突发情况等智能感知,并做出正确判断。AGV作为终端设备,已具备一定的智能化水平,而不是简单的听从调度系统的指挥。

(4) 与工业机器人技术结合。目前工业机器人在应用时,往往固定在某一位置完成工作。而AGV目前的应用大多是负责货物的搬运。将两者结合,就相当于机器人既有了脚又有了手。机器人既能够在空间内通过工业机器人来完成终端操作,又能够通过AGV的移动来灵活地变换工位。除此以外,AGV和工业机器人的协调运动可以完成更为

复杂的运动,大大提高了AGV的适应性和功能性。

在我国制造业转型升级的过程中,工业自动化的需求多种多样。未来企业对AGV的需求也不仅仅局限于简单的搬运或替代人力,而是服务于整个工艺装备系统,提升产品的质量。因此,AGV技术在未来的工业系统中定会占据更为重要的地位。

5 结束语

AGV做为物流技术领域重要的自动化设备,具备智能、灵活、柔性、高效率、可取代人工、作业安全等特点。目前,AGV产品已广泛应用于各个领域。不过,AGV技术在不断发展的同时,也面临着成本高、同质化严重、行业标准不统一等一系列问题。

随着国内上游元器件厂商相关产品的性能不断提升,传感器技术和导航、调度技术的不断发展,AGV产品的性能会越来越高,AGV的制造成本会进一步下降,有利于AGV的大范围应用。此外,AGV产品的相关技术标准即将颁布,这将有利于AGV产品质量评判标准的进一步规范。伴随着智能制造改革的不断深入,AGV技术将迎来高速发展,进一步促进行业发展和变革。

参考文献

- [1] 物流搬运机器人编辑部. 近千台机器人驰援武汉抗疫[J]. 物流搬运机器人, 2020, 3: 87-91.
- [2] 新战略机器人研究所. 2019年中国移动机器人(AGV)市场数据[P/OL]. 2019[2020]. <http://www.xzrobot.com>.
- [3] 周晓杰. AGV系统及引导方式发展趋势综述[J]. 南方农机,

2017, 48(4): 80.

- [4] 金亚萍. AGV:物流新经济中的机器力量——AGV引爆物流智能化革命[J]. 机器人产业, 2017, (2): 34-43.
- [5] 张辰贝西, 黄志球. 自动导航车(AGV)发展综述[J]. 中国制造业信息化: 学术版, 2010, (1): 53-59.
- [6] 胡克维. 自动导引小车AGV的导航和避障技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [7] 王一治, 常德功. Mecanum四轮全方位系统的运动性能分析及结构形式优选[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 307-310+316.
- [8] 张星. 基于麦克纳姆轮的全向AGV运动控制技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [9] 雷定猷, 张兰. AGV系统的调度优化模型[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(1): 66-69, 79.
- [10] 杨敏, 吴振彪, 陈冬珍, 等. 基于AGV柔性物流系统调度策略的实现[J]. 湖北工学院学报, 2001, (01): 52-55.
- [11] 张雷, 刘国栋, 曲道奎. 多AGV调度系统中的两阶段动态路径规划[J]. 机器人, 2005, 27(3): 210-214.
- [12] 梁建刚. AGV系统路径规划与调度算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [13] 赵博. 基于视觉导航的自动导引车设计与实现[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [14] 徐叶帆. 基于机器视觉的AGV定位方法研究[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(08): 6-8.
- [15] 任云星, 马世杰. AGV+工业机器人在精密搬运中的应用[J]. 山西电子技术, 2016, (3): 51-52.

作者简介:



刘劭纯(1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为AGV系统的开发与应用。

[引用格式] 朱小伶. 人工智能技术在智能医疗领域的应用综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(3): 25-31.

人工智能技术在智能医疗领域的应用综述

朱小伶

(社会安全风险感知与防控大数据应用国家工程实验室, 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041)

摘要: 人工智能技术在医疗领域的应用有着很长的研发历史, 医疗领域长期存在的一些弊病和痛点, 也促使很多人工智能科研团队在不断深入探索。在此次抗击新冠肺炎疫情过程中, 人工智能发挥了巨大的作用, 也使我们进一步认识到了人工智能技术对智能医疗不可或缺的作用。对近期人工智能技术在智能医疗领域的相关应用成果进行了综合评述, 并对未来发展趋势进行了展望。首先, 结合人工智能技术对抗击新冠肺炎疫情的赋能, 从医生、病患、医疗信息系统三个角度介绍当前人工智能技术对医疗领域的影响, 并聚焦基于深度学习模型的人工智能技术在医疗领域的应用; 随后, 从新药研发、诊疗预测、医养机器人、知识推理四个角度概述医疗领域与人工智能技术深度融合的发展趋势; 最后, 从算法过拟合、不平等性明显、可解释性差、隐私保护、缺乏可靠验证等五个角度讨论人工智能技术在医疗领域应用所面临的挑战。

关键词: 人工智能; 智能医疗; 新冠肺炎疫情; 深度学习; 新药研发; 诊疗预测

中图分类号: TN915.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2020)03-25-07

A Survey on Application of Artificial Intelligence for Intelligent Healthcare

ZHU Xiaoling

(National Engineering Laboratory for Risk Perception and Prevention,
China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: The application of Artificial Intelligence (AI) technology in the healthcare field has a long history of research and development. There are some disadvantages in the healthcare field for a long time, which lead to in-depth exploration from many AI research teams. When combating Covid-19, AI technology has played an important role. It also makes us realize the indispensable role of AI technology in intelligent healthcare. This paper reviews the recent application achievements of AI technology in the field of intelligent healthcare, and looks forward to the future development trend. First of all, combining with its efficiency in the process of combating Covid-19, this paper summarizes the influence of AI technology on the healthcare field from the perspectives of doctors, patients and healthcare information systems, especially the application of AI based on the deep learning model. Then, this paper summarizes the development trend of the deep integration of healthcare field and AI technology, from the perspectives of new-drug development, diagnosis and prediction, healthcare robot, knowledge reasoning. Finally, the problems faced by AI in healthcare field about algorithm over-fitting, obvious inequality, poor interpretability, privacy protection, lack of reliable verification, are discussed.

Key words: Artificial Intelligence; Intelligent Healthcare; Covid-19; Deep Learning; New-Drug Development; Diagnosis and Prediction

收稿日期: 2020-03-06; 修回日期: 2020-04-28

基金项目: 国家科技重大专项重大新药创制项目(2018ZX09201-014); 国家自然科学基金联合基金项目(U19B2026); 首都卫生发展科研专项项目(2018-1-2121); 中国电科新一代人工智能专项行动计划项目(AI20191125008); 全国一体化国家大数据中心先导工程(17111001, 17111002, 20500908); 中国电科装备预研联合基金项目(6141B08010102)

1 引言

医疗人工智能等新技术的采用,正成为当前新冠疫情防控的有力武器。由于算力的提升和数据的增长,人工智能技术在过去几年中得到了巨大发展,其中机器智能与自主处理数据能力(包括图像处理、自然语言处理和语音处理等)获得显著进步。医疗行业因拥有巨体量数据并以年均近50%的速度增长,医疗设备和数据记录管理系统也在不断增多,因此,从人工智能技术中受益尤多。长久以来,医疗领域长期存在的一些弊病和痛点,促使很多科研团队和科技巨头不断深入探索,期望通过人工智能技术为这些问题带来根本性的解决方案。2019年2月,美国斯克里普斯研究所(Scripps Research)在《自然》杂志子刊《自然医学》上发表文章,认为医学领域人工智能的发展目标是人类智能与机器智能的结合^[1];据2019年12月发布的《斯坦福大学2019全球人工智能报告》测算,人工智能医疗在过去一年中获得全球投资47亿美元,成为全球获得投资第二多的领域。

在新型冠状病毒肺炎疫情爆发的2020年春天,人工智能技术为疫情防控提供了有力的技术支撑,不仅助力疫病智能诊治,而且降低医护人员感染风险并有效提高管控工作效率。工业和信息化部于2020年2月4日发布了《充分发挥人工智能赋能效用协力抗击新型冠状病毒感染的肺炎疫情》倡议书,旨在充分发挥人工智能技术的价值和作用,同时更好地防控新型冠状病毒感染的肺炎疫情。此次新冠肺炎疫情的挑战,加速了人工智能场景应用案例的突破,再次验证了人工智能技术已经对当前医疗领域产生了深刻影响;未来,人工智能技术在医疗行业的普及与深度融合进程必将进一步提速。

2 当前人工智能技术对医疗领域的影响

人工智能技术在医疗领域的应用有着很长的历史,提供了从大量医疗样本中自动提取统计特征、基于规则驱动和数据驱动的分析研判等能力^[2-3]。早期,以专家系统为代表,通过构建机器学习系统所需要的领域专业知识和通过人类工程设计特征,将输入的原始数据转换成学习算法,从而实现针对特种疾病模式识别的合适表征;现今,

基于深度学习的人工智能技术成为主流,输入原始数据后可以“自学习”得到模式识别所需的多层次表征,这些层次包含大量非线性运算并按顺序排列,实现处理结果的逐层传递(一个层次的表征输出传递到下一个层次作为输入),最终转换生成更加抽象的表征。此外,深度学习算法能够灵活地接受异构数据形式输入,贴合医疗数据特性,因此成为当前医疗人工智能技术点的主流方法。当前,人工智能技术在医疗领域的影响可以从人工智能技术对临床医生的影响、人工智能技术对病患的影响、人工智能技术对医疗信息系统的影响这三个维度考虑^[4]。

2.1 对临床医生的影响

人工智能技术对临床医生在执行疾病研判和医疗方案生成过程中的辅助决策作用,突出体现在对医疗影像(如医疗扫描结果、视网膜图像、内窥镜成像、面部/体貌特征表等)的准确快速解读与研判方面,其次体现在面向文本(如电子病历和医疗知识图谱等)的医疗知识管理与推理方面,这一现象符合深度学习技术在视频图像处理领域和文本处理领域中不同成熟度的客观规律^[5]。例如,在抗击疫情的关键时期,多种新冠肺炎人工智能影像分析系统为一线赋能,辅助医生开展快速筛查诊治,尤其能够弥补基层医院相关疾病诊断经验不足、耗时长等问题,提升医院诊断准确率及效率。

2.2 对病患的影响

通过智能可穿戴设备(如生物传感器等)、智能手机应用以及远程即时医养模式,病患能够及时感知自身多模态健康状况并与医生实现互动(如远程病例分析等),进而提高健康管理水平以及健康状况异常情况下的应激弹性,让患者将自身的医疗保障管理主动权“掌握在自己手中”。例如通过智能手机采集病患日常手机使用行为以量化和预测抑郁症状。2020年2月,“新冠肺炎人工智能自测机器人”在学习强国平台上线,当用户出现相关不适症状、陷入“不就医怕耽搁病情、出门就医又担忧交叉感染”的两难处境时,可以使用该项人工智能技术进行初步自测。

2.3 对医疗信息系统的影响

这里所指的医疗信息系统既包括传统医院出/就诊管理信息系统、病患信息管理系统、药物管理系统、

医用物资管理系统等,也包括新近研发的基于人工智能技术的智能电子病历系统以及智能移动终端APP等。一方面通过改善 workflow 提升了工作速率,另一方面通过这些系统内嵌的统计分析与自动归类功能模块,可以及时提供不易观察到的规律性信息,很大程度上降低了发生医学错误的几率。

3 基于深度学习模型的人工智能技术分析

依托算力增强和数据增长,深度学习模型可通过分布式专用硬件资源弹性地扩展至巨体量数据资源并实现改进,同时可以引入迁移策略便捷地提高在更多类型或者领域数据上的效能,因此深度学习模型在很多情况下已逐渐替代传统机器学习方法,成为人工智能技术落地医疗领域的主要方法;另一方面,深度学习模型能够灵活地编码异构数据,迎合医疗数据异构性较强的特性。

2019年1月,美国FDNA公司利用17000多张患者的面部图像训练了一套深度学习算法,能够以较高的准确率识别罕见的遗传综合症。该研究的原理在于,各种遗传综合征会表现出独特的面部特征,这些面部特征可以帮助临床医生进行诊断。该成果发表于《自然》期刊^[6]。

2019年5月,美国谷歌公司发布一项基于深度学习方法的模型,利用病患当前和历史的CT影像来预测肺癌风险。实验证明该模型在6716个美国国家肺癌筛查试验病例上取得了当前最佳的效果,特别是在无法获取CT影像历史数据的情况下,该模型效果优于人类放射科医生的诊断。该模型能够对肺癌恶性肿瘤进行整体预测,而且能够识别出肺部不易被察觉的恶性组织;同时,鉴于肺部恶性组织增长速度的历史数据有助于预测恶性肿瘤,因此该模型有效地将历史扫描结果融入模型之中,帮助预测肺癌风险。该成果发表于《自然医学》期刊,有效解决了肺癌“致死率高且大部分发现即晚期”的医学痛点^[7],展示了人工智能技术在提升肺癌筛查准确率和一致性方面的巨大潜力,有助于加速肺癌筛查在全球范围内的推广。

2019年8月,美国DeepMind公司通过与美国退伍军人事务部合作,发布一种基于循环神经网络的新型人工智能算法,能够在急性肾损伤发生病变前48小时完成预测,探索了算法和智能医疗助手

的结合,有助于从反应型医养模式向预防型医养模式的转变。该成果发表于《自然》期刊,证明了人工智能算法有助于提升病人的医护水平和减少医疗开支^[8]。

2019年9月,美国麻省理工学院的研究人员研发出一套预测声带疾病特征的系统。该系统建立在100余个医疗科目数据集基础之上,它使用从这些数据中自动提取到的特征,再通过高精度训练实现对具有和不具有声带结节患者的分类。该研究充分利用可穿戴设备兴起所带来的数据优势,数据集中每个科目都有约一周的语音监测数据和数十亿个样本,而这些数据是从安装在受试者颈部的小型加速计和传感器中捕获到的相应信号,进而克服了传统依托特征工程方法挖掘致病特征的众多弊端。该研究旨在通过人工智能在医学方面的应用替代一些人工投入过高的步骤,从而实现改善医疗决策的目的。

总体而言,应用于智能医疗的人工智能技术中,比较有代表性的技术主要包括以下四类。

3.1 图像分析

深度学习的最大成就体现在计算机视觉研究领域。相应地,医疗图像分析技术成为人工智能技术在当前医疗领域最鲜亮的名片,相关技术擅长处理具备空间不变性数据的卷积神经网络模型。依托图像视频分析与解析技术,处理目标分类、目标检测和目标分割等任务,在研判病人CT成像中是否包含恶性肿瘤等疾病时非常有效,此类基于计算机视觉的图像分类和目标检测应用在皮肤科、放射科、病理科的复杂诊断中效用显著^[9]。例如,根据国家卫健委公布的新冠肺炎诊疗方案第五版,临床诊断无需依赖核酸检测结果,CT影像临床诊断结果可作为新冠肺炎病例判断的标准,中国达摩院最新人工智能算法诊断技术可在20秒内对新冠疑似案例CT影像做出判读,如图1所示,分析结果准确率达到96%,并于2020年2月在河南郑州小汤山医院成功应用。

3.2 自然语言处理

计算机视觉对应类人智能的“感知层面”,而自然语言处理对应类人智能的“认知层面”,旨在通过分析文本和语音来推断和理解语义,相关技术以擅长处理(时间)序列数据的循环神经网络为核心。

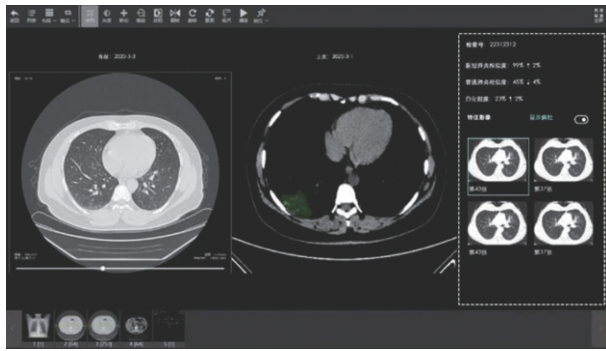


图1 基于图像分析技术的CT影像分析
Fig. 1 CT image analysis based on image analysis

因此,自然语言处理技术受制于其本身的理论难度,在医疗领域落地时间较晚,但是现在已经在卫生健康相关舆情分析与预警、电子健康档案数据关联分析、医疗知识图谱构建演进与推理分析、基于语音识别和信息抽取的临床语音助手等应用场景下展现出良好的辅助决策价值^[10]。例如,加拿大“蓝点”健康监测平台使用自然语言处理和机器学习等技术来筛选65种语言的新闻报道,以及航空公司数据和动物疾病暴发的报道,在新冠肺炎疫情暴发之初发挥了重要监测功能,早在2019年12月31日,公司就向其客户发出了疫情警告,避开武汉等危险区域。2020年3月,美国政府联合艾伦人工智能研究所、微软研究院、国立卫生研究院等机构共同发布了有关新冠肺炎的学术文献的开放研究数据集CORD-19,如图2所示,并呼吁世界各地的人工智能专家采取行动,开发新的文本和数据挖掘技术,以帮助科学界回答与新冠肺炎相关的高优先级科学问题。

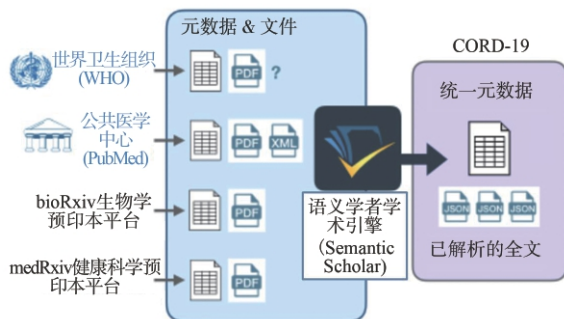


图2 面向新冠肺炎研究的开放研究数据集CORD-19
Fig. 2 CORD-19: Open research dataset for Covid-19 research

3.3 脑机接口

当前,神经网络已经成为描述人工智能技术的首要关键词。事实上,人工智能技术确实正在帮助人类理解自身大脑的网格细胞和回路结构。当前热门的神经拟态计算不仅能实现更高效的计算,例如依托对大脑逆向工程来研发类脑人工智能芯片,还能帮助研究者理解大脑回路并构建脑机接口。例如,脑机接口领域的侵入性神经技术能够精确、高质量地连接到特定的神经元或神经元组,已用于脑损伤等疾病患者,如图3所示。根据生物工程、神经科学、合成生物学和纳米技术等领域的最新进展,实现高分辨率的下一代非侵入性神经接口技术已成为研发趋势^[11]。2020年5月,美国脑机接口公司Neuralink宣布将在一年内完成首次人类大脑植入,理论上可以修复任何大脑问题,包括提升视力、恢复肢体功能、治疗老年痴呆症等。



图3 利用脑机接口技术恢复肢体功能
Fig. 3 Using brain-computer interface technology to restore limb function

3.4 强化学习

强化学习技术通常由特定任务目标驱动,旨在训练计算智能体与环境互动,其中的自主智能体能够通过试错或专家演示来实现“自学习”,一旦智能体开始在所设定的环境和规则约束下采取行动,奖励和惩罚的迭代反馈循环会训练智能体更好地完成目标。强化学习技术在医疗领域的应用主要集中在机器人辅助手术(医生以遥控方式指导机器人操纵器械),通过使用计算机视觉模型来观察手术环境、使用强化学习方法学习外科医生的动作,深度学习技术能够显著提升机器人辅助手术的稳健

性和适应性。近期,强化学习技术也被应用于新药研发与疫苗研制等工作,例如,2020年2月,美国人工智能新药研发公司 Insilico Medicine 公布了其强化学习技术和生成对抗网络技术联合驱动的人工智能算法所设计的6种可以阻止新冠病毒复制的新分子结构。

4 医疗与人工智能深度融合的发展趋势

从此次抗击新冠疫情的经验中不难总结发现,医疗与人工智能深度融合的潮流已经势不可挡,多项人工智能技术无论在抗疫一线还是在疫苗研发的大后方都发挥着不可忽视的作用。人工智能理论奠基人特伦斯·谢诺夫斯基在其2019年新书《深度学习:智能时代的核心驱动力量》中预测:“基于大数据的深度学习将改变医疗行业,对疾病提供更快速准确的诊断与治疗,甚至未来癌症将变得不再可怕。”基于人工智能技术理论研究进展及医疗模式变化趋势,总结人工智能技术在医疗领域的研发与应用方向,如下所述。

4.1 新药研发

根据 Global Market Insight 的数据报告,全球人工智能医疗市场中药物研发细分领域占据份额最大,约为35%。2020年2月,《麻省理工学院技术评论》发布的2020年“全球十大突破性技术”中,面向新药研发的人工智能筛选分子入选。人工智能技术将会缩短新药研发周期、降低新药成本并且提高新药的研发成功率。人工智能在新药发现中的作用,主要体现在对海量生物学文献的复杂搜索、对数百万分子结构的数据挖掘与关联分析、设计和模拟制作新的分子、预测脱靶效应/毒性和药物合适剂量以及进行大规模的细胞检测分析等^[12-13]。例如,依托数百万患者的大数据信息资源,人工智能技术可以快速、准确地挖掘和筛选出适合的药物;将正常细胞和肿瘤细胞进行模型实例化,并通过遍历所有可能的药物来锁定能杀死癌细胞又不伤害正常细胞的药物;通过计算机模拟对药物活性、安全性、副作用等多方面进行预测和评估,找出与疾病匹配的最佳药物。本次工信部发布的《倡议书》中特别强调优化人工智能算法和算力,助力病毒基因测序、疫苗/药物研发、蛋白筛选等药物研发攻关。2020年1月,中国科学院上海药物研究所和

上海科技大学联合研究团队综合利用人工智能技术驱动的虚拟筛选和酶学测试相结合的策略,发现了一批可能对新冠肺炎有治疗作用的药物,其中包括洛匹那韦和瑞德西韦。

4.2 诊疗预测

在预测分析领域,人工智能技术的出现能够有效帮助临床医生诊断和治疗,甚至提升患者对于治愈的希望,因为人工智能技术能够对患者的健康轨迹进行学习建模,进而产生超出医生个体体验及经验的信息。此外,通过大数据和深度挖掘等技术,对病人的医疗数据进行分析 and 挖掘,可以自动识别病人的临床变量和指标。通过机器学习模型,在自我学习过程中能够归纳患者的数据特征,帮助医护人员进行新冠治疗,进而设计更安全的化疗方案,上述过程已经在当前抗击新冠疫情的过程中得到广泛应用。例如,2020年4月,中国澳门科技大学牵头的联合科研团队发布一项名为“面向新冠肺炎的全诊疗流程的智慧筛查、诊断与预测系统”的人工智能工具^[14],可以根据胸部的CT影像、病历等临床资料数据,对大量疑似病例进行快速筛查、辅助诊断预测和住院临床分级预警,实现对新冠病人的全生命周期管理,相关成果发表在《细胞》期刊。

4.3 医养机器人

现阶段,机器人在医疗领域中的研究与应用主要集中在外科手术机器人、康复机器人、护理机器人和服务机器人等方面,能够以智能假肢、外骨骼和辅助设备等方式实现受损躯体部位修复,以智能助理(例如美国 DeepMind 公司的 Stream 系统)等方式辅助医护人员工作,以人机对话方式提供医疗咨询和病情评估,以智能可穿戴监控设备方式感知病患(及独居老人)的异常行为等,取得了较为广泛的应用和良好的市场产业化效果,成为新的创业和投资热点^[15]。医养机器人的发展势头强劲,加上此次疫情催生的市场需求,将迎来发展黄金时期,医养机器人较大的发展空间在于对复杂场景的智能判断和适应能力,向从辅助到替代医务人员医疗诊断的转变不断迈进,从而能够缓解医疗资源分配不均匀的现状。此外,结合新冠病毒特点,无接触配送机器人正在替代人工提供全自主、免接触式的物资配送,最大程度地将病人“隔离”,有效减少人员交叉感染。

4.4 知识推理

计算机通过从大量医疗文献、病例报告等数据资源中“学习”和汲取相关的专业知识,形成医疗知识图谱,能够实现模拟医生的思维和诊断推理,从而给出可靠的诊断和治疗方案,进一步拓展临床专业知识的可用性^[16]。例如,具备从历史数据中快速学习能力的IBM Watson机器人于2012年通过了美国执业医师资格考试,并部署在世界多家医院提供辅助诊疗的支撑服务。2020年3月,华为联合浙江大学发布最新的新冠科研开放知识图谱,满足研究人员迫切需要能够系统地梳理和整合新型冠状病毒的相关需求,促进对新冠病毒的机制研究和抗病毒药物研发的提速。

5 人工智能技术在医疗领域应用面临的挑战

随着人工智能技术在视频图像分析以及文本分析中的应用深化与成熟,随之而来的面向智能医疗的人工智能技术也不断涌现。虽然这些人工智能技术在一定程度上解决了以往医疗领域存在的顽疾和痛点,但是人工智能技术真正在医疗领域产生大规模、有价值的应用,还存在很大的障碍与挑战^[17-18]。

5.1 算法过拟合

人工智能算法性能有待提升。其中困扰其进一步发展的一个重要因素在于算法容易出现过拟合现象,从而导致覆盖率低,无法兼顾到各类情况和致病因素。以IBM公司的癌症预测人工智能算法为例,该技术虽然推广面很大,但是该算法本身是基于少量合成的、非真实案例所构建的,而且仅有非常少量的人类专家知识,因此在实际应用中被证明它所推演出的很多治疗参考建议都是不可取的,直接后果便是导致医疗事故与纠纷,引发大规模医源性风险。因此,医疗领域在使用人工智能技术前,需对系统功能和性能进行严格测试评估审查,并引入严格的监管和追责机制。

5.2 不平等性明显

目前主流人工智能技术都是基于有监督策略的机器学习和深度学习技术,需要依托大体量、高质量的标注数据资源。在某种程度上,训练数据的质量直接决定人工智能技术的性能和鲁棒性。

但是受限于隐私保护门槛、数据治理成本、数据标注成本等方面因素,现在用于训练智能医疗人工智能算法的数据难以实现对人类族群、肤色、年龄等要素特征的全覆盖,例如图像分析数据集对于人口较少的、缺乏代表性的族群覆盖率较低,直接导致相关算法和技术在该类族群上性能受限。

5.3 可解释性弱

可解释性是人工智能技术(特别是深度学习技术)发展到目前瓶颈期所面临的一个现实而又尖锐的问题,“知其然,不知其所以然”成为当前基于深度学习的人工智能技术难以回避的现实痛点^[19-20]。因此,可解释人工智能成为研究热点,美国国防高级研究计划局(DARPA)于2017年启动了可解释人工智能计划等。医疗领域人工智能技术面临着同样问题,表现在无法理解深度神经网络输出结果的决定性因素等多方面。

5.4 隐私保护

人工智能技术在智能医疗领域应用所面临的隐私与安全保护问题,表现在普遍存在的黑客攻击与数据泄露、恶意攻击算法造成大规模病患伤害(例如为糖尿病患者过量配备胰岛素)等诸多方面^[21]。2019年11月,美国谷歌公司在美国21个州秘密收集数百万份患者相关实验室结果、医生诊断书、住院记录与病历的夜莺计划被曝光,引起广泛关注。探索人工智能和大数据环境下全新的个人健康数据所有权模式、打造高度安全的数据治理与管理平台以及相关政府立法成为当务之急。探索确保数据隐私和安全先决条件下的医疗人工智能技术,是人工智能技术在未来医学领域应用必须解决的一个关键问题,否则人工智能技术在医疗领域的发展就会遭遇阻碍。

5.5 缺乏可靠验证

人工智能技术在医疗领域的应用刚刚起步。把病患的一部分生命管理权力交给机器掌控,本身就存在非常大的风险,因为医疗领域的人工智能技术不能有意外。虽然现在各大科研院所和科技巨头都在着力研发基于人工智能技术的智慧医疗解决方案,但是因为数据受限以及示范验证环境受限,真正经得起临床验证的却是凤毛麟角。

6 结束语

在此次抗击疫情过程中,人工智能发挥了巨大的作用,也使我们进一步认识到了人工智能技术对智慧医疗不可或缺的作用。人工智能技术将快速、准确和低成本地治理和处理大规模数据,机器将有能力实现人类无法看到或做到的事情。毫无疑问,这将成为未来基于数据驱动、基于人工智能加持的高性能医学的基础。由此次新冠肺炎疫情诊疗过程对人工智能技术的需求不难看出,辅助诊断、快速测试、智能化设备、精准测温与目标识别等均是未来人工智能赋能智慧医疗的优先发展方向。

对标汽车工程师协会在自动驾驶领域所定义的五个自动化层级,美国斯克里普斯研究所认为,医疗人工智能仅仅能够触摸第三级“有条件的自动化”的天花板,而无法突破第四级“仅在非常有限的条件下使用人类备份”和第五级“不存在人类医生作为后备可能性的完全自动化”。这也印证了医疗行业的特殊性:生命宝贵,目前除了风险较低的日常事务可以托付给机器外,其他事情还远无法信任机器。当然,挑战与机遇并存,以深度学习为核心的人工智能技术飞速发展,正在深刻变革着医疗行业,人工智能技术在医疗领域的应用与普及,意味着越来越多的人群能够得到更为普惠的医疗救助,包括更高效、更安全和更容易获取的诊断、更短的等待时间、更低的感染率等。

参考文献

- [1] Topol E J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence [J]. *Nat Med*, 2019, 25: 44-56.
- [2] Jiang F, Jiang Y, Zhi H, et al. Artificial intelligence in healthcare: past, present and future [J]. *Stroke & Vascular Neurology*, 2017, 2(4): 230-240.
- [3] Bruce I. Artificial intelligence and medical informatics [J]. *Informatics for Health & Social Care*, 1986, 3(2): 124-132.
- [4] Chen A F, Zoga A C, Vaccaro A R. Point/counterpoint: artificial intelligence in healthcare [J]. *Healthcare Transformation*, 2017, 2(2): 84-92.
- [5] Aguilar C S. Medical applications of artificial intelligence [J]. *Computing Reviews*, 2015, 56(1): 25-26.
- [6] Gurovich Y, Hanani Y, Bar O, et al. Identifying facial phenotypes of genetic disorders using deep learning [J]. *Nat Med*, 2019, 25: 60-64.
- [7] Ardila D, Kiraly A P, Bharadwaj S, et al. End-to-end lung cancer screening with three-dimensional deep learning on low-dose chest computed tomography [J]. *Nat Med*, 2019, 25(6): 954-961.
- [8] Tomašev N, Glorot X, Rae J W, et al. A clinically applicable approach to continuous prediction of future acute kidney injury [J]. *Nature*, 2019, 572: 116-119.
- [9] Chan Y K, Chen Y F, Paum T, et al. Artificial intelligence in medical applications [J]. *Journal of Healthcare Engineering*, 2018, 2018: 1-2.
- [10] 陈梁. 运用自然语言处理技术从中文电子化病历系统中提取临床有用信息[D]. 重庆: 重庆医科大学, 2019.
- [11] Schalk G, Mcfarland D J, Hinterberger T, et al. BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system [J]. *IEEE Transactions on Bio-medical Engineering*, 2004, 51(6): 1034-1043.
- [12] Fujiwara T, Kamada M, Okuno Y. Artificial intelligence in drug discovery [J]. *Cancer & Chemotherapy*, 2018, 45(4): 593-596.
- [13] May M. Adding artificial intelligence to drug discovery [J]. *Genetic Engineering & Biotechnology News*, 2019, 39(4): 26-29.
- [14] Zhang K, Liu X, et al. Clinically applicable AI system for accurate diagnosis, quantitative measurements and prognosis of COVID-19 pneumonia using computed tomograph [J]. *Cell*, 2019, 181(6): 1423-1433.
- [15] Natarajan N, Aparna S, Kumar J S J. Robot aided remote medical assistance system using lab-VIEW [J]. *International Journal of Computer Applications*, 2012, 38(2): 6-10.
- [16] Shi L, Li S, Yang X, et al. Semantic health knowledge graph: semantic integration of heterogeneous medical knowledge and services [J]. *Biomed Research International*, 2017, 2017: 1-12.
- [17] 孟晓宇, 王忠民, 景慎旗, 等. 医疗人工智能的发展与挑战 [J]. *中国数字医学*, 2019, 14(3): 15-17.
- [18] 董星宇, 陈敏. 医疗人工智能发展存在的问题及对策 [J]. *医学与社会*, 2019, 32(5): 80-82.
- [19] 陈群, 陈肇强, 侯博议, 等. 人工智能风险分析技术研究进展 [J]. *大数据*, 2020, 6(1): 47-59.
- [20] Ashrafian H, Darzi A, Athanasiou T. A novel modification of the turing test for artificial intelligence and robotics in healthcare [J]. *International Journal of Medical Robotics & Computer Assisted Surgery*, 2015, 11(1): 38-43.
- [21] 唐健. 人工智能应用与伦理 [J]. *人工智能*, 2019(4): 87-94.

作者简介:



朱小伶(1993-),女,硕士,工程师,主要研究方向为人工智能、大数据、社会风险防控等。

[引用格式] 孙大洋, 章荣炜, 李赞. 室内定位技术综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(3): 32-46.

室内定位技术综述

孙大洋, 章荣炜, 李 赞

(吉林大学通信工程学院, 长春 130012)

摘 要: 由于室内环境下消费级、企业级应用的需求推动, 基于室内位置的服务在信息系统中的重要性日渐凸显。室内定位技术作为基于位置服务的核心, 存在众多的可选方案。从室内定位算法、测量技术和融合定位技术三个方面对各种室内定位技术进行梳理, 并对距离测量、指纹定位、SLAM技术、惯性导航等多种适用于不同场景定位技术的基本原理进行综述; 从定位技术特点、定位需求的角度对各种定位技术进行了对比分析; 探讨了室内定位中的识别与分辨能力、定位系统容量、快速的定位系统部署能力等基于位置服务的问题, 继而讨论了目前室内定位技术推向应用实践所面临的挑战。

关键词: 室内定位; 基于位置的服务; 定位算法; 测量技术; 识别定位; 检测定位

中图分类号: TP39 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2020)03-32-15

Survey of Indoor Localization

SUN Dayang, ZHANG Rongwei, LI Zan

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, 130012)

Abstract: Due to the demands for consumer and enterprise applications in indoor environments, indoor location-based service has played an increasing critical role on the basic service of information system. Many solutions have been proposed in the area of indoor positioning technology as the core of location based services. This article surveys the indoor positioning systems from three aspects, i. e., measurement technology, localization algorithm, and fusion positioning technology. This paper summarize the principle of the positioning technology from distance, fingerprinting, SLAM technology, inertial navigation and so on. Moreover, this paper make a comparative analysis of various positioning technologies from the perspective of the characteristics and needs of positioning technology. This paper discusses the problems of location-based services in indoor positioning, such as recognition and discrimination ability, positioning capacity, and rapid deployment capability. Finally, this paper discuss the challenges faced by the applications of indoor positioning technology.

Key words: Indoor Localization; Location-based Services; Positioning Algorithm; Measurement Technique; Identification and Positioning; Detection and Positioning

1 引 言

基于位置服务(Location-based Services, LBS)的不断普及和发展,对室内定位的需求不断提高。位置服务同移动用户行为习惯相结合可催生新的消费级应用,位置服务同企业需求相结合,可催生提高生产效率的“行业+定位”企业级应用。统计数

据表明,现代人每天大约有80%的时间是在室内度过的,因此在消费级市场领域室内定位的用户需求还有很大的发展空间。从需求的角度讲,准确的室内定位可以全方位改善用户体验。例如在大型超市和卖场中,用户需要导航至某店铺、最近的卫生间或商场某个出口等问题都可以轻松解决;博物馆自助导览系统可以根据用户准确位置与朝向信息,

收稿日期:2020-03-01; 修回日期:2020-04-11

基金项目:国家自然科学基金(61801189)

无需用户扫码即可自动对艺术品进行语音讲解,这将是一个全新的导览用户体验。除此之外,越来越多的室内导航需求场景,如停车场寻车、目的地路线指引、楼层定位、共享出行的下单地点准确定位等,都已成为影响用户体验的需求痛点。在企业级市场领域,以位置服务为基础,配合“互联网+”、大数据、云计算等信息技术,可有效提高“行业+定位”企业级应用的生产效率或执行效率。在消防安全领域突发性的室内定位服务场景中,定位服务有利于指挥中心获知消防人员在室内的具体位置,同时也可对室内某位置的安全情况进行监测,为消防人员规划安全撤离路径。在工业4.0、智能仓储物流场景中,定位服务有利于实现生产流程可视化、可追踪,可以一站式完成货品的查询与信息录入功能。此外,机场行李、商场贵重物品跟踪等都是潜在的企业级应用,特别是近些年来5G与无人系统飞速发展^[1-2],无人系统变得更加智能化和自主化,在室内场景下,机器人、无人车间、智能工程等方面都将成为未来的主要应用趋势。

同时,从室内定位性能需求的层面看,室内定位的需求是具有较强的应用相关性的。例如对于消费级的定位,米级定位就可以满足需求,因此,3GPP的Rel. 15版TR38. 885对于定位的描述为:一般用户,80%的情况下水平定位精度不低于50m,垂直精度5m,端到端延迟低于30s;商业用户,室内水平定位精度不低于3m,室外水平定位精度不低于10m,垂直精度不低于3m,端到端延迟低于1s。而工业4.0则需要提供厘米级甚至毫米级的测量结果。

从技术与原理的角度看,室内定位技术为许多应用提供基于位置的服务,其中很重要的一个方面,室内定位技术是室内导航技术的基础,如果没有室内定位技术作为支撑,室内地图只是传统地图的电子化,远不能发挥数字化的优势,室内导航无从谈起。而由于室内环境中信道条件复杂、遮挡情况、高频变化、多径效应、阴影效应等因素,现有的全球卫星导航系统(GNSS)无法在室内使用,这使得室内定位在理论方法和应用实践中都极具挑战。面对不同的场景与需求,科研人员做了大量的研究工作,提出了基于信号强度指示、传播时间测量、惯性定位、立体视觉等多种适用于不同场景的定位技

术。这些定位技术在定位机理上具有较大的差异,因此与之对应室内定位的原理与算法也不尽相同,模型与测量技术往往是高度耦合的,同时也表现出了不同的性能。定位模型的前提不同,信息获取的手段不同,处理与计算方式的不同,这些定位机理上的差异性也使得融合定位变得复杂。

因此,各种室内定位技术与原理的机理与性能上的差异性,定位融合上的复杂性,再加上室内定位应用相关性较强这一特点也使得室内定位类比全球定位系统建立一个较为普适的、应用广泛的室内定位体系十分具有挑战。这就要求我们必须从定位需求的角度进行分析,从众多的室内定位技术中进行选择,从融合定位的角度进行优化,才能设计出符合实际需求的定位体系。本文即从室内定位算法、测量技术、融合定位的角度对各种室内定位的可选方案进行梳理,对比室内定位技术的性能差异,探讨室内定位技术应用中的问题,讨论目前室内定位应用所面临的挑战。

2 室内定位主要技术与原理

2.1 多边测量法

在众多定位算法中,基于距离测量的定位算法是一类比较经典的定位方法,其定位原理也较为简单。在距离可测量的前提下,可以使用多边测量法进行定位求解,其定位模型如图1所示,各基站坐标已知,记为 $A_i(x_i, y_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$),移动台坐标待求,设为 $X(x, y)$ 。

如果移动台 $X(x, y)$ 与基站之间的距离可测,设为 \tilde{d}_i ,移动台的估计坐标为 (\tilde{x}, \tilde{y}) ,记移动台 $X(x, y)$ 与基站 i 之间的真实距离为 d_i ,有:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2 \quad (1)$$

则多边测量法的定位问题可转化为函数

$$F = \sum_i (\tilde{d}_i - d_i)^2 \quad (2)$$

的极小优化问题。

对于该优化问题,可以通过多边测量法^[3]进行求解,当基站数目为3时,就是三边测量法^[4]。根据距离测量,可建立移动台的估计坐标 (\tilde{x}, \tilde{y}) 的方程组:

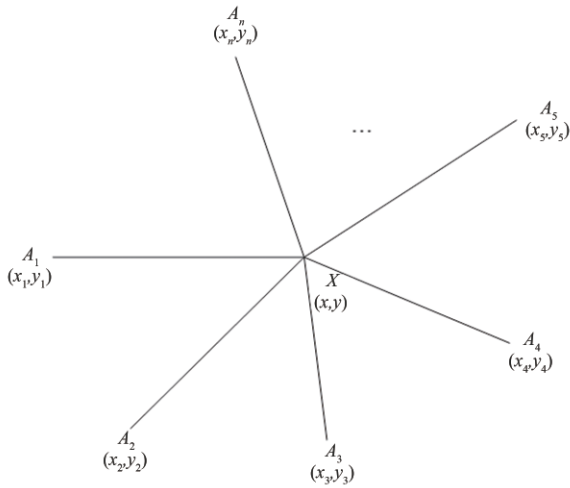


图1 多边测量法定位模型

Fig. 1 Localization model of multilateration

$$\begin{cases} (\tilde{x} - x_1)^2 + (\tilde{y} - y_1)^2 = \tilde{d}_1^2 \\ (\tilde{x} - x_2)^2 + (\tilde{y} - y_2)^2 = \tilde{d}_2^2 \\ \vdots \\ (\tilde{x} - x_n)^2 + (\tilde{y} - y_n)^2 = \tilde{d}_n^2 \end{cases} \quad (3)$$

该方程组求解可采用非线性最小二乘法如牛顿迭代、梯度下降等方法求解。还可以采用另一种简单直观的线性化方法:将方程组(3)中第1个至第 $(n-1)$ 个方程分别与第 n 个方程相减可得线性方程组(4):

$$\begin{bmatrix} 2(x_n - x_1) & 2(y_n - y_1) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_n - x_i) & 2(y_n - y_i) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_n - x_{n-1}) & 2(y_n - y_{n-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{d}_1^2 - \tilde{d}_n^2 \\ \vdots \\ \tilde{d}_i^2 - \tilde{d}_n^2 \\ \vdots \\ \tilde{d}_{n-1}^2 - \tilde{d}_n^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

对该线性方程组求最优解可得待定位节点的坐标估计值:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (5)$$

多边测量法是基于距离模型的求解方法,因此需要距离测量技术或距离估算技术作为前提,所有能进行距离测量的技术理论上都可以应用多边测量法进行定位求解,如利用信号到达时间进行距离测量,根据信号衰减模型进行距离计算,利用视觉测量获得目标距离,利用声音进行距离测量^[5]等。

2.1.1 到达时间(Time of Arrival, ToA)算法

ToA 算法通过测量各基站发出信号到达移动

台的时间来进行距离测量。ToA 算法采用如图1的多边测量法定位模型,基站坐标已知,分别为 $A_1(x_1, y_1)$ 、 $A_2(x_2, y_2)$ 、 $A_3(x_3, y_3)$,移动台坐标待求,设为 $X(x, y)$ 。通过测量移动台和基站之间的传输时间 Δt_1 、 Δt_2 、 Δt_3 ,即可通过多边测量法得到待测移动台坐标。

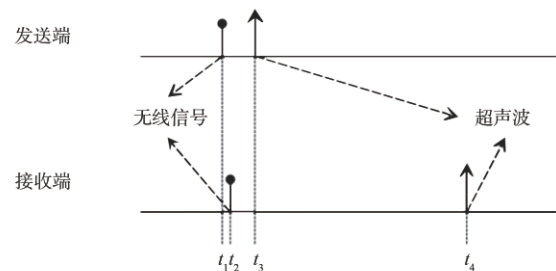
$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = c\Delta t_1 \\ \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} = c\Delta t_2 \\ \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} = c\Delta t_3 \end{cases} \quad (6)$$

其中, c 为光速。

ToA 要求各基站保持时钟同步。在理论上,该模型中多个圆应交于一点,但该模型在实际运用中由于存在测量误差,因此实际计算中往往需要采用最小二乘法进行最优解求解。同时,在室内距离测量受到非视距(Non Line of Sight, NLoS)的影响,因此许多改进工作都基于此展开,如文献[6]提出了一种基于 ToA 的三维室内定位算法 LMR 来缓解 NLoS 误差,文献[7]提出了基于卡尔曼滤波的 ToA 矫正算法等等。

2.1.2 信号到达时间差测量技术

由于无线信号以光速传播,时间精度是影响 ToA 测量精度的主要原因。采用超声波辅助无线测距计算两种信号到达差的测量技术是一种提高到达时间精度的有效方案。

图2 无线信号与超声波信号到达时间差示意图^[8]Fig. 2 Diagram of TDoA between wireless and ultrasonic signals^[8]

如图2所示,发送端在 t_1 时刻发送无线信号,经过一段时延后在 t_2 时刻发送超声波信号,接收端在 t_3 时刻接收到无线信号,在 t_4 时刻接收到超声波信号。如忽略无线电波传播时延,发送端与接收端的

时间差可估算为 $t_4 - t_2 - (t_3 - t_1)$ 。伯克利大学研发了基于超声波时间差测距 Cricket 节点,且定位精度可达毫米级,但由于超声波的发射与接收需要有比较明确的方向指向性,因此基站的设计需要有多路的超声波发送与接收模块,而且要求调整基站部署时的摆放姿态,以保证信号可接收并测量距离。

2.1.3 超宽带(Ultra Wide Band, UWB)定位技术

UWB 是一种无载波的短距离通信技术,它使用纳秒级的窄脉冲来传输数据。依据 FCC 的规定 UWB 信号指带宽大于等于 500MHz,或相对带宽大于 20% 的信号,这里的相对带宽的定义是

$$BW = \frac{f_H - f_L}{f_c} \quad (7)$$

式中, f_H, f_L 分别为功率较峰值功率下降 10dB 时所对应的高端频率和低端频率, f_c 是信号的中心频率, $f_c = \frac{f_H + f_L}{2}$

$$f_c = \frac{f_H + f_L}{2}$$

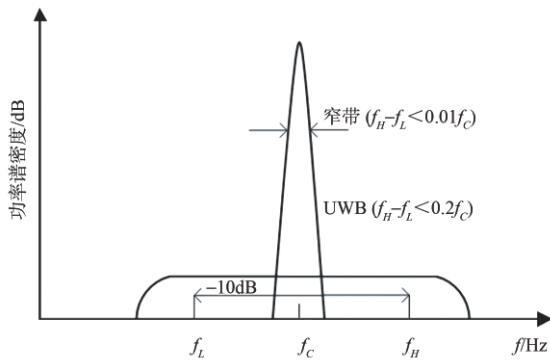


图3 超宽带信号与窄带信号的比较

Fig. 3 Comparison of UWB and narrow-band signals

UWB 定位系统在探测过程中发射的不是脉冲时间间隔固定不变的窄脉冲串,而是按照特定规则进行伪随机跳变,从而使其功率分配到极广的频带范围内^[9]。

研究表明, UWB 在 LoS 环境下定位精度较高,但是在 NLoS 环境下精度会出现性能下降。目前, Decawave 公司的 UWB 芯片可达厘米级的测量精度, TimeDomain 公司使用 UWB 技术可以达到毫米级的定位精度。

UWB 技术还在不断发展中,文献[10]提出了一种紧凑型 UWB-MIMO 天线,为 5G 终端设备提供高速的数据服务,文献[11]提出了一种用于认知无

线电频谱传感的紧凑型平面 UWB 天线。此外, UWB 还可作为检测与通信技术用于其他领域,如使用共聚焦算法实现乳腺癌检测^[12],做成小型设备植入人体^[13]等。

2.2 基于到达时间差(Time Difference of Arrival, TDoA)算法

TDoA 通过选取特定基站作为参考基站后,移动台根据接收到的时间戳来计算时间差,利用该时间差进行计算获得移动台的位置。TDoA 的定位模型如图 4 所示,基站坐标已知,分别为 $A_1(x_1, y_1), A_2(x_2, y_2), \dots, A_n(x_n, y_n)$,移动台坐标待求,设为 $X(x, y)$ 。通过测量移动台接收各基站之间的到达时间 t_1, t_2, \dots, t_n ,计算相对于参考基站的时间差 $\Delta t_{21}, \Delta t_{31}, \dots, \Delta t_{ni}$,之后通过求解下列方程组即可得到待测坐标。

$$\begin{cases} \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = c\Delta t_{21} \\ \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = c\Delta t_{31} \\ \vdots \\ \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = c\Delta t_{ni} \end{cases} \quad (8)$$

其中, c 为光速, $\Delta t_{ni} = t_i - t_1 (i = 2, 3, \dots, n)$ 。

本算法可以通过声源定位实现^[14],也可以通过 UWB 实现^[15]。

与 ToA 相比, TDoA 不要求基站与移动台之间的时间同步,但需要基站间的时间同步,移动台仅接收基站发送的信号即可,类比 GNSS,这一特性使得该定位模型的理论上的系统容量没有上限。TDoA 模型的求解本质上是求双曲线的交点,需要求解非线性方程组,同时也受到非视距问题的影响,因此许多科研工作都是围绕求解与优化展开,如经典的 TDoA 求解算法 Taylor 级数法^[16], Chan 算法^[17], NLoS 的识别与修正^[18]等。

2.3 基于到达角度(Angle of Arrival, AoA)的算法

如果移动台具有信号到达角度测量功能,则可以通过使用天线阵列来测量从各基站发出的信号

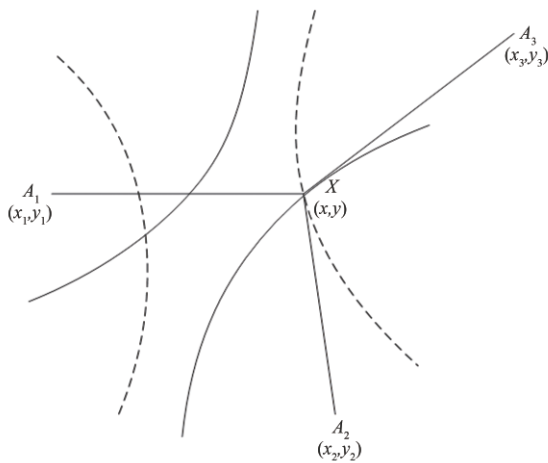


图4 TDoA定位模型

Fig. 4 Localization model of TDoA

到达移动台之后的角度,利用该角度信息来确定位置,这就是基于到达角度的AoA定位。

AoA算法的定位模型如图5所示,以3基站情形为例,基站坐标已知,分别为 $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$ 、 $C(x_3, y_3)$,移动台坐标待求,设为 $X(x, y)$ 。通过测量到达角度 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 ,求解下列方程组即可得到移动台坐标。

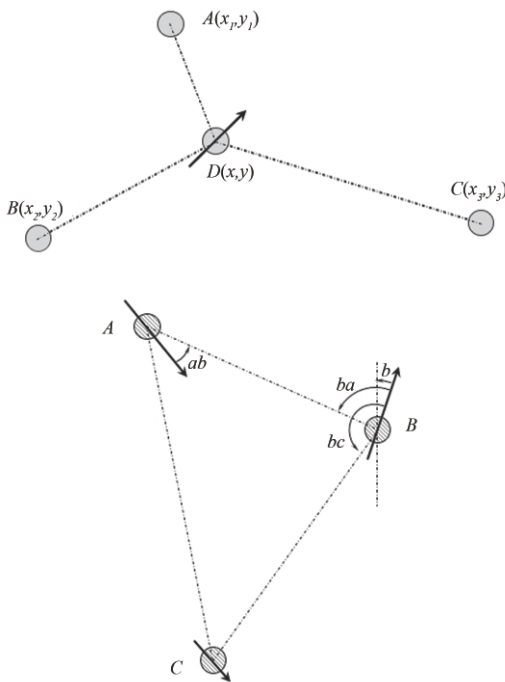


图5 AoA定位模型

Fig. 5 Localization model of AoA

$$\begin{cases} \tan(\theta_1) = \frac{x - x_1}{y - y_1} \\ \tan(\theta_2) = \frac{x - x_2}{y - y_2} \\ \tan(\theta_3) = \frac{x - x_3}{y - y_3} \end{cases} \quad (9)$$

AoA定位相较于ToA与TDoA而言无需进行时间同步,但是它的硬件实现起来相对复杂,定位精度会受到信号带宽、距离等因素的影响,距离越远测量精度会越低,定位精度也相应降低。因此许多科研工作基于此进行了改进:如加权的AoA方法^[19],基于MUSIC算法来进行估计AoA和通过更改阵列天线的参数来增强估计效果的方法^[20]等。

随着5G的发展,5G定位逐渐开始得到关注,而5G的高载波频率、高带宽、天线数量多、网络密度大等特点也更适合于室内定位。理论上,5G采用毫米波通信,而毫米波通信具有较好的方向性,可以实现更高精度的测距和测角,同时采用大规模天线技术,具有更高分辨率的波束,也可以实现更高精度的测距和测角特性。因此,5G更适合采用AoA的定位方式以获得更好的精度。目前,华为采用5G天线来获取信号的AoA,可以获得高精度的方位角,据此可以计算得到目标的相对位置与绝对位置。

2.4 接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)定位技术

接收信号强度定位技术主要基于无线信号的传播模型:无线信号传播的功率衰减是信号传播距离的函数: $P_r=f(P_t, d)$,其中 P_r 是可测的接收信号强度, P_t 是信号发射强度, d 是信号传播距离, f 是信号强度与衰减距离的经验模型。理论上,如果发射功率已知,信号传播经验模型已知,在测得了移动台接收到的 P_r 信号强度值后,即可求得基站与移动台之间无线信号传播距离。典型的信号传播模型有自由空间传播模型,地面反射模型(图6)等,在获得移动台与多个基站间的距离后即可使用多边测量法进行位置求解。但是由于室内信道环境十分复杂多变,难以准确评估信道模型,同时RSS的稳定性问题,区分度问题,可靠性问题,这些因素都使得使用RSS进行距离测量进而求解移动台位置的方式,其定位精度较低^[21],以致有研究认为:如果没有

更复杂的环境模型或者额外的定位基础设施, RSS 测距性能将无法取得突破^[22-23]。

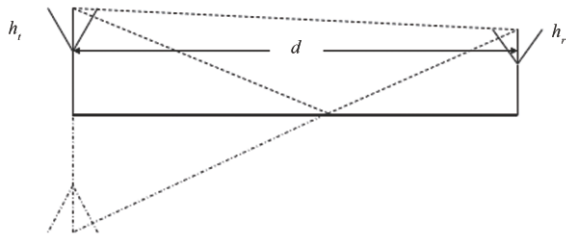


图 6 地面发射模型
Fig. 6 Ground launch model

因此更多关于 RSS 的研究采用指纹方法,其定位的基本原理框架如图 7 所示。通过对室内某点进行 RSS 采集,可以接收到各基站的 RSS 值,这一组 RSS 值构成了该位置的指纹,室内中不同点的位置都有自己的指纹信息。通过提前在待测场景离线测量指纹来建立 RSS 的指纹数据库,从而在实际定位的过程中通过当前测得的指纹和数据库中的指纹对比而得到当前的位置。此方法由于近年来室内 WiFi 的普及,无需建立室内定位基础设施,因此受到了广大科研工作者的青睐,进行了大量的研究工作,同时,蓝牙信号强度, lora 信号强度等都属于此类研究。然而,此方法虽然避免了信号传播模型难以准确估计的问题,但仍然受到室内环境复杂,场景高频变化等因素的影响,同时离线指纹采集需要提前对所有位置建立数据库,因此系统维护成本较高。

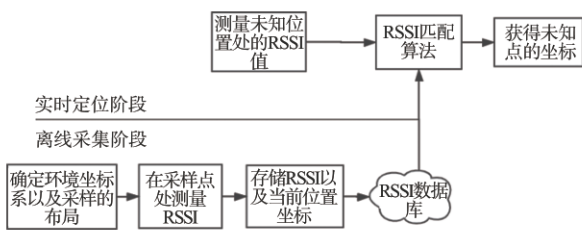


图 7 指纹法的定位体系框架
Fig. 7 Localization framework of fingerprint method

2.4.1 WiFi 定位技术

WiFi 定位主要是基于 RSS 的指纹定位方法,其离线采样阶段的主要任务是构建包含样本点 RSS 值的样本指纹数据库。经典操作方式是在位置区

域中设置固定数量的采样点和无线接入点 AP。通过测量和收集采样点的 RSS 值,来建立采样点的位置指纹数据库。

在线定位阶段主要基于某种搜索匹配方法,将测试节点的 RSSI 值与位置指纹数据库中的数据进行搜索匹配。常用的匹配算法有:K 邻近算法(KNN)、K 加权邻近算法(WKNN)、K 均值聚类算法、主成分分析法(PCA)、神经网络算法、支持向量机算法等。

WiFi 定位因已经存在分布广泛的无线路由器而不需要再额外布置基础设施,而且该室内定位方案使用智能手机即可实现定位,因此引起了许多科研工作者的兴趣。但是由于 WiFi 定位使用的是指纹定位技术,也存在着指纹定位的缺陷,离线采集指纹数据库的维护成本,室内环境多变都是其实际应用所面临的挑战,因此科研人员们基于 WiFi 指纹定位系统做出了大量的改进,如通过预测方法来减少离线指纹建库的工作量^[24],为避免 K 加权邻近算法和朴素贝叶斯分类器存在的因 AP 选择不当而导致定位性能大幅减小的问题,使用基于域聚类的 WiFi 室内位置估计策略^[25],从二维空间定位扩展到三维空间定位^[26]等。目前 WiFi 定位在 IPIN 国际竞赛中可以达到 1.2m 的精度。但在实际应用层面,如何降低离线采集工作量与指纹数据库的维护成本,将是制约该技术实际应用的一个重要因素。

2.4.2 iBeacon 定位技术

iBeacon 是苹果公司在 2013 年推出的基于低功耗蓝牙技术(Bluetooth Low Energy, BLE)的室内定位技术, iBeacon 定位分为基站和移动台两部分,基站每隔一定的时间广播包括 UUID, Major, Minor, RSSI, proximity, accuracy 等信息的数据包。其中, RSSI 反映了接收信号的强度, proximity 反映了基站到移动台的距离且分为四个等级,分别为 Unknow, Immediate, Near, Far, 如图 8 所示。因此 iBeacon 定位也是基于 RSS 信号强度进行的。

移动台收到广播信息后可以基于信号强度的原理,通过指纹的方法进行定位,或者使用 RSS 估算基站距离,使用多边测量法进行定位,还可以使用基于 proximity 的定位方法,进行粗略的定位估计,大致判断移动台当前所处的位置。

2.5 惯性导航(Inertial Navigation)

航位推算全球导航定位系统兴起前非常经

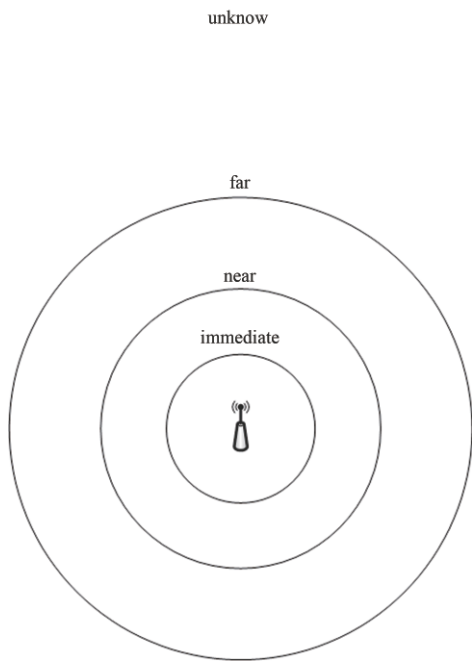


图8 iBeacon的接近度等级
Fig. 8 Proximity level of iBeacon

典的导航手段,如今随着传感器技术的飞速发展,可以很容易地使用陀螺仪与加速度测量仪来测量节点移动台的瞬时运动信息^[27]。

使用该技术的系统目前又称为惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS),它通过加速度计得到物体的加速度,依次积分得到速度和位移;再通过方向传感器和陀螺仪获取物体的运动方向。二者相结合再根据初始位置即可得到实时的位置信息,其定位示意图如图9所示。

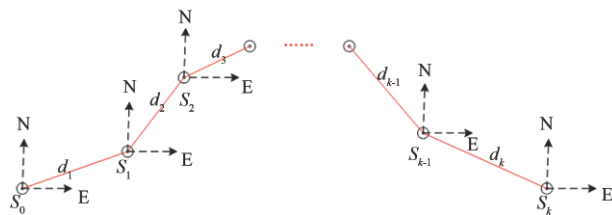


图9 惯导定位模型
Fig. 9 Inertial navigation localization model

惯导技术不需要提前在定位场景安装任何基础设施也不会受无线环境的干扰,这使得它有着广泛的应用前景。随着机电系统的不断发展,惯性传感器不断地小型化,从而开始在室内定位领域使用。惯导技术无需借助任何外部设备,仅通过自身装备的陀螺仪、加速度计等设备即可实现定位,因

此惯导技术的定位精度一方面受制于惯性传感器的精度与成本,另一方面随着时间的推移受到累积误差的影响,导致长期的导航定位结果不可靠。大量的科研工作也主要围绕这两点展开。行人航位推算(Pedestrian Dead Reckoning, PDR)技术引起了许多科研工作者的兴趣。文献[28]通过使用最少的地图信息和引入了粒子过滤器增强PDR性能。针对累积误差导致的漂移问题,文献[29]提出了高级启发式漂移消除算法,实验结果表明它可以有效地消除方位角的漂移误差。而因为单独的惯性测量定位存在累积误差问题,许多研究人员采取了融合定位的方式。文献[30]采用了惯性测量与UWB相结合的方式,通过线性回归矩阵模型来修正惯性导航路径,并通过最小二乘法来确定UWB轨迹与惯性导航轨迹相关的方程式,从而修正轨迹。文献[31]采用了视觉技术与惯性测量相结合的视觉惯性导航技术。

2.6 即时定位与地图构建(SLAM)技术

SLAM技术,主要用于机器人进入一个未知环境时通过各种传感器获取环境的参数来增量式地构建环境地图,并确定自身所处的位置和姿态,从而实现机器人的定位和导航。SLAM问题包含四个方面,对环境进行描述从而建立地图、获取环境信息、获取的环境信息并据此更新地图、可靠的SLAM算法^[32],其基本原理如图10所示。

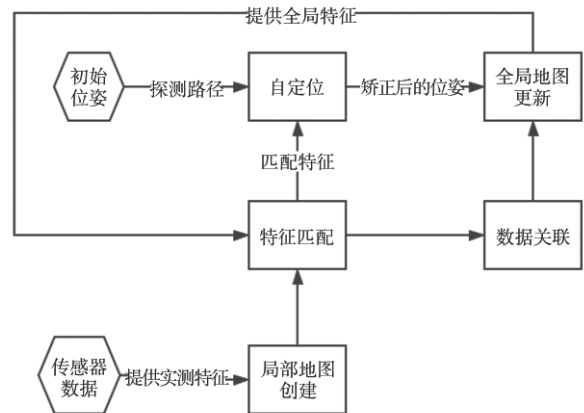


图10 SLAM系统基本原理框图
Fig. 10 Framework of SLAM

SLAM对于地图的描述,主要有栅格地图、几何地图、拓扑地图。栅格地图是将整个环境分为若干

大小相同的栅格;几何地图是抽象出环境的几何特征来进行描述;拓扑地图是建立在几何地图的基础上,把环境描述为由弧连接在一起的许多节点。

SLAM的室内定位技术可以采用信标定位、惯导定位、地图匹配、视觉定位等技术。由于各种定位技术均存在一定的问题,如全球导航定位系统无法用于室内,惯导定位受到累计误差的影响,地图匹配速率慢,导航信标成本高等,SLAM还可以采用混合定位的方式将其他定位手段进行融合,得到更加稳定的定位结果。

2.6.1 视觉SLAM

视觉SLAM指的是使用光学相机作为外部传感器的SLAM。根据图像信息处理方式的不同,SLAM可以分为基于特征的SLAM和直接SLAM。基于特征的SLAM对输入图像的特征点进行提取,通过特征匹配来计算相机位姿并对环境进行建图。这种方法基于图像特征提取,可以有效地减小计算量,但是对于纹理少的场景(如白墙)会因无法实现特征的提取而导致使用受限。另一种直接SLAM方法可以解决这一问题,它直接利用像素点的强度信息进行计算,对于特征点较少的场景具有更好的准确性,但是计算量较大。

根据使用相机的不同,SLAM技术又可以分为单目视觉SLAM、立体视觉SLAM和RGB-D SLAM。单目视觉SLAM^[33]仅用一个相机,使用简单且成本低廉,但是由于在每个时刻只能获取一张图像,且只能依靠获得的图像数据计算环境物体的方向信息,获得可靠的深度信息的能力较差,从而初始地图创建及特征点的深度恢复都比较困难。立体视觉SLAM使用多个相机,能够获取更多的特征数据,但是同时也导致了系统设计复杂和成本高的问题。RGB-D SLAM指单目相机与红外传感器相结合的技术,它能够在获得彩色图像的同时获得深度图像,但是它对外界的光线干扰敏感而且成本高。

视觉SLAM技术,无论是采用单目视觉、立体视觉还是RGB-D SLAM,均可以获得深度信息,因而可以采用多边测量法进行目标定位。同时,SLAM技术还可以采用视觉里程计的方式估算目标位置^[34]。

视觉SLAM无论是采用何种方式,都存在一些共性问题,如:在无纹理或者光照弱的环境下表现较

差,受相机视野、运动速度的影响,计算量大,遮挡、特征缺失、动态物体或光源干扰都会影响其定位性能等。

2.6.2 激光SLAM技术

与视觉SLAM采用光学相机作为外部传感器不同,激光SLAM利用激光雷达作为外部传感器。激光雷达工作时发送激光束,激光遇到障碍物后会有部分反射回来,接收到这些信号后通过内部的数字信号处理实时解算便可得到目标物体与雷达之间的距离和夹角信息。

激光雷达抗光线干扰的能力较强,在近期的研究中,地图重构算法,闭环检测算法,融合定位算法等方面,都是激光SLAM的研究热点,文献[35]基于激光SLAM提出了一种新的GP-SLAM方法,该方法利用一种区域化的高斯过程地图重构算法来表示地图,实验证明取得了不错的效果。文献[36]提出了一种基于空间位置和外观相似度的混合闭环检测方法应用于激光SLAM,从而有效地减少累积偏差和耗时。文献[37]介绍了一种激光SLAM和视觉SLAM融合的定位方式,实际距离的定位误差可以小于5%而且当传感器不是很强大时,所提出的系统能够改善定位。

3 融合定位

由于不同的定位技术具有各自的优点和缺点,因此可以采用融合定位的方式融合多种定位技术的优势提高定位精度和可靠性。融合定位通常可分为两种形式:基于贝叶斯滤波的融合定位和基于机器学习的融合定位。

3.1 基于贝叶斯滤波的融合定位

3.1.1 贝叶斯滤波基本概念

基于贝叶斯滤波的定位问题可描述为如下过程:在 k 时刻,我们具有一个包含位置的系统状态矢量 x_k ,在1到 k 时刻我们可以得到一系列具有噪声的观测量 $y_{1:k}$,例如测距和指纹地图等。我们希望根据这些观测量,对无法直接观测到的位置进行估计。基于贝叶斯估计理论,上述过程可以看成是对后验概率 $p(x_k|y_{1:k})$ 的估计。假设这一过程符合马尔科夫模型,即具有以下两个特性:

(1)状态量的马尔科夫特性

状态 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 形成一个马尔科夫序列,状

态量的马尔科夫特性是指时刻 k 的状态 x_k 只与它的上一时刻状态 x_{k-1} 有关,与 $k-1$ 时刻之前的状态无关。状态 x_k 与 x_{k-1} 之间满足如下关系:

$$x_k = f(x_{k-1}, v_k) \quad (10)$$

其中 $f(\cdot)$ 为系统模型, v_k 为系统噪声。

(2) 状态量的条件独立

已知当前状态 x_k 时,当前测量值 y_k 仅与当前状态有关,与此前的所有状态量和测量值均条件独立。 y_k 与 x_k 的关系为:

$$y_k = h(x_k, u_k) \quad (11)$$

其中 $h(\cdot)$ 为观测模型, u_k 为观测噪声。

贝叶斯滤波为上述估计问题提供了一种基于概率分布形式的解决方案。贝叶斯滤波有多种形式,常见的有卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF),扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)和粒子滤波(Particle Filter, PF)。其中, KF假设系统为线性系统,噪声为高斯噪声; EKF通过泰勒级数展开的方法可处理非线性系统,但是噪声仍需假设为高斯噪声; PF基于蒙特卡洛方法利用大量粒子模拟概率分布,从而能够处理非线性系统和非高斯噪声。在实际环境中,定位问题通常是非线性系统和非高斯噪声,因此相比于KF和EKF, PF通常能够实现较好的定位性能,但是计算复杂度相对较高。

3.1.2 基于贝叶斯滤波的融合定位

贝叶斯滤波常用于融合多种定位方式,特别是惯性定位与其它定位方法的融合。惯性定位通过加速计、陀螺仪和磁力计推断定位目标在不同时刻的相对位移,并最终得到定位目标位置。惯性定位在短时间内可以实现较高的相对定位精度,但是长时间的误差积累会最终导致较大的绝对定位误差。因此惯性定位需要通过其它定位方法进行校正,例如无线定位。无线定位通过无线测量值(例如, ToA 时间测距、信号强度测距、信号指纹等)获得当前时刻的定位位置,不同时刻定位结果之间相互独立。因此由于测量噪声的影响,连续时刻之间的定位位置会有较大跳动。无线定位结果通常也需要惯性定位进行平滑,从而降低定位误差。

基于贝叶斯滤波的融合算法,通常利用惯性定位估算两个时刻之间的相对位移,并以此设计贝叶斯滤波中的系统模型 $x_k = f(x_{k-1}, v_k)$ 。基于系统模型获得状态的预测值 x_k 之后,贝叶斯滤波将通过无

线定位作为观测模型 $y_k = h(x_k, u_k)$ 进一步更新定位位置。

在文献[38]中,研究人员通过一种加权的增强型PF融合惯性定位和基于WiFi信号强度的测距定位。实验表明,融合定位的定位精度明显高于惯性定位和测距定位。在文献[39]中,研究人员通过一种自适应噪声方差的粒子滤波器融合惯性定位、GPS和WiFi指纹定位,从而实现了室内外一体化无缝定位。在文献[40]中,研究人员研究了基于信号强度和到达时间的测距定位,并提出了一种基于KF的融合定位方法。实验表明通过融合测距定位和到达时间定位,可以有效地提高定位精度。在文献[41]中,研究人员提出一种EKF融合超宽带测距定位和惯性定位的多人协作定位新方法,该方法可以有效地提高多消防员之间的协作定位精度。在文献[42]中,研究人员通过紧耦合KF融合超宽带信号到达时间差测距和惯性定位,实现了亚米级的高精度室内定位。在文献[43]中,研究人员通过KF将可见光定位和惯性定位进行紧耦合,实现了在稀疏可见光光源环境下的高精度定位。

3.1.3 基于PF的地图匹配融合定位

PF常用于融合室内地图信息,从而进一步提高室内定位精度。传统的室外地图匹配通过构图的方式将室外路网建模为点和边的形式,从而将定位目标的位置移动局限在图中不同点之间的转换。相对于室外地图匹配,室内地图匹配更加复杂,并且定位精度要求更高,因此简单的路网匹配难以满足室内定位的需求。

PF基于蒙特卡洛方法利用大量粒子群来模拟概率分布。PF首先通过惯性定位设计系统模型并更新粒子。在众多粒子中,可能会出现部分粒子穿墙的情况,而这种情况是物理不可实现的。因此我们可以将这些粒子的权重设为0,从而滤除这些物理不可实现的粒子。通过上述过程,室内地图可以有效地限制粒子移动,从而提高定位精度。

在文献[44]中,研究人员设计了一种通过PF融合惯性定位和室内地图的室内定位系统。该系统通过惯性定位更新粒子,并基于室内地图对粒子更新进行限制。实验表明,室内地图的限制可以有效修正惯性定位的积累误差,从而大大提高了定位精度。在文献[45]中,研究人员通过一种增强粒子

滤波器融合 WiFi 和地磁定位,并利用室内地图对粒子更新进行限制,从而进一步提高了定位精度。

3.2 基于机器学习的融合定位

近年来随着人工智能的快速发展,机器学习算法也更多地应用在室内定位领域,特别是指纹定位。对于指纹定位,离线采集的指纹数据用于训练不同机器学习模型,例如支持向量机、随机森林和深度学习等。当接收到一组新的观测信号后,我们可以通过已训练的机器学习模型进行分类或者回归,从而实现指纹定位。在此种指纹定位中,观测到的不同信号可看作是机器学习中的不同特征,从而实现多种信息融合,提高定位精度。

在文献[46]中,研究人员利用随机森林融合时间差和信号强度两种指纹信息,实验结果表明相对于传统的基于信号强度的指纹定位算法,融合定位精度提高了 36%。在文献[47]中,研究人员通过深度学习融合 WiFi 多个信道中的信道状态信息实现高精度的指纹定位。在文献[48]中,研究人员进一步通过深度学习融合多天线多信道之间的相位信息,从而进一步提高了室内定位精度。在文献[49]中,研究人员利用曼哈顿距离通过 K 近邻算法融合

WiFi 指纹定位,并通过 ZigBee 信号进行辅助,实验表明 WiFi/ZigBee 融合定位精度高于传统 WiFi 指纹定位。

4 室内定位技术对比分析

尽管目前室内定位技术飞速发展,已经有了许多可选的定位技术,但这些定位技术在性能上表现出了较大的差异性。除了定位精度上的差异、定位系统部署与维护的方式、使用方式、定位所能提供的系统容量、是否需要定位基础设施等,都存在差异,各个定位技术目前都存在各自的问题,因此还未出现一款较成熟的普适的室内定位解决方案。

表 1 将各种定位技术从定位精度,是否需要定位基础设施,部署与维护的难度,是否受到 NLoS 影响以及各自的缺陷的角度进行了对比分析。从定位精度的角度看,定位精度到达厘米级已经可以满足大多数的应用需求,但从室内定位系统应用推广的角度看,定位精度不是唯一影响推广的因素,系统部署与维护的便捷性、使用方式的易用性、定位系统成本等都是制约其实际应用的重要问题。

表 1 各种定位技术对比
Table 1 Comparison of localization techniques

	定位精度	定位基础设施	部署与维护	是否受 NLoS 影响	缺陷
ToA	UWB 毫米级-厘米级	需要,且需要时间同步	需要一次基站部署	是	受限于硬件,普适性差,成本高
	超声波 毫米级	需要,且需要时间同步	需要一次基站部署,且需姿态调整	是	具有较强的方向指向性
	电磁波 受限于时间精度	需要,且需要时间同步	需要一次基站部署	是	
TDoA(UWB)	毫米级-厘米级	需要,且基站间需要时间同步	需要一次系统部署	是	受限于硬件,普适性差,成本高
	AoA 分米级(精度受信号带宽、距离影响)	需要,无需时间同步	需要一次基站部署(适合 5G 场景)	是	需要天线支持到达角度测量
RSS	传播模型 受环境影响严重	需要	需要一次基站部署	是	精度,稳定性,区分度,可靠性较差
	指纹模型 米级	需要(主要借助现有基础设施)	需要离线采集指纹数据	是	维护成本高
惯导	受惯性传感器精度与累计误差影响	不需要	需要融合定位消除累计误差	否	需要一个初始位置与方向
SLAM	视觉 厘米级	不需要	需要局部地图构建	否	受场景高频变化影响,受光线干扰
	激光 厘米级	不需要	需要局部地图构建	否	受场景高频变化影响,成本较高

从室内消费级定位的角度看,受限于硬件或基础设施可能是影响定位技术实际应用的主要问题。比如UWB技术,虽然UWB定位精度足以满足消费级需求,但硬件普及度不高,缺乏室内定位基础设施成为了目前UWB在消费级领域难以逾越的门槛。指纹定位虽然不具有此类缺陷,但离线采集不仅要考虑采样点的密度,还要考虑智能手机的姿态、型号等,室内场景的高频变化也会严重影响其定位性能,使得系统维护成本高昂。惯导定位由于需要融合其他定位手段来消除累计误差,因此间接受到其他定位技术的约束。

从室内企业级定位的角度看,硬件与定位基础设施将不是定位技术实际应用的主要问题,因此可以优先考虑精度需求,再结合使用方式,部署维护需求等从多个角度进行定位方案的选择,对比各种定位技术的优缺点与定位系统需求,选择适合的定位技术,比如可以从UWB与SLAM中进行选择,同时还可以融合惯导定位,根据定位系统需求,定制适合的解决方案。

5 基于位置服务的定位问题讨论

从定位系统设计的角度看,目前科研人员对定位问题的研究已取得了丰硕的研究成果,内容涵盖了ToA测量、时间差测量、RSS测量、角度测量、光学测量、惯性传感器测量等测量技术,多边定位算法, TDoA定位算法, AoA定位算法,惯导定位算法, SLAM定位算法等定位算法,以及融合定位,定位优化等组合优化方法,构成了室内定位可选技术库。从整个定位技术谱系的角度看,目前可以将定位分为测量技术、定位算法、组合优化方案3个层次,如图11所示。其中,测量技术是定位技术的基础,测量技术的特性很大程度上决定了定位方案的选择,而由于目前室内定位还不存在一种能够类比全球导航定位系统的普适性方法,因此对多种定位方法进行组合优化可以有效减少单独由某一种定位技术带来的缺陷。

另外,从基于位置服务的角度看,除了以某种频率提供某一精度位置服务,还需要考虑几个其他的属性,包括定位与识别的绑定与分辨能力,定位系统容量以及快速的定位系统部署能力。

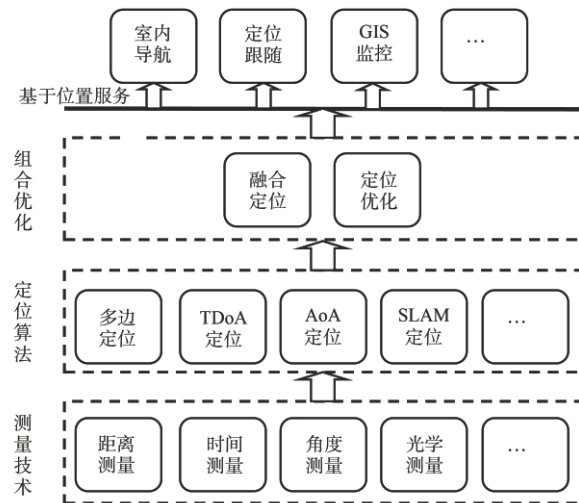


图11 基于位置服务的定位技术与原理层次图谱

Fig. 11 Spectrum of techniques and theories for location-based services

5.1 定位中的识别与分辨能力

基于位置的服务一个隐含的需求是目标的识别与分辨。定位中的识别与分辨能力十分重要,因为只有识别才能将目标与位置准确直接绑定。这也是定位与检测技术的主要区别,如果某种技术不能提供多目标的分辨能力,那么它只是一种检测技术。某些室内应用以检测为基础,如智能家居的灯光调节,自主导航中的避障等,而基于位置的服务则需要以准确识别为基础,如室内导航、精确跟踪等。

实现定位与识别的绑定,一种方式是识别与定位一体化,就是定位目标本身有ID标识,有感知能力与信息处理能力,无论定位解算在定位目标中进行还是在系统后台进行,都可以很容易地实现定位与目标的绑定。也有文献将其归类为主动定位和被动定位。主动定位指人员借助移动终端主动获取自己的位置信息,在室内进行主动定位导航,如主动SLAM定位^[50]、基于WiFi信道状态的主动定位^[51]。被动定位指移动终端上安装定位标签,通过定位系统对标签进行实时定位来实现定位,如信道状态信息的无源被动定位^[52]。

另一种极端的情形是定位目标无感知能力或不提供感知信息的情况,比如伤员识别定位,车辆识别定位,可见光阴影定位的情况。此种情形,只要能通过光学测量等测量技术获得目标的深度信

息,即可使用经典的几何关系求解目标位置,定位并不是其关键技术,而识别技术才是该问题的核心,识别技术的分辨能力是影响定位系统容量的主要影响因素,如使用视觉技术,车辆可以通过车牌识别,人员可以通过人脸识别,同时绑定位置信息,但识别技术也受到场景的影响,比如如果无法获取人脸或者车牌图像,位置与定位点绑定的挑战将跃升一个等级。

5.2 定位系统容量

基于位置服务的定位解算位置的不同,定位使用方式的不同,对定位系统容量会造成一定的影响。如果定位结果由定位目标解算,那么可以易于实现导航需求,但监控需求则需要将定位结果通过无线信道传至后台,系统所能定位目标的数目,即定位系统容量将受限于信道容量。如果定位结果由后台解算,可以很容易地实现监控需求,但测量信息的获取将受限于系统中定位目标数量的多少。

同时,测量技术本身也会影响系统容量,如UWB技术如果采用双边测量法,需要移动台与基站间的双向通信,需要避免大容量定位时无线信号的冲突与碰撞,则无论定位解算位置在目标节点还是后台,定位系统的容量都受限于信道容量,而如果使用SLAM技术实现导航需求,理论上定位系统容量是没有上限的。使用基于TDoA的方式进行定位,由于移动台单向接收基站信息,理论上定位系统容量可以类比全球导航定位系统,上限是无穷大,因此具有更广阔的前景。

5.3 快速的定位系统部署能力

从室内定位系统部署需求的角度看,基于位置的定位服务需求分两种,一种是突发性的室内定位需求(如消防安全领域的室内定位需求),另一种是一次部署长期使用的定位需求。对于突发性的室内定位需求,快速的室内定位系统部署十分重要。对于突发性的室内定位需求,目前业界的解决方案除惯导定位技术外,大都难以实现快速的室内定位系统部署。惯性导航系统可在突发情况下实现这一功能,但可用性上的提高需要以室内地图作为辅助,累计误差的消除也需要其他技术的支持。因此,如何建立一个普适的室内定位体系以供突发性室内定位需求使用也是基于位置服务需要考虑的一个属性之一。

6 室内定位技术应用面临的挑战

尽管目前室内定位技术飞速发展,可选定位方案越来越多,但现有技术在定位精度、部署与维护难度、定位系统容量等方面都存在各自的问题,还未出现一款较成熟的普适性的室内定位系统解决方案,特别是消费级场景,定位精度已经不是制约定位技术应用的主要方面,各种定位技术的实际应用中仍面临着诸多的挑战。具体而言,室内定位的应用仍存在以下几个方面的主要挑战。

6.1 建立基于准确测量的室内定位基础设施

基于室内基础设施的定位(如UWB技术,AoA技术)相较于SLAM技术、惯导技术有其独特的优点,它不受光线、累计误差的影响,定位基础设施一经部署即可长期使用,可以为惯导定位提供累计误差校正,为融合定位提供支持。室内基础设施建设可以通过部署回避非视距问题,如在走廊中与房间中分别部署基础设施,即可在定位时通过非视距识别技术选择视距测量进行定位。那么如何将多个室内分散的定位基础设施低耦合地整合为一整套室内定位系统,是室内基础设施建设顶层设计所面临的挑战之一。

另外,使用基础设施进行定位,准确的测量往往需要移动台依赖特定的硬件才能完成(如UWB定位),硬件受限是制约其应用的一个主要原因,但从长远来看,某种硬件技术如果能提供类比全球导航定位系统一样的性能,硬件的受限将不是问题,其前景可由硬件集成到WiFi中或智能手机中得以实现。

6.2 室内定位系统的部署与维护成本

对于需要部署的定位系统,基于位置的服务需要经历部署和定位两个阶段,如指纹定位需要离线采集指纹数据,SLAM需要局部地图构建等。而室内环境、格局的频繁变化使得此类系统需要定期维护,维护工作量较大。基于定位基础设施的定位虽然维护成本较低,但基础设施部署时需要为每个基站配置定位坐标,为了同GNSS进行无缝连接,还需要获知基站部署位置经纬度坐标的精确值,大规模地部署带来了较大的部署成本。因此,在定位精度可达厘米级的情况下,如何快速部署基站坐标,节省部署成本,在室内环境变化时进行增量式的部署

与系统维护,这些都成为了制约室内定位应用的主要因素,也是室内定位所面临的挑战之一。

6.3 室内定位系统的环境适应性

室内场景的复杂性表现在室内环境是高频变化的,一方面,室内存在大量的墙壁、门、其他桌椅等设施的遮挡,另一方面,人员流动、门窗的开关等都会造成严重的室内多径效应,使得指纹定位方式数据的离线采集受到影响。同时,场景的高频变化,包括光线的变化也会使得视觉SLAM的离线地图构建都受之影响。

因此,室内定位算法不仅要考虑定位精度,部署难易等问题,还需要独立于环境变化,具有较强的环境适应性。如何从测量技术、定位方法以及融合定位的角度,进一步地减少环境对定位性能的影响,将环境因素影响降到最低,也是室内定位应用所面临的挑战之一。

一方面,我们可以通过对环境变化的识别或技术突破来缓解多径效应带来的问题,另一方面,我们可以选用独立于环境变化的定位技术(如惯导定位)来提供较好的环境适应性,使用融合定位减少多径效应影响。就环境适应性而言,惯导技术具有天然的技术优势,同时惯导定位的累计误差又可以通过其他定位来校正,因此融合定位也是解决环境适应性这一挑战的主要趋势。

6.4 室内定位系统的实时评估

目前室内定位技术性能评估方面的研究,一方面可以通过仿真或实际测量同真实位置进行对比,说明算法的有效性,另一方面,可以通过算法的横向对比,比较各个算法与技术的性能。这些文献中实验的性能分析是离线的、非实时的,可以粗粒度给出定位方案选择的指导性意见,并不能从实际系统的运行期给出稳定的性能分析,为位置服务的使用人员提供更详细的信息。

然而,同一种算法,在不同的环境中也会表现出性能上的差异:SLAM在有光线干扰的情况下,定位性能会受到影响;指纹定位方法在环境变化引起指纹变化时,定位误差会增大;同样的定位基础设施,由于室内格局的变化视距测量可能会变成了非视距测量;不同的基础设施,基站的拓扑也会影响定位性能;更复杂的多目标网络定位,其定位性能受到拓扑的影响;移动台在室内某处的定位精度比

其他位置要高。

因此,如何对定位性能进行实时性的运行期评估,如给出某一定位精度的置信度,提升定位可用性,将成为室内定位所面临的又一挑战。实时性评估不仅可以用来自适应地改变融合定位的策略,而且可以为改善定位的环境适应性提供依据,还可以通过评估,为重新部署定位系统提供建议。

6.5 建立基于融合定位的普适性的室内定位体系架构

室内场景在地理上具有分散性和相对独立的特点,因此可以从面向应用的角度,针对不同的应用需求设计不同的定位系统。但同时,从室内定位长远发展的角度看,基于位置的服务有服务迁移的需求,有无缝接入新场景的需求,有新技术更新的需求等。因此需要将各种定位系统统一的基于位置服务的需求抽象出来,从融合定位的角度建立一个普适性的室内定位体系架构,该架构应具有以下几个基本特征:(1)考虑使用方式与系统容量,避免容量受限,为基于位置的服务提供统一的服务接口;(2)具有独立于技术的可扩展性,具有新技术的接入能力;(3)具有基于位置服务的迁移与无缝接入能力。通过普适性室内定位体系架构的建立,为室内定位的长远发展奠定基础,可以将多个独立的定位系统统一为一个可以类比GNSS的基于位置服务的室内定位体系,推动室内定位技术的发展与整合。

7 结束语

以基于位置服务为目标的室内定位技术经过多年的发展已成为人类生产生活中的一项关键技术。从需求上看,无论是消费级市场还是企业级市场,都迫切地需要定位精度更高、维护更容易、使用更便捷、系统成本更低廉的室内定位技术;从技术的角度看,目前的室内定位技术可选方案较多,在某些特定场景或某一指标上已经可以满足室内定位的部分需求。然而,现有室内定位技术在定位精度、部署与维护难度、定位系统容量等方面仍存在各自的问题,消费级场景还未出现一款较成熟的、普适性的室内定位系统解决方案。企业级场景对定位系统的成本、部署、维护等不十分敏感,但在建立基于准确测量的室内定位基础设施、室内定位系

统的部署与维护成本、室内定位系统的环境适应性、室内定位系统的实时评估、建立基于融合定位普适性的室内定位体系架构等方面还存在诸多挑战。

但机遇与挑战同在,每一个问题的解决,每一个挑战的攻克,每一个理论的突破都在推动室内定位技术的进步与发展,室内定位技术的发展也需要从理论与技术突破的深度、面向应用的定位技术统筹的广度上取得全面进展,以适应日益增长的室内定位需求。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张涛, 李清, 张长水, 等. 智能无人自主系统的发展趋势[J]. 无人系统技术, 2018, 1(1): 11-22.
- [3] Mathias A, Leonardi M, Galati G. An efficient multilateration algorithm [C]. International Workshop on Digital Communications-enhanced Surveillance of Aircraft & Vehicles, Capri, Italy, 2008.
- [4] Zhou Y. A closed-form algorithm for the least-squares trilateration problem[J]. Robotica, 29(3): 375-389, 2011.
- [5] 靳莹, 杨润泽. 声测定位技术的现状研究[J]. 电声技术, 2007(2): 4-8.
- [6] Wang W, Zhang Y, Tian L. TOA-based NLOS error mitigation algorithm for 3D indoor localization[J]. China Communications, 2020, 17(1): 63-72.
- [7] Xu Z, He D, Li J, et al. Correction method for TOA measurement of target signal based on Kalman Filter[C]. 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, 2017.
- [8] 钱志鸿, 孙大洋, Victor Leung, 无线网络定位综述, 计算机学报, 2016, 39(6): 1237-1256
- [9] 张令文, 杨刚. 超宽带室内定位关键技术[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(6): 706-713.
- [10] Khan M S, Iftikhar A, Shubair R M, et al. Eight-element compact UWB-MIMO/diversity antenna with WLAN band rejection for 3G/4G/5G communications [J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2020, 1: 196-206.
- [11] Gayatri T, Anveshkumar N, Sharma V K. A Compact planar UWB antenna for spectrum sensing in cognitive radio[C]. 2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE), Vellore, India, 2020.
- [12] Aragao A D J, Carvalho D D, Sanches B, et al. An improved confocal algorithm for breast cancer detection using UWB signals [C]. 2020 IEEE 11th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS), San Jose, Costa Rica, 2020.
- [13] Frank M, Lurz F, Kempf M, et al. Miniaturized ultra-wideband antenna design for human implants [C]. 2020 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), San Antonio, TX, USA, 2020.
- [14] 王雷, 郝建新, 陈蔚蔚. 基于TDOA和Kalman滤波的声音定位系统的设计[J]. 现代电子技术, 2018, 41(19): 161-164.
- [15] Cheng Y, Zhou T. UWB indoor positioning algorithm based on TDOA technology [C]. 2019 10th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME), Qingdao, China, 2019.
- [16] Foy W H. Position-location solutions by taylor-series estimation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1976, AES-12(2): 187-194.
- [17] Chan Y T, Ho K C. An efficient closed-form localization solution from time difference of arrival measurements [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, & Signal Processing, Icassp, 1994.
- [18] Sun D, Zhang H, Qian Z. A Non-Line-of-Sight mitigation localization algorithm for sensor networks using clustering analysis [J]. Computers & Electrical Engineering, 2013, 40(2), 433-442.
- [19] Zheng Y, Sheng M, Liu J, et al. Exploiting AoA estimation accuracy for indoor localization: a weighted AoA-based approach [J]. Wireless Communications Letters, IEEE, 2019, 8(1): 65-68.
- [20] Laxmikanth P, Susruthababu S, Surendra L, et al. Enhancing the performance of AOA estimation in wireless communication using the MUSIC algorithm [C]. International Conference on Signal Processing & Communication Engineering Systems, Guntur, 2015.
- [21] Li X. RSS-based location estimation with unknown pathloss model [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 5(12): 3626-3633.
- [22] Parameswaran A T, Husain M I, Upadhyaya S. Is RSSI a reliable parameter in sensor localization algorithms-an experimental study [J]. Field Failure Data Analysis Workshop (F2DA), 2009.
- [23] Elnahrawy E, Li X, Martin R P. The limits of localization using signal strength: a comparative study [C]. IEEE Second First IEEE Communications Society Conference on Sensor & Ad Hoc Communications & Networks, 2004.
- [24] Lee Y H, Lin C S. WiFi fingerprinting for indoor room localization based on CRF prediction [C]. 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), Xi'an, 2016.
- [25] Wei Z, Hua X, Yu K, et al. Domain clustering based WiFi indoor positioning algorithm [C]. International Conference on Indoor Positioning & Indoor Navigation, Alcalá de Henares, 2016.
- [26] Zhang S, Guo J, Wang W, et al. Indoor 2.5D positioning of WiFi based on SVM [C]. Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation & Location-Based Services, Wuhan, 2018.

- [27] Abd Rabbou M, El-Rabbany A. Tightly coupled integration of GPS precise point positioning and MEMS-based inertial systems [J]. *GPS Solutions*. 2015, 19(4): 601-609.
- [28] Beauregard S, Widyawan, Klepal M. Indoor PDR performance enhancement using minimal map information and particle filters [C]. *Position, Location and Navigation Symposium*, 2008 IEEE/ION, Monterey, CA, 2008.
- [29] Ju H J, Min S L, Chan G P, et al. Advanced heuristic drift elimination for indoor pedestrian navigation [C]. *International Conference on Indoor Positioning & Indoor Navigation*, Busan, 2014.
- [30] He K, Zhang Y, Zhu Y, et al. A hybrid indoor positioning system based on UWB and inertial navigation [C]. *2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, 2015.
- [31] Huang G, Visual-inertial navigation: a concise review [C]. *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, QC, Canada, 2019.
- [32] 贺伟, 梁昔明. 未知环境中移动机器人SLAM问题的研究进展[J]. *微计算机信息*, 2005(3): 179-180.
- [33] Wei W, Tan L, Jin G, et al. A survey of UAV visual navigation based on monocular SLAM [C]. *2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, Chongqing, China, 2018.
- [34] 李宇波, 朱效洲, 卢惠民, 等. 视觉里程计技术综述[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(8): 2801-2805.
- [35] Ruan J, Fang Z, Li B, et al. Evaluation of GP-SLAM in real-world environments [C]. *2019 Chinese Automation Congress (CAC)*, Hangzhou, China, 2019.
- [36] Chai M, Liu Y. A hybrid loop closure detection method based on lidar SLAM [C]. *2019 15th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS)*, Macao, 2019.
- [37] Chan S, Wu P, Fu L. Robust 2D indoor localization through laser SLAM and visual SLAM fusion [C]. *2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Miyazaki, Japan, 2018.
- [38] Jose L C V, Zhao Z, Braun T, et al. A particle filter-based reinforcement learning approach for reliable wireless indoor positioning [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, PP(99):1-1.
- [39] Li Z, Zhao X, Hu F, et al. SoICP: a seamless outdoor-indoor crowdsensing positioning system [J]. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019, 6(5): 8626-8644.
- [40] Dong Z, Wu Y, Sun D. Data fusion of the real time positioning system based on RSSI and TOF [C]. *International Conference on Intelligent Human-machine Systems & Cybernetics*, 2013.
- [41] Olsson F, Rantakokko J, Nygård J. Cooperative localization using a foot-mounted inertial navigation system and ultrawideband ranging [C]. *International Conference on Indoor Positioning & Indoor Navigation*, Busan, 2014.
- [42] Zwirello L, Li X, Zwick T, et al. Sensor data fusion in UWB-supported inertial navigation systems for indoor navigation [C]. *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, Germany, 2013.
- [43] Liang Q, Lin J, Liu M. Towards robust visible light positioning under LED shortage by visual-inertial fusion [C]. *2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Pisa, Italy, 2019.
- [44] Perttula A, Leppakoski H, Kirkko-Jaakkola M, et al. Distributed indoor positioning system with inertial measurements and map matching [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(11): 2682-2695.
- [45] Shu Y, Bo C, Shen G, C. Zhao, et al. Magicol: Indoor localization using pervasive magnetic field and opportunistic WiFi sensing [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 7(33): 1443-1457.
- [46] Li Z, Braun T, Zhao X, et al. A narrow-band indoor positioning system by fusing time and received signal strength via ensemble learning [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 9936-9950.
- [47] Wang X, Gao L, Mao S, et al. CSI-based fingerprinting for indoor localization: a deep learning approach [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016: 1-1.
- [48] Wang X, Gao L, Mao S. CSI phase fingerprinting for indoor localization with a deep learning approach [J]. *IEEE Internet of Things Journal*. 2016, 3(6): 1113-1123.
- [49] Niu J, Wang B, Shu L, et al. ZIL: An energy-efficient indoor localization system using ZigBee radio to detect WiFi fingerprints [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2015, 33(7): 1431-1442.
- [50] 刘光伟, 王巍, 祁贤雨, 等. 室内移动机器人主动SLAM技术研究[J]. *机械设计与制造*, 2020(3): 246-249.
- [51] 武悦. 基于WiFi信道状态信息的室内主动定位研究[J]. *无线互联科技*, 2018, 15(23): 15-16.
- [52] 吴哲夫, 周言. 基于信道状态信息的无源被动定位[J]. *传感技术学报*, 2015, 28(5): 677-683.

作者简介:



孙大洋(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为无线测量与定位, 室内定位与导航技术中的模型优化, 定位性能评估以及定位新体系构建。本文通信作者。



章荣炜(1997-), 男, 本科生, 主要研究方向为室内定位系统与算法、人工智能。



李赞(1986-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为基于无线信号与传感器融合的室内定位技术, 基于人工智能的智能通信。本文通信作者。

[引用格式] 丁明杰, 胡桥, 苏文斌, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的矢量推进水下机器人姿态解算方法研究[J]. 无人系统技术, 2020, 3(3): 47-55.

基于扩展卡尔曼滤波的矢量推进水下机器人姿态解算方法研究

丁明杰¹, 胡桥^{1,2,3}, 苏文斌^{1,2,3}, 李俊¹, 孙帅帅¹

(1. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049;
3. 陕西省智能机器人重点实验室 西安 710049)

摘要: 矢量推进水下机器人在复杂海况下执行探测与勘查等作业任务时常常会受到水流和波浪的随机扰动等一系列因素的影响, 同时其测量的数据噪声较大, 稳定性和精度较差。为解决上述问题, 通过扩展卡尔曼滤波(EKF)融合陀螺仪、磁强计和加速度计等传感器的数据来进行姿态角的解算。针对目前姿态解算算法计算量大、实时性差和收敛性不足的问题, 建立状态向量时, 考虑四元数本身以及角度测量偏差对四元数状态更新的影响, 提出了矢量推进水下机器人姿态解算新方法, 给出了其设计思路和实现步骤, 并结合实验平台, 对提出的姿态解算方法进行了实验验证。通过与互补滤波姿态解算方法在四种误差性能指标方面的综合比较, 充分验证了所提出的基于EKF的姿态解算方法精度高, 而且输出实时性良好, 适用于动态性能要求较高的水下机器人姿态信息解算。结果表明, 其在无人水下航行器进行复杂海况下高精度姿态控制中具有广阔的应用前景。

关键词: 水下机器人; 姿态解算; 互补滤波; 扩展卡尔曼滤波; 四元数

中图分类号: TJ630.1;TB71.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2020)03-47-09

Research on Attitude Solution of Vector Propulsion Underwater Vehicle Based on Extended Kalman Filter

DING Mingjie¹, HU Qiao^{1,2,3}, SU Wenbin^{1,2,3}, LI Jun¹, SUN Shuaishuai¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, China;
2. State Key Laboratory of Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, China;
3. Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Robots, Xi'an 710049, China)

Abstract: Vector propulsion underwater robots are often affected by a series of factors such as random disturbances of water flow and waves when performing tasks such as detection and exploration under complex sea conditions. At the same time, the data measured by its inertial measurement unit is relatively noisy, and the stability and accuracy are poor. In order to solve the above problems and perform more accurate attitude solution, in this paper, the Complementary filter and Extended Kalman filter are used to fuse the data of sensors such as gyroscope, magnetometer and accelerometer. In view of the inadequacy of the calculation amount, real-time performance and convergence of the current attitude solution algorithm, when establishing the state vector, this paper considers the influence of the quaternion itself and the angle measurement deviation on the quaternion state update. A new method for attitude calculation of vector propulsion underwater robot is proposed. And this paper shows its design ideas and implementation steps. Combined with the test platform, this paper also verify the feasibility of the attitude solution method. The comprehensive comparison with the complementary filtering attitude solution method in four error performance indicators fully verifies that the Extended

收稿日期:2020-03-11; 修回日期:2020-04-26

基金项目:陕西省重点研发计划重点项目资助(2018ZDXM-GY-111),装备预研领域基金项目(61404160503, 61402070304),国家自然科学基金重大项目(61890961),中央高校基本科研业务费(xjjgf2018005)

Kalman filter-based attitude solution method proposed in this paper has high accuracy and good real-time output, which is suitable for dynamic performance high-level underwater robot attitude information solution. The device has broad application prospects for high-precision attitude control under complex sea conditions.

Key words: Underwater Robot; Attitude Solution; Complementary Filter; Extended Kalman Filter; Quaternion

1 引言

21世纪是人类向海洋进军的世纪,地球上海洋占地球表面积的71%,具有重大战略意义。随着人类对海洋资源认识的逐步深入,开发和利用海洋资源已经成为各国重要的战略目标^[1]。由于海洋世界深水环境的复杂性以及不确定性,水下机器人在水下复杂作业任务中承担越来越重要的角色。矢量推进水下机器人具有航行机动性强、任务能耗低和环境适应性强等特点^[2]。水下机器人在复杂的海况下进行水底探测与勘查时常常会受到水流和波浪的随机扰动等一系列因素的影响,通过惯性测量单元获取姿态角,其测量的数据噪声较大,稳定性和精度低^[3]。因此,一般采用多传感器信息融合的方法来获取水下机器人的姿态^[4]。

目前多传感器融合算法包括:共轭梯度法、互补滤波、无迹卡尔曼滤波和EKF^[5]。南京航空航天大学孙金秋^[6]应用共轭梯度法进行姿态解算,收敛性较好,但是较大的运算量很难满足本文水下机器人应用场景;燕山大学吕印新^[7]采用互补滤波的方法进行姿态解算,但是在建立系统模型的时候没有考虑观测噪声的影响,不能持续获取稳定的姿态数据。Allotta B^[8]提出无迹卡尔曼滤波,有效避免了系统模型的线性误差,但在实际应用中,算法计算量过大,过程相对比较复杂,不易在微控制器中实现。Simanek J^[9]利用扩展卡尔曼法的非线性估计方法修正姿态角,通过多传感器的性能进行信息互容,实际系统中的扰动得到了有效的控制,但是同样存在发散和截断误差。

针对上述算法计算量、实时性和收敛性的不足,本文建立状态向量时,考虑四元数本身以及角度测量偏差对四元数状态更新的影响,提出基于EKF的姿态估计方法,并结合实验对所设计的姿态解算系统进行了验证。

2 系统设计

通过研究姿态解算方法可以进一步合理设计

矢量推进水下机器人控制系统,这对于水下机器人运动与作业的精准度、高效性起着关键作用^[10]。

2.1 水下机器人探测系统组成

如图1所示,水下机器人探测系统包括上位机、地面通讯基站和矢量推进水下机器人三部分。上位机的功能包括水下机器人运动指令的下达、运动状态数据记录以及探测任务模块信息如视频信息和声纳图像的显示。地面通讯基站涉及到图像的上传和信号的双向传输,由于信息量比较庞大,需要尽量缩短延迟以做到实时监测和控制。由于无线通信存在速率较慢、水下信号衰减严重的缺点,因此选择线缆通信。矢量推进水下机器人是执行任务的载体平台,携带侧扫声纳、高清摄像头、深度传感器等水下探测设备。采用两个分布式布置的矢量推进器作为动力来源,实现前进后退、左右偏航、定点自旋、定深定航等基本运动模式。



图1 水下机器人探测系统组成图

Fig. 1 Composition chart of underwater robot detection system

2.2 水下机器人的姿态解算方法

姿态解算是水下机器人控制系统设计的核心环节^[11]。水下机器人在水下执行探测与勘查等作业任务时常常会受到水流和波浪的随机扰动等一系列因素的影响,其测量的数据噪声较大,稳定性和精度较差。需要利用姿态估计算法,根据状态方程和测量方程融合陀螺仪、磁强计和加速度计等传感器的数据来进行姿态角的解算。

2.2.1 四元数更新算法

四元数 q 的微分方程 $\dot{q} = \Omega q$, 写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x^b & -\omega_y^b & -\omega_z^b \\ \omega_x^b & 0 & \omega_z^b & -\omega_y^b \\ \omega_y^b & -\omega_z^b & 0 & \omega_x^b \\ \omega_z^b & \omega_y^b & -\omega_x^b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $\omega^b = [\omega_x^b \ \omega_y^b \ \omega_z^b]^T$ 为利用传感器数据融合后得到的载体坐标系下的三轴角速度。

结合水下机器人执行作业任务的应用场景, 需要姿态解算方法达到实时性和高精度的要求。先通过多姿态传感器数据融合获取角速度, 然后采用一阶龙格库塔法进一步更新四元数^[12], 可得:

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}_{t+1} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}_t + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x^b & -\omega_y^b & -\omega_z^b \\ \omega_x^b & 0 & \omega_z^b & -\omega_y^b \\ \omega_y^b & -\omega_z^b & 0 & \omega_x^b \\ \omega_z^b & \omega_y^b & -\omega_x^b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}_t \quad (2)$$

2.2.2 基于互补滤波的姿态估计

由加速度计测定的姿态角在短时间内精度较差, 但是测量误差不随时间累加; 而由陀螺仪得到的姿态角一段时间后精度降低, 这是因为受到陀螺仪漂移的影响, 但短时间内可以提供高动态的姿态信息。互补滤波利用两者在频域上的互补特性, 通过加速度计和磁力计来补偿陀螺仪漂移所引起的姿态偏差。采用互补滤波器对加速度计和磁力计进行数据融合可提高姿态测量的精度和动态响应的速度。

互补滤波器大多采用比例或者比例-积分 (PI) 补偿的方法^[13]。取 $C(s) = K_p + K_i/s$, 在互补滤波器

中, 比例增益 K_p 的大小决定了滤波器的截止频率, 积分增益 K_i 的大小决定了滤波器消除静态误差的时间。基于互补滤波器的姿态求解算法原理如图2所示。

$$\begin{pmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{pmatrix} = C_n^b \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{cases} b_x = \sqrt{h_x^2 + h_y^2} \\ b_y = 0 \\ b_z = h_z \end{cases} \quad (4)$$

其中, (m_x, m_y, m_z) 为磁强计测量的地磁场的矢量归一化后的值, 将其转到导航坐标系中得到 (h_x, h_y, h_z) , 由于导航坐标系为北东地, 在 y 轴方向地磁场矢量应该为 0, 对 (h_x, h_y, h_z) 进行一次校准得导航坐标系下的地磁场矢量 (b_x, b_y, b_z) 。

$$\hat{v}_b = C_n^b \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中, \hat{v}_b 为互补滤波器对重力加速度的最优估计值; C_n^b 为从载体坐标系到导航坐标系的坐标转换矩阵。

$$\begin{cases} e = e_{\theta_y} + e_{\varphi} = \hat{a}_b \times \hat{v}_b + \hat{m}_b \times \hat{w}_b \\ \delta = K_p e + K_i \int e \\ \omega_b = \omega_g + \delta \end{cases} \quad (6)$$

其中, e 为姿态角的误差; e_{θ_y} 为横滚角和俯仰角的误差; e_{φ} 为偏航角的误差; δ 为误差 e 通过一个比例积分模块后生成的对陀螺漂移的补偿量; ω_g 为陀

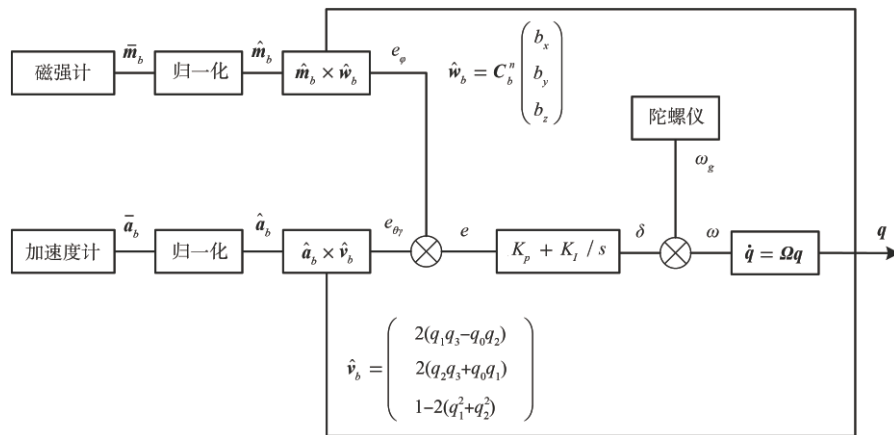


图2 基于互补滤波器的姿态求解算法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of attitude solving algorithm based on Complementary filter

螺仪测量得到的角速度; ω_b 为融合加速度计和磁强计数据校正后的角速度; \hat{a}_b 为加速度计测量得到的重力加速度; \hat{m}_b 为磁强计测量的地磁场矢量; \hat{w}_b 为互补滤波器估计的地磁场矢量。

将融合校正后的角速度代入公式就可得到随时间传递的准确的四元数,进而求得姿态矩阵和姿态角。因为互补滤波器对陀螺仪的高通作用,所以陀螺仪低频漂移的现象可以得到抑制,而低通作用则可以抑制加速度计的噪声。

2.2.3 基于EKF的姿态估计

卡尔曼滤波是一种基于状态空间法的滤波算法,它适用于线性、离散和有限维系统。

将目标状态方程表示为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{F}(t) \cdot \mathbf{X}(t-1) + \mathbf{w}(t) \quad (7)$$

量测方程表示为:

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{H}(t) \cdot \mathbf{X}(t) + \mathbf{v}(t) \quad (8)$$

其中, $\mathbf{X}(t)$ 为 t 时刻系统状态向量; $\mathbf{F}(t)$ 为 t 时刻系统状态转移矩阵; $\mathbf{Z}(t)$ 为 t 时刻系统量测向量; $\mathbf{H}(t)$ 为 t 时刻系统量测转移矩阵; $\mathbf{w}(t)$ 为过程噪声; $\mathbf{v}(t)$ 为观测噪声。定义 t 时刻系统过程噪声 $\mathbf{w}(t) \sim (0, Q)$, 量测噪声 $\mathbf{v}(t) \sim (0, R)$, 二者为相互独立的高斯白噪声。

卡尔曼滤波适合于解决线性数据融合问题。为了解决系统存在的非线性问题, EKF 利用泰勒级数展开原理, 对状态方程和量测方程求关于目标状态的一阶偏导并忽略二阶以上的高阶项来实现对方程的线性化处理。

离散时间系统的状态方程和观测方程可以表示为如下形式的差分方程:

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(k-1), \mathbf{u}(k-1), \mathbf{w}(k-1)] \quad (9)$$

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{h}[\mathbf{x}(k), \mathbf{v}(k)] \quad (10)$$

此时状态方程和观测方程后验估计表示为:

$$\bar{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{f}[\hat{\mathbf{x}}(k-1), \mathbf{u}(k-1), \mathbf{w}(k-1)] \quad (11)$$

$$\bar{\mathbf{z}}(k) = \mathbf{h}[\hat{\mathbf{x}}(k), \mathbf{v}(k)] \quad (12)$$

将上式(11)和上式(12)线性化, 得到:

$$\mathbf{x}(k) = \bar{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{F}[\mathbf{x}(k-1) - \hat{\mathbf{x}}(k-1) | k-1] + \mathbf{G}\mathbf{w}(k-1) \quad (13)$$

$$\mathbf{z}(k) = \bar{\mathbf{z}}(k) + \mathbf{H}[\mathbf{x}(k) - \bar{\mathbf{x}}(k)] + \mathbf{v}(k) \quad (14)$$

其中: \mathbf{F} 为 \mathbf{f} 对 \mathbf{X} 求偏导的雅可比矩阵; \mathbf{G} 为 \mathbf{f} 对 \mathbf{W} 求偏导的雅可比矩阵; \mathbf{H} 为 \mathbf{h} 对 \mathbf{X} 求偏导的雅可比

矩阵。

本文使用了基于四元数的EKF来进行水下机器人的姿态解算, 考虑四元数本身以及角度测量偏差对四元数状态更新的影响。为此建立了如下的状态向量:

$$\mathbf{X}(t) = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3 \ b_{gx} \ b_{gy} \ b_{gz}]^T \quad (15)$$

其中, $\mathbf{q} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ 为表示姿态信息的四元数; $\mathbf{b}_g = [b_{gx} \ b_{gy} \ b_{gz}]^T$ 为陀螺仪角速度测量偏差。

采用磁力计与加速度计作为四元数的融合信息, 定义测量向量为:

$$\mathbf{Z}(t) = [m_x \ m_y \ m_z \ a_x^g \ a_y^g \ a_z^g]^T \quad (16)$$

其中, $\mathbf{m}^b = [m_x \ m_y \ m_z]^T$ 为磁力计在载体坐标系下测得的三轴磁力分量; $\mathbf{a}^g = [a_x^g \ a_y^g \ a_z^g]^T$ 为重力加速度在载体坐标系下的分量。

建立状态向量 $\mathbf{X}(t)$ 的微分关系式如下:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}} &= \frac{1}{2} \boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{\omega}^b) \mathbf{q} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & b_{gx} - \omega_{gx}^b & b_{gy} - \omega_{gy}^b & b_{gz} - \omega_{gz}^b \\ \omega_{gx}^b - b_{gx} & 0 & \omega_{gz}^b - b_{gz} & b_{gy} - \omega_{gy}^b \\ \omega_{gy}^b - b_{gy} & b_{gz} - \omega_{gz}^b & 0 & \omega_{gx}^b - b_{gx} \\ \omega_{gz}^b - b_{gz} & \omega_{gy}^b - b_{gy} & b_{gx} - \omega_{gx}^b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $\boldsymbol{\omega}^b = [\omega_{gx}^b \ \omega_{gy}^b \ \omega_{gz}^b]^T$ 为陀螺仪测量的载体坐标系下的三轴角速度。

进而可得状态转移矩阵为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f'_0}{\partial q_0} & \dots & \frac{\partial f'_0}{\partial b_{gz}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f'_6}{\partial q_0} & \dots & \frac{\partial f'_6}{\partial b_{gz}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

由 $\mathbf{G} = \frac{\delta f(x_{t-1}, u_t, w_t)}{\delta w_t}$ 可以得到:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_q^q & \mathbf{0}_{4 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{F}_v^q \end{bmatrix}_{7 \times 7} \quad (19)$$

其中, \mathbf{F}_q^q 为四元数更新对自身状态转移的影响矩阵, \mathbf{F}_v^q 为四元数更新对角速度状态转移的影响矩阵。

$$\mathbf{F}_q^q = \begin{bmatrix} -0.5q_1 & -0.5q_2 & -0.5q_3 \\ 0.5q_0 & -0.5q_3 & 0.5q_2 \\ 0.5q_3 & 0.5q_0 & -0.5q_1 \\ -0.5q_2 & 0.5q_1 & 0.5q_0 \end{bmatrix}_{4 \times 3}$$

$$\mathbf{F}_V^q = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & 0 \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & 0 \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 4}$$

$$\begin{cases} F_{11} = q_1^2 - 0.5q_2 - 0.5q_3 + q_0^2 \\ F_{12} = 2q_1q_2 - 2q_0q_3 \\ F_{13} = 2q_1q_3 + 2q_0q_2 \\ F_{21} = 2q_1q_2 + 2q_0q_3 \\ F_{22} = 0.5q_2 - 0.5q_3 - q_1^2 + q_0^2 \\ F_{23} = 2q_2q_3 - 2q_0q_1 \\ F_{31} = 2q_1q_3 - 2q_0q_2 \\ F_{32} = 2q_2q_3 + 2q_0q_1 \\ F_{33} = 0.5q_3 - 0.5q_2 - q_1^2 + q_0^2 \end{cases}$$

对于磁力计来说,载体坐标系下的观测变量 $\mathbf{m}^b = [m_x \ m_y \ m_z]^T$ 与导航坐标系下的三轴磁场分量 \mathbf{m}^n 由如下关系:

$$\mathbf{z}_m = \mathbf{m}^b = \mathbf{C}_n^b(q) \frac{\mathbf{m}^n}{m} + \nu = \mathbf{h}_m(q) + \nu \quad (20)$$

其中, ν 为测量噪声, m 为地磁场向量的模, $\mathbf{m}^n = m[\cos\alpha \ 0 \ -\sin\alpha]^T$. α 为磁偏角。

以上参数可由地磁场模型得到,带入 $\mathbf{C}_n^b(q)$ 可得 $h(q)$ 为:

$$\mathbf{h}_m(q) = \begin{bmatrix} \cos\alpha - \cos\alpha(q_2^2 + q_3^2) + 2\sin\alpha(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2\cos\alpha(q_1q_2 - q_0q_3) + 2\sin\alpha(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2\cos\alpha(q_1q_3 + q_0q_2) + \sin\alpha - 2\sin\alpha(q_1^2 + q_2^2) \end{bmatrix} \quad (21)$$

根据上式可得磁力计的观测雅克比矩阵 \mathbf{H}_{mag} 为:

$$\mathbf{H}_{mag} = \frac{\delta \mathbf{h}_m(q)}{\delta q} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & H_{34} \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中:

$$\begin{cases} H_{11} = -2q_2 \sin\alpha \\ H_{12} = 2q_3 \sin\alpha \\ H_{13} = -4q_2 \cos\alpha - 2q_0 \sin\alpha \\ H_{14} = -4q_3 \cos\alpha + 2q_1 \sin\alpha \\ H_{21} = 2q_0 \sin\alpha \\ H_{22} = 2q_2 \cos\alpha + 2q_0 \sin\alpha \\ H_{23} = 2q_1 \cos\alpha + 2q_3 \sin\alpha \\ H_{24} = -2q_0 \cos\alpha + 2q_2 \sin\alpha \\ H_{31} = 2q_2 \cos\alpha \\ H_{32} = 2q_3 \cos\alpha - 4q_1 \sin\alpha \\ H_{33} = 2q_0 \cos\alpha - 4q_2 \sin\alpha \\ H_{34} = 2q_1 \cos\alpha \end{cases}$$

磁力计只能修正矢量推进水下机器人的偏航角,而修正水下机器人的俯仰角和翻滚角就需要利用重力加速度对于载体加速度的影响来修正了。

观测向量 $\mathbf{a}^g = [a_x^g \ a_y^g \ a_z^g]^T$ 可得:

$$\mathbf{a}^g = \mathbf{h}_a(q) = \mathbf{a}_a^b - \mathbf{a}^b = \mathbf{C}_n^b \frac{\mathbf{g}^n}{g} \quad (23)$$

观测函数 $\mathbf{h}_a(q)$ 为:

$$\mathbf{h}_a(q) = \begin{bmatrix} 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{bmatrix} \quad (24)$$

根据上式可得加速度计的观测雅克比矩阵

$$\mathbf{H}_a = \frac{\delta \mathbf{h}_a(q)}{\delta q} \text{ 为:}$$

$$\mathbf{H}_a = \begin{bmatrix} -2q_2 & 2q_3 & -2q_0 & 2q_1 \\ 2q_1 & 2q_0 & 2q_3 & 2q_2 \\ 0 & -4q_1 & -4q_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

综合磁力计与加速度计的观测矩阵,我们就可以得到总的观测矩阵为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{mag} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{H}_a & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 7} \quad (26)$$

如图3所示为EKF姿态解算整体流程图,通过融合多个传感器测量数据,能够更好地消除具有明显误差的传感器测量数据,更适用于水下机器人这类非线性系统;在构建状态向量时把角度偏差加进了状态向量,考虑了角度偏差对于状态更新的影响,来精确地估计水下机器人的姿态信息。EKF过程分为时间更新和量测更新,具体递推过程如下:

(1)一步预测目标状态更新:

$$\hat{\mathbf{X}}(k|k-1) = \mathbf{F}[\hat{\mathbf{X}}(k-1|k-1)] \quad (27)$$

(2)一步预测估计误差协方差:

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \mathbf{F}\mathbf{P}(k-1|k-1)\mathbf{F}^T + \mathbf{G}\mathbf{Q}(k-1)\mathbf{G}^T \quad (28)$$

(3)新息协方差矩阵:

$$\mathbf{S} = \mathbf{H}\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T + \mathbf{R} \quad (29)$$

(4)计算卡尔曼滤波增益:

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T\mathbf{S}^{-1} \quad (30)$$

(5)新息过程:

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= \mathbf{Z}(k) - \hat{\mathbf{Z}}(k|k-1) \\ &= \mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}\mathbf{X}(k|k-1) \end{aligned} \quad (31)$$

(6)由观测向量更新状态估计:

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + KV \quad (32)$$

(7)更新协方差估计:

$$P(k|k) = (I - KH)P(k|k-1) \quad (33)$$

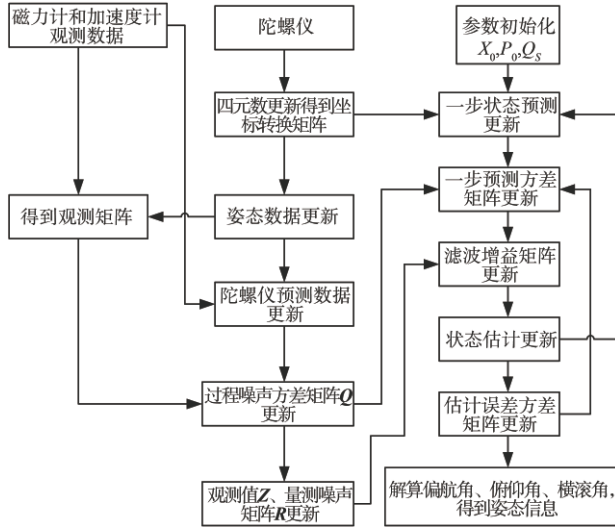


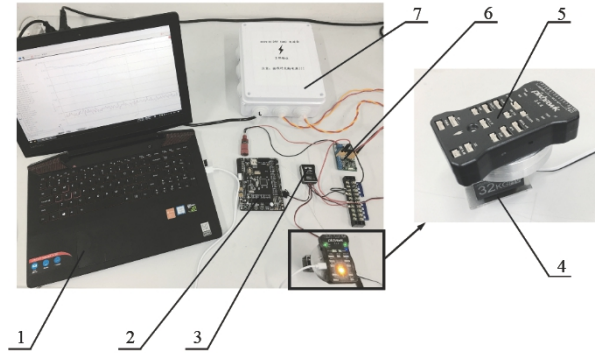
图3 EKF 姿态解算整体流程图

Fig. 3 Overall flowchart of Extended Kalman filtering attitude solution

3 实验分析及算法验证

本文矢量推进水下机器人所采用的Pixhawk 航行控制器包含的姿态传感器有L3GD20 3轴数字16位陀螺仪, LSM303D 3轴14位磁强计, MPU6000 6轴加速度计。姿态解算一共有三组实验。第一组为静态实验,用于比较互补滤波与EKF的静态性能;第二组为水平滑动实验,用于比较两种姿态估计算法在受非重力加速度因素干扰的情况下姿态

解算的精确性;第三组为动态实验,实验平台如图4所示,利用开发板控制舵机带动Pixhawk 航行控制器绕着三轴分别旋转,用于比较两种姿态估计算法的动态性能。评价参数为平均值、标准差、平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)四种性能指标。



1-上位机;2-STM32控制板;3-外置去电池电路电源转换;4-舵机平台;5-Pixhawk;6-电源管理板;7-稳压电源;

图4 姿态解算动态实验平台图

Fig. 4 Diagram of dynamic experimental platform for attitude solution

3.1 静态实验

在静态实验中,先对陀螺仪、磁强计以及加速度计进行校准,因为陀螺仪漂移现象的影响,短时间内可以提供高精度的姿态信息,但一段时间后精度降低。图5为陀螺仪在不采用滤波算法解算获得的姿态数据。可以看出在不进行算法补偿时,在静止情况下,单一陀螺仪解算的姿态角由时间的变化会持续发散,在600s的时长发散量已经超过了2°。

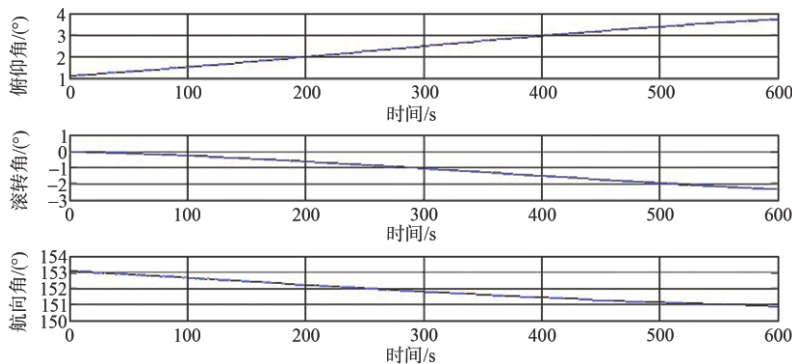


图5 静态下陀螺仪不采用滤波算法的漂移现象

Fig. 5 Drift phenomenon of gyro without filtering algorithm in static state

因此本文研究采用基于多传感器的信息融合算法解决这一问题,实验总时长为600s,通过截取最后60s左右的实验数据进行分析,比较EKF和互补滤波算法对于陀螺仪漂移现象的算法补偿效果。

在静止的条件下,分别测量互补滤波算法和EKF算法输出的三轴姿态信息如图6~8所示。

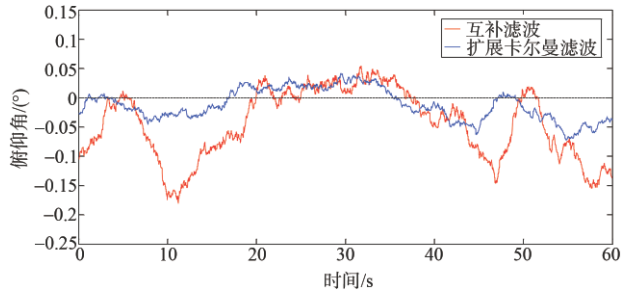


图6 静态实验俯仰角对比图

Fig. 6 Comparison of static experimental pitch angle

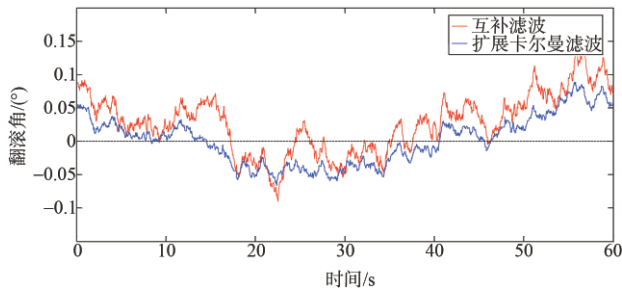


图7 静态实验翻滚角对比图

Fig. 7 Comparison of roll angles in static experiments

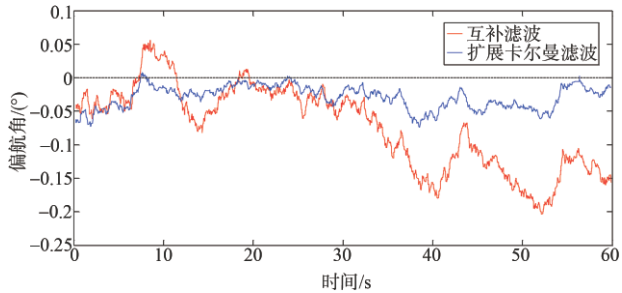


图8 静态实验偏航角对比图

Fig. 8 Comparison of static experimental yaw angle

在静态实验中,理想的偏航角、翻滚角以及俯仰角输出都应该为0°。以俯仰角为例,互补滤波的波动范围为-0.1802°~0.0544°,EKF的波动范围为-0.0724°~0.0416°,是互补滤波波动范围的48.59%。通过表1中EKF与互补滤波姿态解算方法在四种误差性能指标方面的综合比较,可以得出

在静态实验中EKF算法的姿态解算相比互补滤波更为精确,波动范围更小,且整体曲线更接近理想值的结论。

表1 静态实验两种算法数据比较

Table 1 Data comparison of two algorithms in static experiments

姿态估计 算法	姿态角	平均值 / $^{\circ}$	标准差 / $^{\circ}$	平均绝对误差	均方根 误差
互补滤波	俯仰角	-0.0707	0.0708	0.0799	0.1001
	翻滚角	-0.0284	0.0427	0.0431	0.0513
	偏航角	-0.0736	0.0624	0.0782	0.0965
扩展卡尔曼滤波	俯仰角	-0.0273	0.0363	0.0370	0.0454
	翻滚角	0.0046	0.0367	0.0315	0.0370
	偏航角	-0.0293	0.0174	0.0294	0.0341

3.2 水平滑动实验

水平滑动条件下姿态数据如图9~10所示。由图可得,当受到非重力加速度的作用时,互补滤波和EKF的姿态输出都会受到一定影响。

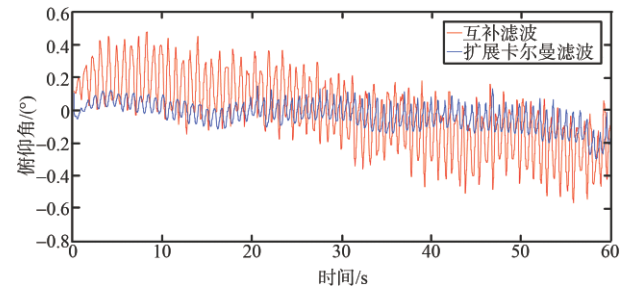


图9 水平滑动实验俯仰角对比图

Fig. 9 Comparison chart of elevation angle in horizontal sliding experiment

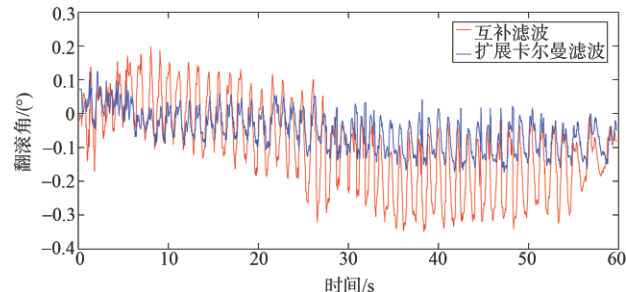


图10 水平滑动实验翻滚角对比图

Fig. 10 Comparison chart of roll angle in horizontal sliding experiment

水平滑动实验是将Pixhawk飞行控制器在水平面沿着任意的方向来回的滑动,是为了研究当存在

非重力运动加速度时,两种算法的俯仰角和翻滚角受到的影响程度,偏航角不是这一实验的研究对象。在水平滑动实验中,以翻滚角为例,互补滤波的波动范围为 $-0.3488^{\circ}\sim 0.1977^{\circ}$,EKF的波动范围为 $-0.1722^{\circ}\sim 0.1253^{\circ}$,是互补滤波波动范围的54.44%。通过表2可得水平滑动实验中EKF的姿态输出波动更小,而且总体的姿态数据更接近理想值。因此,EKF相对于互补滤波能够更有效的抑制非重力加速度对姿态解算的影响。

表2 水平滑动实验两种算法数据比较
Table 2 Data comparison of two algorithms in horizontal sliding experiment

姿态估计算法	姿态角	平均值 $\bar{I} (^{\circ})$	标准差 $\sigma (^{\circ})$	平均绝对误差	均方根误差
互补滤波	俯仰角	-0.0955	0.2455	0.2141	0.2634
	翻滚角	-0.1009	0.1255	0.1332	0.1610
扩展卡尔曼	俯仰角	-0.0456	0.0797	0.0735	0.0918
	翻滚角	-0.0526	0.0574	0.0640	0.0778

3.3 动态实验

在动态实验中,将Pixhawk 航行控制器绕着三轴分别旋转,使其俯仰角、翻滚角和偏航角在 $-20^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间变化,检测其动态性能。三轴姿态输出分布如图11~13所示。

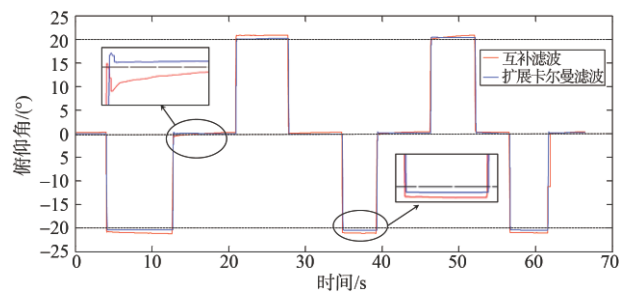


图11 动态实验俯仰角对比图

Fig. 11 Dynamic experiment pitch angle comparison chart

由图11~13可得,姿态剧烈变化的时候,互补滤波相比EKF有轻微的滞后,且有稳态误差。结合表3的相关指标可得,动态实验中EKF姿态角的平均绝对误差和均方根误差均低于互补滤波。EKF的姿态输出在转到两个极限角度时相比互补滤波精度更高,而且数据的保持性更好。

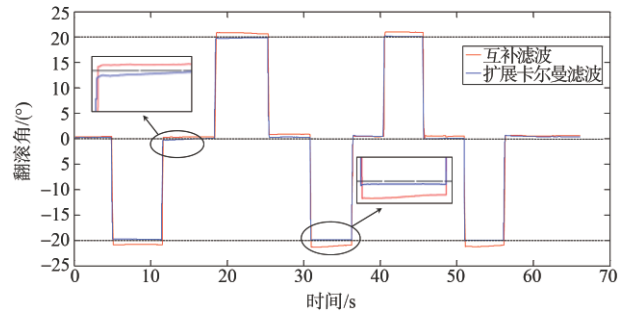


图12 动态实验翻滚角对比图

Fig. 12 Dynamic experiment roll angle comparison chart

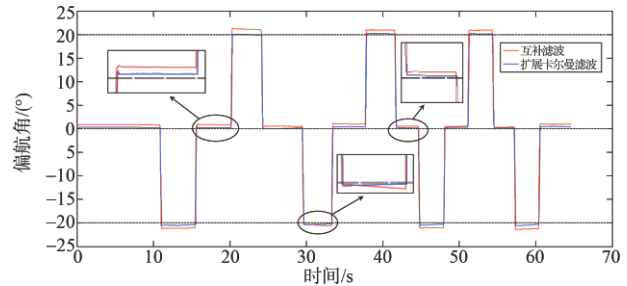


图13 动态实验偏航角对比图

Fig. 13 Dynamic experiment yaw angle comparison chart

表3 动态实验两种算法误差数据比较

Table 3 Comparison of error data of two algorithms in dynamic experiments

姿态估计算法	姿态角	平均值 $\bar{I} (^{\circ})$	标准差 $\sigma (^{\circ})$	平均绝对误差	均方根误差
互补滤波	俯仰角	-0.0266	0.6413	0.5293	0.6417
	翻滚角	0.1951	0.7563	0.7127	0.7809
	偏航角	0.3973	0.7787	0.8251	0.8741
EKF	俯仰角	-0.0232	0.2705	0.2154	0.2715
	翻滚角	0.1134	0.2034	0.2025	0.2616
	偏航角	0.0921	0.2943	0.2742	0.3084

4 结论

本文提出了基于EKF的矢量推进水下机器人姿态解算新方法,通过与互补滤波姿态解算方法在四种误差性能指标方面的综合比较,充分验证了本文提出的基于EKF姿态解算新方法的可行性和有效性,实验结果表明:

(1) 在静态实验中EKF算法的姿态解算相比互补滤波更为精确,波动范围更小,且整体曲线更接近理想值。

(2) 水平滑动实验中EKF的姿态输出波动更小,而且总体的姿态数据更接近理想值。说明EKF

相对于互补滤波能够更有效地抑制非重力加速度对姿态解算的影响。

(3) 动态实验中EKF姿态角的平均绝对误差和均方根误差均低于互补滤波。EKF的姿态输出在转到两个极限角度时相比互补滤波精度更高,而且数据的保持性更好。

综上,为了解决目前姿态解算算法计算量大、实时性和收敛性差的问题,本文采用EKF建立状态向量时,考虑四元数本身以及角度测量偏差对四元数状态更新的影响,经过实验证明,EKF在水下机器人姿态解算中不仅精度高于互补滤波,而且输出实时性良好,适用于动态性能要求较高的水下机器人姿态信息解算。

本文研究了基于EKF的矢量推进水下机器人姿态解算方法,实际工作中水下机器人的定点作业和区域巡航往往还需要精确的位置和速度信息,后续可以通过布放超短基线定位系统等装置获得水下机器人的位置数据,然后利用多传感器融合技术估计精准的位置、速度和姿态综合运动信息,这将是今后进一步的研究方向。

参考文献

- [1] Khojasteh D, Kamali R. Design and dynamic study of a ROV with application to oil and gas industries of Persian Gulf[J]. Ocean Engineering, 2017, 136: 18-30.
- [2] Eslami M, Chin C S, Nobakhti A. Robust modeling, sliding-mode controller, and simulation of an underactuated ROV under parametric uncertainties and disturbances[J]. Journal of Marine Science and Application, 2019, 18(2):213-227.
- [3] Wadi A, Lee J H, Mukhopadhyay S. Modeling and system identification of an autonomous underwater vehicle [C]. International Symposium on Mechatronics & Its Applications. IEEE, Sharjah, 2018.
- [4] 史兴波. 基于多传感器信息融合的小型AUV组合导航系统研究与实现[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2017.
- [5] Xu Y, Liu W, Ding X, et al. USBL positioning system based adaptive kalman filter in AUV[C]. 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean (OTO). IEEE, Kobe, 2018.
- [6] 孙金秋, 游有鹏, 傅忠云. 基于共轭梯度法和互补滤波相结

合的姿态解算算法[J]. 传感技术学报, 2014(4): 108-112.

- [7] 吕印新, 肖前贵, 胡寿松. 基于四元数互补滤波的无人机姿态解算[J]. 燕山大学学报, 2014, (2): 175-180.
- [8] Allotta B, Caiti A, Chisci L. An unscented Kalman filter based navigation algorithm for autonomous underwater vehicles [J]. Mechatronics, 2016, 39: 185-195.
- [9] Simanek J, Reinstein M, Kubelka V. Evaluation of the EKF-Based Estimation Architectures for Data Fusion in Mobile Robots [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(2): 985-990.
- [10] Hieu N K, Thien P Q, Nghia N H. Numerical analysis of LBV150 ROV thruster performance under open water test condition [C]. International Conference on Advanced Engineering Theory and Applications, Cham, 2017.
- [11] 康昌霖. 作业型水下自主机器人系统开发及其姿态控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [12] 牛志超. 基于多传感器融合的水下机器人定位与路径规划研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- [13] Wu J, Zhou Z, Fourati H, et al. Generalized linear quaternion complementary filter for attitude estimation from multisensor observations: An optimization approach [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16(3): 1330-1343.

作者简介:



丁明杰(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水下机器人总体设计与控制技术。



胡桥(1977-), 男, 博士后, 教授, 主要研究方向为水下机器人理论与技术。本文通信作者。



苏文斌(1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能感知及特种机器人研究。



李俊(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉与水下机械手相关技术。



孙帅帅(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水下电场通讯理论与技术。

[引用格式] 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.

基于轨迹线性化的高超声速飞行器非线性姿态控制

邵星灵^{1,2}, 刘俊^{1,2}, 李东光³

(1. 中北大学仪器与电子学院, 太原 030051; 2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051;
3. 中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 针对强非线性、强耦合、强不确定特性的高超声速飞行器姿态控制问题, 提出了具有非线性前馈补偿与闭环反馈功能的高超声速飞行器轨迹线性化非线性姿态控制方法。首先, 为方便控制器设计, 给出了面向控制的高超声速飞行器姿态运动/动力学模型与问题描述。其次, 阐述了轨迹线性化与基于小扰动线性化、切换增益的控制方法相比在非线形控制方面的性能优势, 并运用轨迹线性化控制思想和时标分离原则在姿态和角速率回路分别设计了虚拟控制量和控制力矩, 实现了有限干扰下再入全程的非线性姿态跟踪控制。最后, 仿真结果验证了所提方法能够确保再入过程高超声速飞行器姿态快速、稳定地跟踪预设指令。

关键词: 非线性控制; 高超声速飞行器; 轨迹线性化; 姿态控制; 强不确定性

中图分类号: TP13 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2020)03-56-11

Nonlinear Attitude Control for Hypersonic Vehicles Based on Trajectory Linearization

SHAO Xingling^{1,2}, LIU Jun^{1,2}, LI Dongguang³

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the attitude control problem of hypersonic vehicles with strong nonlinearity, strong coupling and strong uncertainties, a nonlinear attitude control for hypersonic vehicles using trajectory linearization (TL) with nonlinear feedforward compensation and closed-loop feedback method is proposed. Firstly, for the convenience of controller design, a control oriented attitude motion/dynamics model of hypersonic vehicles and problem formulation are given. Secondly, the performance advantages of trajectory linearization outperforming the small perturbation linearization and switching time-varying gain based control schemes are illustrated. Based on the idea of TL and time-scale separation principle, the virtual control law and actual control moment are designed in the attitude and angular rate loop respectively, and the nonlinear attitude tracking control is realized for the whole reentry process with limited interference. Finally, the simulation results verify that the proposed method can ensure the attitude of hypersonic vehicles follow the predesigned reference rapidly and stably during reentry.

Key words: Nonlinear Control; Hypersonic Vehicle; Trajectory Linearization; Attitude Control; Strong Uncertainties

收稿日期: 2020-02-01; 修回日期: 2020-04-12

基金项目: 山西省“1331工程”重点学科建设计划; 国家自然科学基金青年基金项目(61803348); 中北大学青年学术带头人支持计划(QX201803); 山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划; 毁伤技术重点学科实验室开放研究基金(DXMBJJ2019-01); 山西省高等学校科技创新项目(2020L0266)

1 引言

作为21世纪航空航天领域最受关注的研究方向,近空间高超声速飞行器已逐渐成为各军事大国为争夺未来制空天权而竞相发展的热点。20世纪90年代以来,美国、俄罗斯、法国、德国、印度、澳大利亚和中国陆续取得了高超声速飞行技术上的重大突破和重要进展,特别是美国已进行了多次相关飞行试验。目前具有代表性的高超声速研究计划项目主要有美国的HTV-2和X-51A等。近空间高超声速飞行器复杂的动力学特性,未知的飞行环境和严格的控制约束给飞行控制提出了前所未有的挑战。传统飞行控制所采用的小扰动线性化和冻结系数技术、基于线性控制理论的飞行控制律设计技术、纵向、横侧向解耦控制技术以及通过设计过程的稳定裕度设计实现一定程度上的鲁棒性等方法不再适用,必须研究适应其强非线性、强耦合、快时变、强不确定性的飞行控制技术。同时,近空间高超声速飞行器飞行过程中由于热流的苛刻限制以及吸气式超然冲压发动机的特殊要求,对于攻角、侧滑角、倾侧角等姿态控制提出了很高的要求。为应对这种挑战,国内外开展了大量针对性的研究工作,取得了一系列有价值的研究成果^[1-6]。

轨迹线性化控制(Trajectory Linearization Control, TLC)是在20世纪90年代中后期逐步建立并发展起来的一种有效新颖的非线性跟踪和解耦控制方法^[7-9]。其主要思想是依据标称轨迹表征的标称模型,通过开环前馈求伪逆获取标称控制量,将实际轨迹与标称轨迹的偏差沿标称轨迹进行线性化,并借助PD谱调节理论对该偏差设计误差反馈镇定器。由于其特定的控制结构(开环前馈求伪逆+闭环反馈调节跟踪误差),使得系统输出沿着标称轨迹指数稳定,从而保证了TLC具有一定的鲁棒性,目前已被成功应用于空天飞行器^[7-8]以及全向行走机器人^[9]、垂直起降无人机^[10]、带参数不确定性的直升机^[11]、固定翼无人机^[12]控制等系统。

俄亥俄大学的Zhu等^[7]首次将TLC应用到X-33再入段的姿态控制中,依据给定的制导指令,通过设计飞行器的伪逆模型获得系统的标称轨迹,在此基础上,构建基于误差动态的线性时变系统,并利用PD特征值方法设计控制律,实现了对姿态

跟踪误差的有效调节。Bevacqua等^[13]在轨迹线性化设计中,通过引入时变带宽算法,在实现姿态控制的同时,提高了系统在执行器饱和及高动压等极限状态下的控制性能。此外,TLC能够通过时变带宽技术来增强系统的控制性能,改善其鲁棒性。Liu等^[14]首次将自适应神经网络理论框架与TLC相结合,通过设计Lyapunov函数构造控制律及自适应律,以抵消可参数化不确定性对系统的影响。朱亮等^[15]针对空天飞机的姿控问题,研究了基于单隐层神经网络(SHLNN)的直接自适应TLC控制方法,采用Lyapunov理论设计了神经网络自适应律,通过权值的在线调节,结合神经网络对不确定非线性的良好泛化能力,使得输出可以自适应抵消不确定的影响,并取得了较好的结果。文献^[16]在^[15]的基础上研究了一种新的鲁棒自适应TL控制策略,可以降低文献^[15]中控制器设计时的保守性,避免了因参数选取不当导致过高的控制增益等问题。类似地,薛雅莉等^[17]针对空天飞机的姿控问题,研究了基于径向基神经网络干扰观测器的TL控制策略,设计了自适应调节律。

本文针对强非线性、强耦合、强不确定特性的高超声速飞行器姿态控制问题,提出了具有非线性前馈补偿与闭环反馈功能的高超声速飞行器轨迹线性化非线性姿态控制方法。为方便控制器设计,给出了面向控制的高超声速飞行器姿态运动/动力学模型,分析了轨迹线性化在非线形控制方面的性能优势,基于TL思想在姿态和角速率回路分别设计虚拟控制量和控制力矩,实现了有限干扰下再入全程的非线性姿态跟踪控制。最后,仿真结果验证了本文所提方法的有效性。

2 面向控制的高超声速飞行器模型及问题描述

本文主要研究再入段高超声速飞行器的大跨度机动控制问题,此时发动机已关闭,仅靠气动舵提供操纵力矩。在建模过程中忽略飞行器结构弹性模态的影响,同时充分考虑多源不确定性对姿态及角速率回路的影响。选取输出状态变量 $X_1 = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T$,各分量分别代表攻角、侧滑角及倾侧角, $X_2 = [w_x \ w_y \ w_z]^T$,各分量分别为滚转、偏航及

俯仰角速率,选取辅助状态变量 $\mathbf{X}_3 = [H \ V \ \theta]^T$, 各分量分别代表再入高度、速度及航迹倾角,控制变量 $\mathbf{U} = [\delta_x \ \delta_y \ \delta_z]^T$,各分量分别代表副翼、方向舵及升降舵角度,姿态和角速率系统的干扰分别为

$\mathbf{d}_1 = [d_\alpha \ d_\beta \ d_{\gamma_s}]^T, \mathbf{d}_2 = [d_{w_x} \ d_{w_y} \ d_{w_z}]^T$,并且定义动压 $Q = 1/2\rho V^2$ 。为方便控制器设计,将高超声速飞行器姿态和角速率子系统描述为如下带多源不确定性的严格反馈形式^[1-2]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_1 = \mathbf{F}_1(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_3) + \mathbf{B}_1(\mathbf{X}_1)\mathbf{X}_2 + \mathbf{d}_1 \\ \dot{\mathbf{X}}_2 = \mathbf{F}_2(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2) + \mathbf{B}_2(\mathbf{X}_1)\mathbf{U} + \mathbf{d}_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\mathbf{F}_1(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_3) = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_\alpha(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_3) \\ \mathbf{F}_\beta(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_3) \\ \mathbf{F}_{\gamma_s}(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{QS_{\text{ref}}c_{L,0}}{mV\cos\beta} - \frac{QS_{\text{ref}}c_L^\alpha\alpha}{mV\cos\beta} + \frac{g\cos\gamma_s\cos\theta}{V\cos\beta} \\ \frac{QS_{\text{ref}}c_z^\beta\beta}{mV} + \frac{g\sin\gamma_s\cos\theta}{V} \\ \frac{QS_{\text{ref}}(c_{L,0} + c_L^\alpha\alpha)(\tan\beta + \sin\gamma_s\tan\theta) + QS_{\text{ref}}c_z^\beta\beta\cos\gamma_s\tan\theta}{mV} \\ -\frac{g\cos\gamma_s\cos\theta\tan\beta}{V} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_1(\mathbf{X}_1) = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_\alpha(\mathbf{X}_1)^T \\ \mathbf{B}_\beta(\mathbf{X}_1)^T \\ \mathbf{B}_{\gamma_s}(\mathbf{X}_1)^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\alpha\tan\beta & \sin\alpha\tan\beta & 1 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ \cos\alpha\sec\beta & -\sin\alpha\sec\beta & 0 \end{bmatrix}$$

$$d_\alpha = \Delta\mathbf{F}_\alpha(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_3) + \Delta\mathbf{B}_\alpha(\mathbf{X}_1)^T \mathbf{X}_2 = -\frac{QS_{\text{ref}}\Delta c_{L,0}}{mV\cos\beta} - \frac{\Delta\rho VS_{\text{ref}}c_{L,0}}{2m\cos\beta} - \frac{QS_{\text{ref}}\Delta c_L^\alpha\alpha}{mV\cos\beta} - \frac{\Delta\rho VS_{\text{ref}}c_L^\alpha\alpha}{2m\cos\beta} - \frac{QS_{\text{ref}}c_L^\alpha\delta_z}{mV\cos\beta}$$

$$d_\beta = \Delta\mathbf{F}_\beta(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_3) + \Delta\mathbf{B}_\beta(\mathbf{X}_1)^T \mathbf{X}_2 = \frac{QS_{\text{ref}}\Delta c_z^\beta\beta}{mV} + \frac{\Delta\rho VS_{\text{ref}}c_z^\beta\beta}{2m} + \frac{QS_{\text{ref}}c_z^\beta\delta_x}{mV} + \frac{QS_{\text{ref}}c_z^\beta\delta_y}{mV}$$

$$d_{\gamma_s} = \Delta\mathbf{F}_{\gamma_s}(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_3) + \Delta\mathbf{B}_{\gamma_s}(\mathbf{X}_1)^T \mathbf{X}_2 = \frac{QS_{\text{ref}}(\Delta c_{L,0} + \Delta c_L^\alpha\alpha)(\tan\beta + \sin\gamma_s\tan\theta)}{mV} + \frac{\Delta\rho VS_{\text{ref}}(c_{L,0} + c_L^\alpha\alpha)(\tan\beta + \sin\gamma_s\tan\theta)}{2m} + \frac{QS_{\text{ref}}\Delta c_z^\beta\beta\cos\gamma_s\tan\theta}{mV} + \frac{\Delta\rho VS_{\text{ref}}c_z^\beta\beta\cos\gamma_s\tan\theta}{2m}$$

$$\mathbf{F}_2(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2) = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{w_x}(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2) \\ \mathbf{F}_{w_y}(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2) \\ \mathbf{F}_{w_z}(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(I_y - I_z)}{I_x} w_y w_z + \frac{m_x^\beta \beta QS_{\text{ref}} l}{I_x} \\ \frac{(I_z - I_x)}{I_y} w_z w_x + \frac{m_y^\beta \beta QS_{\text{ref}} l}{I_y} \\ \frac{(I_x - I_y)}{I_z} w_y w_x + \frac{m_z^\alpha \alpha QS_{\text{ref}} l}{I_z} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_2(\mathbf{X}_1) = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{w_x}(\mathbf{X}_1)^T \\ \mathbf{B}_{w_y}(\mathbf{X}_1)^T \\ \mathbf{B}_{w_z}(\mathbf{X}_1)^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{QS_{\text{ref}} l m_x^{\delta x}}{I_x} & \frac{QS_{\text{ref}} l m_x^{\delta y}}{I_x} & 0 \\ \frac{QS_{\text{ref}} l m_y^{\delta x}}{I_y} & \frac{QS_{\text{ref}} l m_y^{\delta y}}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{QS_{\text{ref}} l m_z^{\delta z}}{I_z} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
d_{w_x} &= \Delta F_{w_x}(X_1, X_2) + \Delta B_{w_x}(X_1)^T X_2 \\
&= \Delta \frac{(I_y - I_z)}{I_x} w_y w_z + \frac{\Delta m_x^\beta \beta Q S_{\text{ref}} l}{I_x} + \frac{\Delta \rho m_x^\beta \beta V^2 S_{\text{ref}} l}{2I_x} \\
&\quad + \frac{Q S_{\text{ref}} l \Delta m_x^{\delta x}}{I_x} \delta_x + \frac{\Delta \rho V^2 S_{\text{ref}} l m_x^{\delta x}}{2I_x} \delta_x + \frac{Q S_{\text{ref}} l \Delta m_x^{\delta y}}{I_x} \delta_y \\
&\quad + \frac{\Delta \rho V^2 S_{\text{ref}} l m_x^{\delta y}}{2I_x} \delta_y \\
d_{w_y} &= \Delta F_{w_y}(X_1, X_2) + \Delta B_{w_y}(X_1)^T X_2 \\
&= \Delta \frac{(I_x - I_z)}{I_y} w_z w_x + \frac{\Delta m_y^\beta \beta Q S_{\text{ref}} l}{I_y} + \frac{\Delta \rho m_y^\beta \beta V^2 S_{\text{ref}} l}{2I_y} \\
&\quad + \frac{Q S_{\text{ref}} l \Delta m_y^{\delta x}}{I_y} \delta_x + \frac{\Delta \rho V^2 S_{\text{ref}} l m_y^{\delta x}}{2I_y} \delta_x + \frac{Q S_{\text{ref}} l \Delta m_y^{\delta y}}{I_y} \delta_y \\
&\quad + \frac{\Delta \rho V^2 S_{\text{ref}} l m_y^{\delta y}}{2I_y} \delta_y \\
d_{w_z} &= \Delta F_{w_z}(X_1, X_2) + \Delta B_{w_z}(X_1)^T X_2 \\
&= \Delta \frac{(I_x - I_y)}{I_z} w_y w_x + \frac{\Delta m_z^\alpha \alpha Q S_{\text{ref}} l}{I_z} + \frac{\Delta \rho m_z^\alpha \alpha V^2 S_{\text{ref}} l}{2I_z} \\
&\quad + \frac{Q S_{\text{ref}} l \Delta m_z^{\delta z}}{I_z} \delta_z + \frac{\Delta \rho V^2 S_{\text{ref}} l m_z^{\delta z}}{2I_z} \delta_z
\end{aligned}$$

其中, $F_1(X_1, X_3)$ 表示描述姿态环运动学的动态系统矩阵, 三个分量 $F_\alpha(X_1, X_3)$ 、 $F_\beta(X_1, X_3)$ 和 $F_\gamma(X_1, X_3)$ 分别代表描述姿态环俯仰、偏航与滚转通道运动学的动态系统项; $B_1(X_1)$ 表示描述姿态环静态耦合的输入矩阵, 三个分量 $B_\alpha(X_1)^T$ 、 $B_\beta(X_1)^T$ 和 $B_\gamma(X_1)^T$ 分别代表描述姿态环俯仰、偏航

与滚转通道静态耦合的输入项; $F_2(X_1, X_2)$ 表示描述角速率环动力学的动态系统矩阵, 三个分量 $F_{w_x}(X_1, X_2)$ 、 $F_{w_y}(X_1, X_2)$ 和 $F_{w_z}(X_1, X_2)$ 分别表示描述角速率环滚转、偏航与俯仰通道动力学的动态系统项; $B_2(X_1)$ 表示描述角速率环静态耦合的输入矩阵, 三个分量 $B_{w_x}(X_1)^T$ 、 $B_{w_y}(X_1)^T$ 和 $B_{w_z}(X_1)^T$ 分别代表描述姿态环滚转、偏航与俯仰通道静态耦合的输入项。

3 基于轨迹线性化的高超声速飞行器非线性姿态控制策略

根据时标分离原则, 高超声速飞行器姿态控制回路分解为姿态慢回路和角速率快回路, 姿态慢回路的控制是以再入制导指令(攻角、侧滑角及倾侧角)为标称参考指令, 基于TL思想设计虚拟控制量(俯仰、偏航和滚转角速率)并作为角速率环的标称参考指令, 实现再入全程的非线性姿态跟踪控制; 类似地, 角速率快回路的控制是以慢回路生成的参考指令为输入, 通过TL快回路控制器生成期望的气动舵偏角指令实现对再入全程三通道角速率的快速响应与跟踪。姿态环和角速率环控制回路均采用相似的控制结构, 即开环控制器(求伪逆)+闭环控制器(跟踪误差稳定调节器), 其控制结构框图如图1所示。

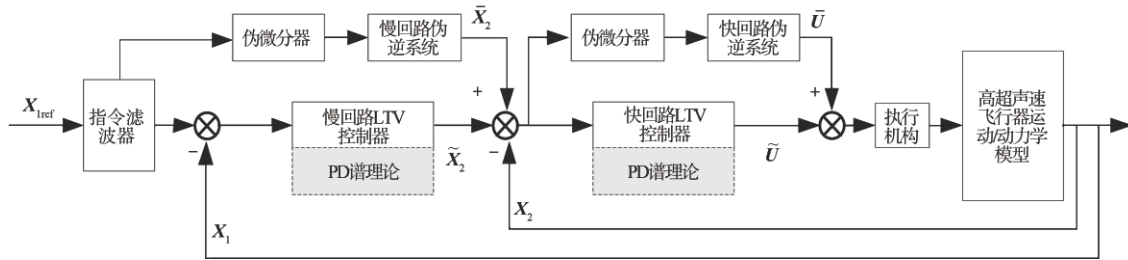


图1 基于轨迹线性化控制的姿态控制结构框图

Fig. 1 Attitude control structure diagram based on trajectory linearization

3.1 轨迹线性化控制的性能优势

与基于小扰动线性化高超模型设计的增益调度或切换变增益控制方法相比, TL在设计思路和鲁棒性方面均具有明显的性能优势。与小扰动线性化方法相比, 轨迹线性化相当于在标称轨迹上每一

点都进行线性化, 不需要为插值计算的增益预置控制器, 线性化的步长可人为设定; 小扰动线性化只针对某平衡状态进行线性化分析与设计, 仅能代表该平衡状态邻域内的局部信息, 上述两方法的示意图如图2所示。

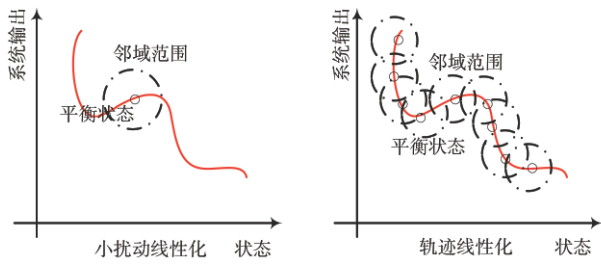


图2 小扰动线性化与轨迹线性化设计原理示意

Fig. 2 Design principles of small perturbation linearization and trajectory linearization

小扰动线性化方法的本质在于:首先将实际轨迹 $y(\cdot)$ 在平衡状态 \bar{x} 线性化,得到可表征 \bar{x} 邻域内的标称模型,当状态偏离平衡状态 δx 时,线性化模型的输出为 $y(\bar{x}) + \dot{y}(\bar{x})\delta x$,当实际轨迹非线性较强时,线性化模型与实际模型的输出误差明显增加。可见随着状态的远离,线性化模型难以代表实际轨迹。若在不同平衡点对飞行器模型线性化,针对高超声速飞行器、大包线、强非线性、强耦合的姿态控制问题,常规PID控制方法的设计过程将会变得更加复杂,体现在:(1)平衡点的选取较复杂,针对每个平衡点进行小扰动线性化的分析与设计工作将变得异常繁琐;(2)不同平衡状态之间需要进行增益调参,可能需要大量的插值计算;(3)不同平衡状态过渡时的控制律平稳切换也是需要重点考虑的问题。相反,由于轨迹线性化沿着标称轨迹进行,其线性化步长足够小,线性化后的时变状态方程的控制律采用统一的期望跟踪误差特性来求解,当然就不存在过渡状态间的控制律平稳切换问题,因此轨迹线性化可以在线自动给出参考轨迹中每一点的增益,可视为理想的、不需要插值计算的增益预置控制器。

从控制方法的鲁棒性来看,由于常规PID方法中单纯依靠系统输入、输出信息(不依赖于被控对象的数学模型),采用基于误差的调节机制,具有一定的稳定裕度。针对小扰动线性化模型,常规PID方法需要克服以下两种误差:(1)实际状态偏离平衡点的设计误差;(2)参数摄动和其他不确定性的影响。相反,对于轨迹线性化来说,由于其沿着标称轨迹进行线性化,不存在平衡点的概念以及实际状态偏离平衡点的设计误差,故轨迹线性化与常规PID方法相比,仅需克服参数摄动和其他不确定性

的影响,因而具有更强的鲁棒性。并且,标称轨迹的构造(开环前馈求伪逆)有效利用了被控对象的信息,使得实际系统在前馈+反馈的综合作用下沿着标称轨迹运动并具有较好的控制性能。

此外,与具有相似动态结构的非线性控制器(如动态逆、反馈线性化等)相比,TL的特色和优势在于:

(1)可以给出参考轨迹中每一点的增益,因此可视为理想的、不需要插值计算的增益预置控制器;

(2)可以使得闭环系统获得指数稳定,对系统中存在的各种扰动都具有鲁棒性;

(3)时变带宽技术是其区别于其他非线性控制方法的一大技术特色,它允许控制器通过在线调整闭环系统带宽提高系统的抗干扰能力,改善控制性能;

(4)与非线性动态逆相比,轨迹线性化中对象的伪逆作为一种前馈式的开环控制器独立于被控对象,这使得该方法可以应用于某些非最小相位系统。

3.2 基于轨迹线性化的姿态回路控制器设计

基于TL的设计思路和步骤,在不存在不确定性的情况下,针对建立的高超声速飞行器的姿态动态模型,对于姿态控制回路而言,输入参考指令为再入制导程序生成的三通道气流角 X_{ref} ,通常为为保证控制品质以避免初始过大的跟踪误差对执行机构造成较大冲击,姿态控制回路的标称指令 $\bar{X}_1 = [\bar{\alpha} \quad \bar{\beta} \quad \bar{\gamma}_s]^T$ 由参考输入指令 X_{ref} 输入如下的一阶指令滤波器获得:

$$G_{smooth} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (2)$$

其中, s 是 Laplace 算子, T 为指令滤波器的时间常数。

进而,姿态环的标称控制量 \bar{X}_2 可由姿态动态的标称模型求伪逆推导出:

$$\bar{X}_2 = B_1^{-1}(\bar{X}_1)(\dot{\bar{X}}_1 - F_1(\bar{X}_1, X_3)) \quad (3)$$

需要注意的是,上式中参与计算的均为状态变量的标称值,辅助参量 X_3 由飞行器机载传感器测量得到。为了保证系统的因果性,TL方法中姿态标称指令的微分 $\dot{\bar{X}}_1$ 将由 \bar{X}_1 经过如下伪微分器求得:

$$\dot{\tilde{X}}_1 = G_{\text{diff}} \tilde{X}_1, \quad G_{\text{diff}} = \frac{w_{\text{diff}} s}{s + w_{\text{diff}}} \quad (4)$$

其中, w_{diff} 为伪微分器的带宽。进一步, 将上述伪微分器写成如下形式:

$$\dot{\tilde{X}}_1 = w_{\text{diff}} \left(1 - \frac{w_{\text{diff}}}{s + w_{\text{diff}}}\right) \tilde{X}_1 = w_{\text{diff}} \left(\tilde{X}_1 - \frac{\dot{\tilde{X}}_1}{s}\right) \quad (5)$$

不难发现, 该伪微分器的本质是以比例控制的方式实现信号 $\dot{\tilde{X}}_1/s$ 对输入 \tilde{X}_1 的精确跟踪, 由于该情况下输入指令的噪声以 w_{diff} 为放大倍数传递给微分器, 因而该微分求解方式对输入噪声较为敏感, 在选取时应保证给定的标称指令可以通过, 同时又可以抑制高频噪声。

为确保姿态输出沿着姿态标称指令 \tilde{X}_1 稳定运动, 必须针对姿态环的线性时变系统设计相应的闭环姿态误差镇定律来实时消除截断误差及系统不确定性引起的跟踪偏差。定义姿态环的跟踪误差为:

$$\begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta & e_{\gamma_s} \end{bmatrix}^T = X_1 - \tilde{X}_1 = \begin{bmatrix} \alpha - \bar{\alpha} & \beta - \bar{\beta} & \gamma_s - \bar{\gamma}_s \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

则相应的非线性姿态环跟踪误差动态特性可以描述为:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_\alpha \\ \dot{e}_\beta \\ \dot{e}_{\gamma_s} \end{bmatrix} = \dot{X}_1 - \dot{\tilde{X}}_1 = F_1(X_1, X_3) + B_1(X_1)X_2 - F_1(\tilde{X}_1, X_3) - B_1(\tilde{X}_1)\tilde{X}_2 \quad (7)$$

将上述非线性姿态环跟踪误差动态沿着标称轨迹 $(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)$ 进行线性化, 得到如下的姿态环线性化误差动态系统:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_\alpha \\ \dot{e}_\beta \\ \dot{e}_{\gamma_s} \end{bmatrix} = A_1(t) \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \\ e_{\gamma_s} \end{bmatrix} + B_1(t) \begin{bmatrix} \tilde{w}_x \\ \tilde{w}_y \\ \tilde{w}_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

:= \tilde{X}_2

其中, $A_1(t) = \left(\frac{\partial F_1}{\partial X_1} + \frac{\partial B_1}{\partial X_1} X_2\right) \Big|_{(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)}$,

$B_1(t) = B_1(X_1, t) \Big|_{(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)}$, \tilde{X}_2 为待设计的姿态环反馈镇定控制律。需要说明的是, 线性时变矩阵 $A_1(t)$ 和 $B_1(t)$ 诸元可由 MATLAB 符号工具箱离线计算获得。具体地, 矩阵

$$A_1(t) = \begin{bmatrix} a_{111}(t) & a_{112}(t) & a_{113}(t) \\ a_{121}(t) & a_{122}(t) & a_{123}(t) \\ a_{131}(t) & a_{132}(t) & a_{133}(t) \end{bmatrix}, \text{各元素如下:}$$

$$a_{111}(t) = \left(\frac{\partial F_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{\partial B_\alpha^T}{\partial \alpha} X_2\right) \Big|_{(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)} = -\frac{QS_{\text{ref}}}{mV \cos \bar{\beta}} \frac{\partial \bar{c}_{L,0}}{\partial \bar{\alpha}} + \sin \bar{\alpha} \tan \bar{\beta} \bar{\omega}_x + \cos \bar{\alpha} \tan \bar{\beta} \bar{\omega}_y$$

$$a_{112}(t) = \left(\frac{\partial F_\alpha}{\partial \beta} + \frac{\partial B_\alpha^T}{\partial \beta} X_2\right) \Big|_{(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)} = -\frac{QS_{\text{ref}} \bar{c}_{L,0} \sin \bar{\beta}}{mV \cos^2 \bar{\beta}} + \frac{g \cos \bar{\gamma}_s \cos \theta \sin \bar{\beta}}{V \cos^2 \bar{\beta}} - \cos \bar{\alpha} \sec^2 \bar{\beta} \bar{\omega}_x + \sec^2 \bar{\beta} \sin \bar{\alpha} \bar{\omega}_y$$

$$a_{113}(t) = \left(\frac{\partial F_\alpha}{\partial \gamma_s} + \frac{\partial B_\alpha^T}{\partial \gamma_s} X_2\right) \Big|_{(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)} = -\frac{g \cos \theta \sin \bar{\gamma}_s}{V \cos \bar{\beta}}$$

$$a_{121}(t) = \left(\frac{\partial F_\beta}{\partial \alpha} + \frac{\partial B_\beta^T}{\partial \alpha} X_2\right) \Big|_{(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)} = -\frac{QS_{\text{ref}}}{mV} \frac{\partial \bar{c}_z^\beta}{\partial \bar{\alpha}} \bar{\beta} + \bar{\omega}_x \cos \bar{\alpha} - \bar{\omega}_y \sin \bar{\alpha}$$

$$a_{122}(t) = \left(\frac{\partial F_\beta}{\partial \beta} + \frac{\partial B_\beta^T}{\partial \beta} X_2\right) \Big|_{(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)} = -\frac{QS_{\text{ref}} \bar{c}_z^\beta}{mV}$$

$$a_{123}(t) = \left(\frac{\partial F_\beta}{\partial \gamma_s} + \frac{\partial B_\beta^T}{\partial \gamma_s} X_2\right) \Big|_{(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)} = \frac{g \cos \theta \cos \bar{\gamma}_s}{V}$$

$$a_{131}(t) = \left(\frac{\partial F_{\gamma_s}}{\partial \alpha} + \frac{\partial B_{\gamma_s}^T}{\partial \alpha} X_2\right) \Big|_{(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)} = \frac{QS_{\text{ref}}}{mV} \frac{\partial \bar{c}_z^\beta}{\partial \bar{\alpha}} (\tan \bar{\beta} + \sin \bar{\gamma}_s \tan \theta) + \frac{\cos \bar{\gamma}_s \tan \theta}{mV} - \cos \bar{\beta} \frac{\partial \bar{c}_z^\beta}{\partial \bar{\alpha}} - \sin \bar{\alpha} \sec \bar{\beta} \bar{\omega}_x - \cos \bar{\alpha} \sec \bar{\beta} \bar{\omega}_y$$

$$a_{132}(t) = \left(\frac{\partial F_{\gamma_s}}{\partial \beta} + \frac{\partial B_{\gamma_s}^T}{\partial \beta} X_2\right) \Big|_{(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)} = \frac{\sin \bar{\beta}}{\cos^2 \bar{\beta}} (\bar{\omega}_x \cos \bar{\alpha} - \bar{\omega}_y \sin \bar{\alpha}) + \frac{QS_{\text{ref}} \bar{c}_{L,0} \sec^2 \bar{\beta} + QS_{\text{ref}} \bar{c}_z^\beta \cos \bar{\gamma}_s \tan \theta}{mV} - \frac{g \cos \bar{\gamma} \cos \theta \sec^2 \bar{\beta}}{V}$$

$$a_{133}(t) = \left(\frac{\partial F_{\gamma_s}}{\partial \gamma_s} + \frac{\partial B_{\gamma_s}^T}{\partial \gamma_s} X_2\right) \Big|_{(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)} = \frac{g \sin \bar{\gamma}_s \cos \theta \tan \bar{\beta}}{V} + \frac{QS_{\text{ref}} \bar{c}_{L,0} \cos \bar{\gamma}_s - QS_{\text{ref}} \bar{c}_z^\beta \sin \bar{\gamma}_s \tan \theta}{mV}$$

$$\text{矩阵 } B_1(\tilde{X}_1) = \begin{bmatrix} -\cos \bar{\alpha} \tan \bar{\beta} & \sin \bar{\alpha} \tan \bar{\beta} & 1 \\ \sin \bar{\alpha} & \cos \bar{\alpha} & 0 \\ \cos \bar{\alpha} \sec \bar{\beta} & -\sin \bar{\alpha} \sec \bar{\beta} & 0 \end{bmatrix}.$$

接下来, 为确保姿态环跟踪误差沿着标称轨迹渐近稳定, 设计基于比例积分的姿态环反馈镇定控制律:

镇定控制律。需要说明的是,线性时变矩阵 $A_2(t)$ 和 $B_2(t)$ 诸元可由 MATLAB 符号工具箱离线计算获

得。具体地,矩阵 $A_2(t) = \begin{bmatrix} a_{211}(t) & a_{212}(t) & a_{213}(t) \\ a_{221}(t) & a_{222}(t) & a_{223}(t) \\ a_{231}(t) & a_{232}(t) & a_{233}(t) \end{bmatrix}$,

各元素如下:

$$\begin{aligned} a_{211}(t) &= \left(\frac{\partial F_{w_x}}{\partial w_x} + \frac{\partial B_{w_x}^T}{\partial w_x} U \right) \Big|_{(\bar{x}_2, \bar{v})} = 0, a_{212}(t) = \left(\frac{\partial F_{w_x}}{\partial w_y} + \frac{\partial B_{w_x}^T}{\partial w_y} U \right) \Big|_{(\bar{x}_2, \bar{v})} = \frac{I_y - I_z}{I_x} \bar{\omega}_x, \\ a_{213}(t) &= \left(\frac{\partial F_{w_x}}{\partial w_z} + \frac{\partial B_{w_x}^T}{\partial w_z} U \right) \Big|_{(\bar{x}_2, \bar{v})} = \frac{I_y - I_z}{I_x} \bar{\omega}_y, a_{221}(t) = \left(\frac{\partial F_{w_y}}{\partial w_x} + \frac{\partial B_{w_y}^T}{\partial w_x} U \right) \Big|_{(\bar{x}_2, \bar{v})} = \frac{I_z - I_x}{I_y} \bar{\omega}_z, \\ a_{222}(t) &= \left(\frac{\partial F_{w_y}}{\partial w_y} + \frac{\partial B_{w_y}^T}{\partial w_y} U \right) \Big|_{(\bar{x}_2, \bar{v})} = 0, a_{223}(t) = \left(\frac{\partial F_{w_y}}{\partial w_z} + \frac{\partial B_{w_y}^T}{\partial w_z} U \right) \Big|_{(\bar{x}_2, \bar{v})} = \frac{I_z - I_x}{I_y} \bar{\omega}_x, \\ a_{231}(t) &= \left(\frac{\partial F_{w_z}}{\partial w_x} + \frac{\partial B_{w_z}^T}{\partial w_x} U \right) \Big|_{(\bar{x}_2, \bar{v})} = \frac{I_x - I_y}{I_z} \bar{\omega}_x, \\ a_{232}(t) &= \left(\frac{\partial F_{w_z}}{\partial w_y} + \frac{\partial B_{w_z}^T}{\partial w_y} U \right) \Big|_{(\bar{x}_2, \bar{v})} = 0; \\ a_{233}(t) &= \left(\frac{\partial F_{w_z}}{\partial w_z} + \frac{\partial B_{w_z}^T}{\partial w_z} U \right) \Big|_{(\bar{x}_2, \bar{v})} = 0; \end{aligned}$$

矩阵

$$B_2(\bar{X}_1) = \begin{bmatrix} \frac{QS_{\text{ref}} l \bar{m}_x^{\delta x}}{I_x} & \frac{QS_{\text{ref}} l \bar{m}_x^{\delta y}}{I_x} & 0 \\ \frac{QS_{\text{ref}} l \bar{m}_y^{\delta x}}{I_y} & \frac{QS_{\text{ref}} l \bar{m}_y^{\delta y}}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{QS_{\text{ref}} l \bar{m}_z^{\delta z}}{I_z} \end{bmatrix} \quad (22)$$

接下来,为确保角速率环跟踪误差沿着标称轨迹渐近稳定,设计基于比例积分的角速率环反馈镇定控制律:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\delta}_x \\ \tilde{\delta}_y \\ \tilde{\delta}_z \\ \vdots \\ \tilde{u} \end{bmatrix} = -K_{P2} \begin{bmatrix} e_{w_x} \\ e_{w_y} \\ e_{w_z} \end{bmatrix} - K_{I2} \begin{bmatrix} \int e_{w_x} dt \\ \int e_{w_y} dt \\ \int e_{w_z} dt \end{bmatrix} \quad (23)$$

其中, K_{P2} 和 K_{I2} 分别为待设计的比例、积分反馈增益矩阵。

定义增广的角速率环跟踪误差为

$$e_{2\text{aug}} = \left[\int e_{w_x} dt \quad \int e_{w_y} dt \quad \int e_{w_z} dt \quad e_{w_x} \quad e_{w_y} \quad e_{w_z} \right]^T \quad (24)$$

将角速率环的误差反馈镇定控制律(23)代入线性时变系统(21)中,经过简单变换,可得到如下的角速率环增广线性化跟踪误差动态:

$$\dot{e}_{2\text{aug}} = A_{2c} e_{2\text{aug}} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_3 & \mathbf{I}_3 \\ -B_2 K_{I2} & A_2 - B_2 K_{P2} \end{bmatrix} e_{2\text{aug}} \quad (25)$$

其中, \mathbf{O}_3 和 \mathbf{I}_3 分别代表维数为 3×3 的零矩阵和单位矩阵, A_{2c} 为角速率环期望的误差动态特性矩阵。为保证角速率环跟踪误差指数收敛,选择如下的跟踪误差期望动态特性矩阵:

$$A_{2c} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_3 & & \\ \text{diag}[-\lambda_{211}(t) & -\lambda_{221}(t) & -\lambda_{231}(t)] & & \\ & \mathbf{I}_3 & \\ & \text{diag}[-\lambda_{212}(t) & -\lambda_{222}(t) & -\lambda_{232}(t)] & \end{bmatrix} \quad (26)$$

其中, $\lambda_{2j1}(t), \lambda_{2j2}(t) > 0, j = 1, 2, 3$ 为角速率环反馈镇定控制律的设计参数。与姿态回路类似,此时角速率控制系统也被解耦为俯仰、偏航与滚转三个通道独立设计。

为保证二阶线性时变系统的渐近稳定性,基于 PD 谱理论设计如下的时变系数:

$$\begin{aligned} \lambda_{2j1}(t) &= w_{2j}^2(t), \\ \lambda_{2j2}(t) &= 2\zeta_2 w_{2j}(t) - \frac{\dot{w}_{2j}(t)}{w_{2j}(t)}, j = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (27)$$

式中, ζ_2 为常值阻尼, $w_{2j}(t)$ 为待设计的时变带宽。进一步,根据期望的角速率环误差动态可求出需设计的比例、积分反馈增益矩阵:

$$\begin{aligned} K_{I2} &= -B_2^{-1}(t) \text{diag}[-\lambda_{211}(t) \quad -\lambda_{221}(t) \quad -\lambda_{231}(t)], \\ K_{P2} &= B_2^{-1}(t) (A_2(t) \\ &\quad - \text{diag}[-\lambda_{212}(t) \quad -\lambda_{222}(t) \quad -\lambda_{232}(t)]) \end{aligned} \quad (28)$$

因此,结合角速率环的前馈伪逆跟踪控制器和闭环反馈镇定控制器,角速率回路的轨迹线性化控制器 U 可综合为

$$U = \bar{U} + \tilde{U} \quad (29)$$

注意,为满足时标分离原则,通常角速率环时变带宽 $w_{2j}(t)$ 应该设计为姿态环时变带宽 $w_{1j}(t)$ 的 3 倍以上。同时,闭环控制系统的最大允许带宽受采样时间及量测噪声及执行机构带宽等因素的制约,因此,在实际工程中应根据系统跟踪性能、抗扰能力及鲁棒性等综合调节轨迹线性化控制器的带宽参数。此外,由于目前基于 TL 的控制器设计中时

变带宽的时变特性缺乏一定的理论指导,较大程度上依赖于对被控对象先验知识的掌握情况,需要前期进行大量综合仿真验证,无疑增加了参数设定难度和设计复杂度,且文献[7]在进行X-33姿控系统设计的整个闭环带宽几乎保持为常值,仅仅在执行机构饱和、跨音速、低动压极端飞行条件下将带宽在小范围内变化,并且精心调节后的时变带宽对改善控制性能效果有限。因此,后续仿真中角速率和姿态环的时变带宽均选为定常值。

4 仿真实验

为验证所设计的轨迹线性化姿态控制器对于再入过程中有限气动参数拉偏和外扰并存情况下的跟踪及抗扰性能,本节主要考虑以下两种仿真场景:

(1)选取姿态和角速率环的镇定控制器带宽分别为 $w_1 = 4, w_2 = 12$; $w_1 = 3, w_2 = 10$; $w_1 = 1.5, w_2 = 7$,考察不同带宽参数对轨迹线性化姿态控制性能的影响;

(2)分别考虑无系统不确定的情况和气动力及气动力矩系数均摄动-50%,并且俯仰通道存在外界干扰力矩为 $d_f = 0.2\sin(4t)\text{rad/s}^2$ 的干扰情况;上述仿真中高超声速飞行器初始速度和高度分别为 $V(0) = 1925.8\text{m/s}$, $H(0) = 30.9\text{km}$,初始姿态角、角速率均为零。控制器实现所需的设计参数如下:姿态及角速率回路三通道的线性时变调节器阻尼均为 $\xi_i = 1 (i = 1, 2)$,姿态及角速率回路的伪微分器带宽分别为 3rad/s 和 15rad/s ,姿态回路的滤波时间常数为 1s 。

图3和4分别给出了不同闭环带宽情况下的姿态响应和执行机构响应曲线。不难发现,所考虑的三种带宽情况下姿态角均能快速跟踪上期望的标称指令,控制量均在允许的变化范围内,但在其余控制器参数保持不变的情况下,快慢回路的闭环带宽越高,姿态响应的暂态性能存在较显著的震荡行为和明显的过渡过程误差,相应的控制量也会衍生出较明显的高频分量;相反,快慢回路的闭环带宽越低,姿态响应的暂态性能则存在一定程度的滞后,相应的控制量高频震荡特性得到明显减缓。因此,闭环带宽的选择应在满足快速性的前提下综合权衡姿态响应的跟踪性能及控制量的平滑性,本文

后续仿真中选取 $w_1 = 3, w_2 = 10$ 。

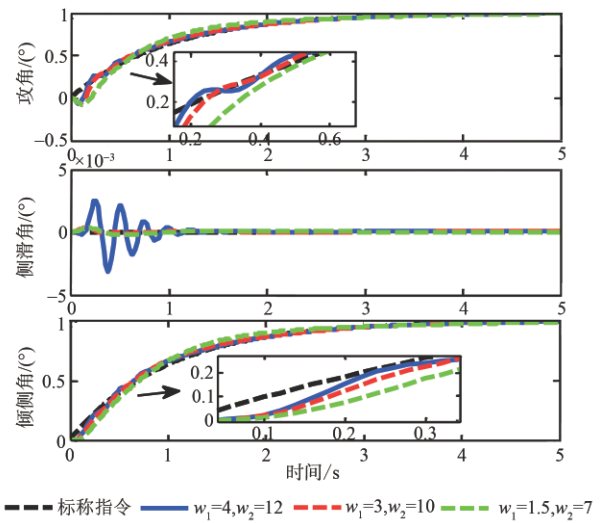


图3 不同闭环带宽情况下的姿态响应情况

Fig. 3 Attitude response under different closed-loop bandwidths

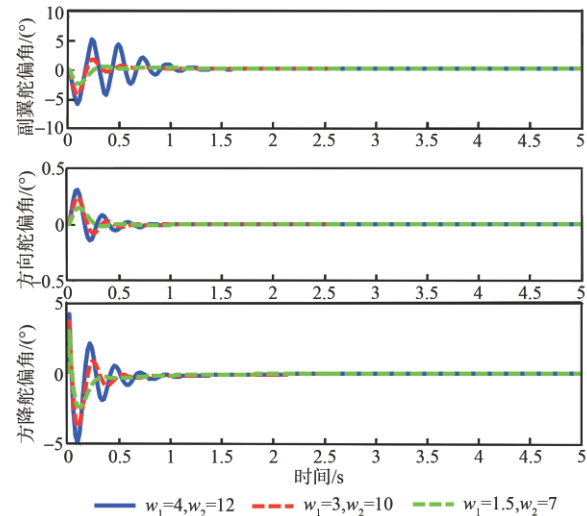


图4 不同闭环带宽情况下的舵机响应情况

Fig. 4 Response of elevator under different closed-loop bandwidths

图5和6分别给出了无系统不确定性和存在气动参数摄动和外扰情况下的姿态响应曲线。不难发现,在标称情况下,轨迹线性化姿态控制器可以实现对于给定的小幅度制导指令的快速精确跟踪,但此时的副翼舵偏和升降舵偏在初始阶段几乎满舵。由图6也可看出,在存在有限气动参数摄动-50%和俯仰通道干扰力矩的综合作用下,轨迹线性化控制器本身提供的稳定裕度可应对总干扰的不利影响。

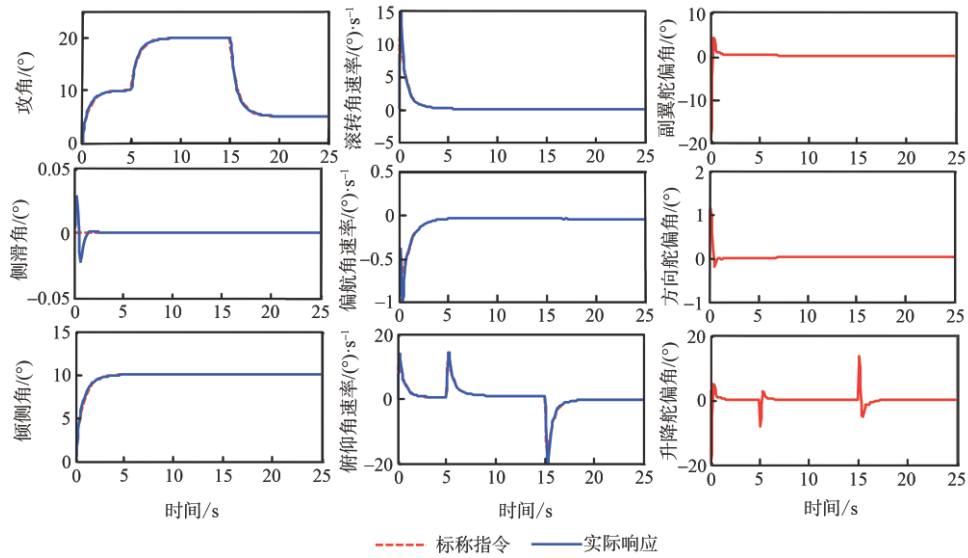


图5 无系统不确定情况下的姿态响应情况

Fig. 5 Attitude response without system uncertainty

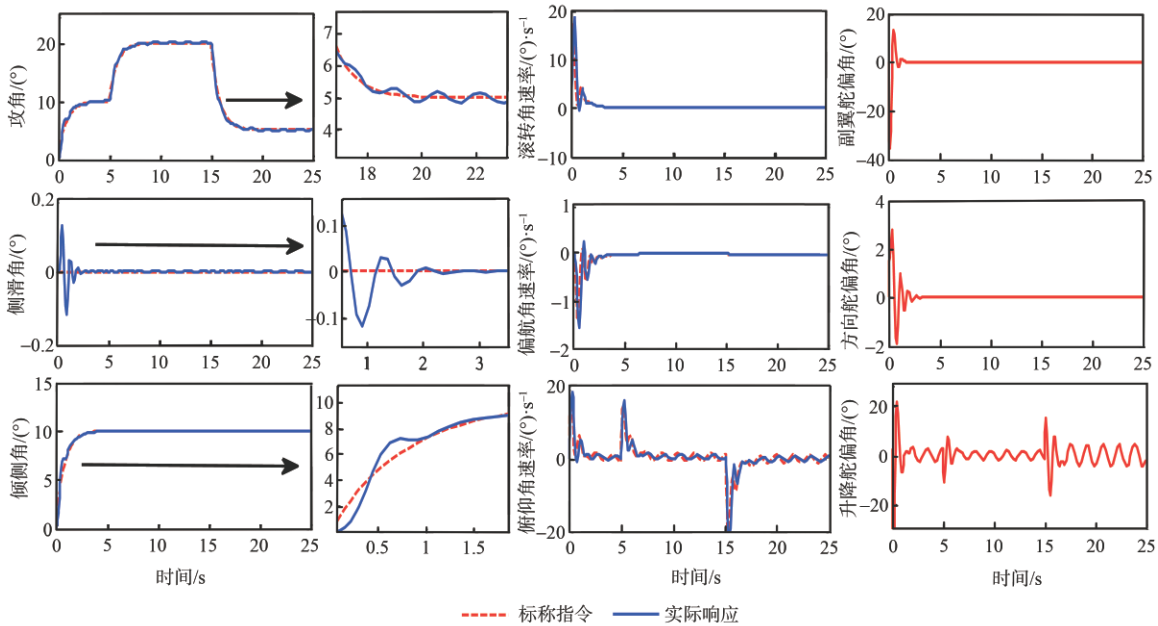


图6 存在气动参数摄动和外扰不确定情况下的姿态响应情况

Fig. 6 Attitude response under uncertain aerodynamic parameter perturbation and external disturbance

5 结束语

本文针对在强非线性、强耦合、强不确定特性的影响下超声速飞行器的姿态控制问题,提出了基于面向控制的高超声速飞行器姿态运动/动力学模型的高超声速飞行器TL非线性姿态控制方法,使得控制器便于设计;通过分析轨迹线性化在非线性控制方面的性能优势,以TL思想为基础,在姿态和

角速率回路分别设计虚拟控制量和控制力矩,使得超声速飞行器能够在有限干扰下实现再入全程的非线性姿态跟踪控制。仿真实验表明,所提出的方法能够有效地解决问题。需要注意的是,本文仿真选取的再入高度和速度足够维持较高的飞行动压(高达30kPa)来提供期望的操纵力矩实现大角度机动飞行,因此,后续应着重考虑如何采取针对性的抗饱和措施,在控制受限的前提下实现再入初期低

动压飞行条件对给定大幅度制导指令的快速跟踪控制,同时保证控制量具有一定的控制裕度,以抵抗再入过程中大范围气动参数摄动和外扰的不利影响。

参考文献

- [1] Snell S A, Enns D F, Garrard W L. Nonlinear inversion flight control for a super maneuverable aircraft [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1992, 15(4): 976-986.
- [2] Gunnarsson K S, Jacobsen J O. Design and simulation of a parameter varying controller for a fighter aircraft [C]. *Proceedings of the 2001 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Montreal, Canada, 2001.
- [3] Wang Q, Stengel R F. Robust nonlinear control of a hypersonic aircraft [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2000, 23(4): 577-585.
- [4] Xu H J, Mirmirani M, Ioannou P. Adaptive sliding mode control design for a hypersonic flight vehicle [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2004, 27(5): 829-838.
- [5] Parker J T, Serrani A, Yurkovich S, et al. Approximate feedback linearization of an air-breathing hypersonic vehicle [C], *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2006.
- [6] Fiorentini L, Serrani A, Bolender M A, Doman D B. Nonlinear robust adaptive control of flexible air-breathing hypersonic vehicles [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2009, 32(2): 402-417.
- [7] Zhu J, Hodel A.S, Funston K, et al. X-33 ascent flight control design by trajectory Linearization—a singular perturbation approach [J]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2001, 107: 151-170.
- [8] Zhu J, Banker B, Hall C. X-33 ascent flight control design by trajectory linearization – a singular perturbation approach [C]. *Aiaa Guidance, Navigation, & Control Conference*, Denver, CO, 2000.
- [9] Liu Y, Wu X, Zhu J, et al. Omni directional mobile robot control by trajectory linearization [C]. *Proc. American Control Conference*, Denver, 2003.
- [10] Huang R, Liu Y, Zhu J. Guidance, navigation, and control system design for tri-propeller vertical-takeoff-and-landing unmanned air vehicle [J], *AIAA Journal of Aircraft*, 2009, 46(6): 1837-1856.
- [11] Zhu B, Huo W, Adaptive trajectory linearization control for a model-scaled helicopter with uncertain inertial parameters [C]. *Chinese Control Conference*, Hefei, China, 2012.
- [12] Tony M, Zhu J. 6 DOF flight control of fixed-wing aircraft by trajectory linearization [C]. *American Control Conference*, San Francisco, CA, 2011.
- [13] Bevacqua T, Best E, Huizenga A, et al. Improved trajectory linearization flight controller for reusable launch vehicles [C]. *Proceedings of the 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, 2004.
- [14] Liu Y, Huang R, Zhu J. Adaptive neural network control based on trajectory linearization control [C]. *The 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China, 2006.
- [15] 朱亮, 姜长生, 陈海通, 等. 基于单隐层神经网络的空天飞行器直接自适应轨迹线性化控制 [J]. *宇航学报*, 2006, 27(3): 338-344.
- [16] 朱亮, 姜长生, 薛雅莉. 基于单隐层神经网络的空天飞行器鲁棒自适应轨迹线性化控制 [J]. *兵工学报*, 2008, 29(1): 52-56.
- [17] 薛雅丽, 姜长生, 朱亮. 一类径向基神经网络干扰观测器轨迹线性化控制 [J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 19(4): 522-526.

作者简介:



邵星灵(1988-),男,博士,教授,主要研究方向为多约束条件下四旋翼协同编队/合围控制技术、预设性能自适应控制理论与方法。本文通信作者。



刘俊(1968-),男,博士,教授,主要研究方向为惯性传感与量子精密测量技术、极端环境下动态测试与系统集成技术。



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。

[引用格式] 江逸楠. 量子计算的发展趋势综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(3): 67-74.

量子计算的发展趋势综述

江逸楠

(社会安全风险感知与防控大数据应用国家工程实验室, 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041)

摘要: 量子计算被认为能够解决当前传统计算机系统无法处理的过于复杂的问题。对近期量子计算的相关研究与成果进行了综合评述, 并对未来发展趋势进行了展望。首先, 围绕2019年谷歌量子霸权概述量子计算研究领域最新进展; 随后, 介绍深度学习技术在量子计算相关研究中的应用以及效用; 最后, 主要从商用落地和与人工智能关联关系两个角度, 讨论量子计算的发展趋势。虽然近期量子计算研究领域涌现出大量的跨越式研究成果, 但是由于高精度量子位操控技术等相关技术的极端复杂性, 目前量子计算研究与应用仍处于初级阶段, 除了继续提升量子计算硬件系统的性能外, 量子纠错、抗噪量子计算、量子模拟等都将成为量子计算下一阶段的重要研究重点。

关键词: 量子计算; 量子霸权; 深度学习; 人工智能; 量子纠错; 量子模拟

中图分类号: TP3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2020)03-67-08

A Survey on the Development Trend of Quantum Computing

JIANG Yinan

(National Engineering Laboratory for Risk Perception and Prevention,
China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: Quantum computing is considered to be able to solve the complex problems that the current traditional computer system cannot handle. This paper reviews the recent research and achievements of quantum computing, and the future development tendency is then prospected. First of all, this paper summarizes the latest achievements of quantum computing around Google's quantum superiority in 2019. Then, the application and effect of deep learning technology in quantum computing field is introduced. Finally, this paper mainly discusses the development trend of quantum computing from the perspective of commercialization and its relationship with artificial intelligence (AI). Although a large number of milestone research results have emerged in the field of quantum computing recently, the research and application of quantum computing is still in the primary stage, due to the extreme complexity of high-precision qubit manipulation technology and other related technologies. In addition to improving the performance of quantum computing hardware system persistently, quantum error correction, anti-noise quantum computing, quantum simulation, etc., will become important research focuses in the next research stage of quantum computing.

Key words: Quantum Computing; Quantum Superiority; Deep Learning; Artificial Intelligence; Quantum Error Correction; Quantum Simulation

1 引言

量子计算概念诞生于20世纪80年代早期,物

理学家费曼提出了使用不同于传统计算机的架构与模式来设计实现量子计算机的设想,并使用量子算法对量子位进行操作;20世纪90年代,第一个量

收稿日期:2020-02-28; 修回日期:2020-04-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0820503);中国电科新一代人工智能专项行动计划项目(AI20191125008);中国电科装备预研联合基金项目(6141B08010102)

子算法被提出;随后,更具使用价值的量子算法(如量子搜索算法等)接连问世^[1]。这些量子算法的不断成熟显示出量子计算机具有超越传统计算机的强大功效,立即引起学术界和西方国家国防安全部门的重视与投入,极大推动了量子计算的研发进程。此后,量子计算的相关研究也成为学术界和工业界持续关注的前沿研究领域。

传统计算机以晶体管作为基本单元,这些晶体管通过保持或释放电荷来表示1或0;通过这些晶体管连接在一起形成更复杂的结构,可以表示数据或者通过逻辑门(例如AND和NOR等)对数据进行转换和组合。量子计算机则以量子位作为基本单元,代表一个比0或1复杂得多的数学空间。通过在更复杂的数学空间中表示一个值,这些量子位及相关操作可以执行以前因算力不足而无法完成的任务^[2]。

量子计算的最大优势在于可以对同一个问题并行试验多个可能的解。通过连续采样,最终得到问题的解。因此,理论上量子计算机在解决某些问题(如分解大数等)时比传统计算机具有速度优势^[3]。量子霸权(Quantum Superiority)代表量子计算装置在特定测试案例上表现出超越所有传统计算机的计算能力。2019年实现的量子霸权——谷歌公司打造出世界上第一台能够超越当今最强大的超级计算机 Summit 计算能力的量子计算机^[4-5],被《Nature》期刊认定为量子计算发展历史上的重大里程碑。该量子计算机将 Summit 需要执行 10000 年的计算耗时压缩到了 200 秒。尽管如此,我们仍需要清醒地认识到,距离达到量子霸权远远不够,量子霸权通往实用性的道路依然很漫长。

2 新阶段量子计算研究进展

2019年10月,谷歌公司正式在《Nature》期刊上发表了他们关于验证量子霸权的论文^[6]。在这篇论文中,谷歌公司宣布使用 54 个量子位处理器 Sycamore(如图 1 所示)实现了量子优越性,在 200 秒内完成规定操作,而相同的运算量在当今世界最大的超级计算机 Summit 上则需要 10000 年才能完成。这项工作是人类历史上首次在实验环境中验证了量子优越性,它在量子计算的历史上将具有里程碑的意义,意味着量子计算时代的到来。Sycamore

处理器是一个完全可编程的、具有 54 位量子比特的处理器,其二维网格结构中每一个量子位都和四个其他的量子位相连接,密集的连接确保了该处理器芯片有很好的连接性,使其量子位的状态可以很快地在整个处理器上传递和交互。为保障量子霸权验证试验成功,谷歌公司采取了多项先进手段(如图 2 所示):改进含有两位量子位的门,进而提升并行处理能力,即使许多个门同时运行,也能稳定地带来目前为止最高的性能;引入一种新的控制节,能够关闭相邻的量子位之间的交互,从而显著减少多连接量子位系统中的异常数量;优化芯片的整体架构设计以降低串扰,并开发新的控制校准方法以避免量子位的缺陷。

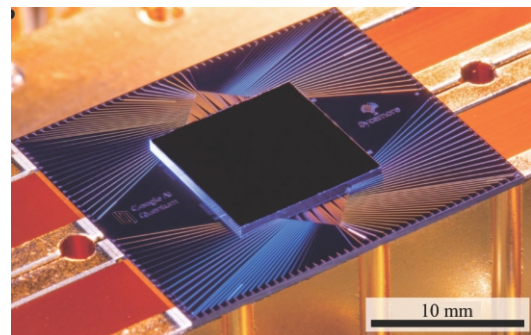


图1 54个量子位处理器Sycamore

Fig. 1 Sycamore processor with 54 qubits

当前,量子计算领域的布局者和探索者远远不止谷歌公司一家,各大科技巨头均在量子计算领域开始理论研究和应用尝试,同时在量子位的配置以及控制技术的解决方案方面(例如低温表征等)逐步积累实践经验。

2.1 量子计算机

2019年1月,IBM公司推出世界上第一台商用集成量子计算系统原型机——IBM Q System One(如图 3 所示),成功研发出启动一个量子计算实验所需的所有硬件设备(包括冷却量子计算硬件所需的所有设备等)的首次“一体机”式形态,成为世界上首个完全集成的通用量子计算系统,标志着量子计算商业化的重要一步。其主要成就是将一个实验室阶段的量子计算机在可靠性和稳定性上与大型量子计算机更接近,从而最大限度地减少了量子计算受电磁波动或物理振动干扰以及使环境温度可控(冰点温度)等。该成果使通用近似超导量子计算机的使用首次超出了研究实验室的范围。

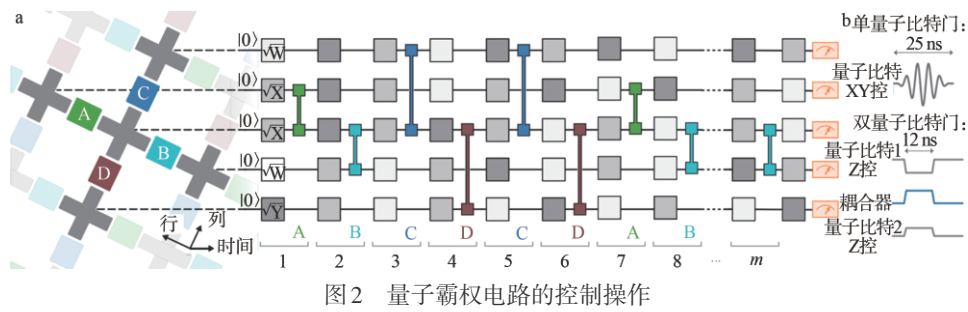


Fig. 2 Control operations for the quantum supremacy circuits



图3 世界上第一台商用集成量子计算系统原型机——IBM Q System One

Fig. 3 The world's first commercial integrated quantum computing system prototype—IBM Q System One

2020年6月,霍尼韦尔宣布造出了世界上性能最强的量子计算机。该公司此前曾预告称,这款量子计算机的量子体积将至少达到64。量子体积是用于度量量子计算机性能的指标,而不是仅仅以量子比特数量作为度量标准。量子体积更准确全面地度量了量子计算机的能力,包括度量可解决问题的复杂程度等。

2.2 量子芯片

英特尔公司依托其在硬件制造方面的工艺优势,积极探索硅自旋量子位。英特尔公司长期从事半导体制造,所以选择硅自旋量子位作为量子位的制备技术,该路线高度契合英特尔公司在制造方面的优势经验,并且为未来的规模化奠定基础。此外,英特尔公司正在将其过去几十年在大规模设备及软硬件系统制造方面积累的一体化优势移至其量子计算研究与应用方面,打造从设备、控制到编程的系统化优势。2019年12月,英特尔研究院发布了代号为Horse Ridge的首款低温控制芯片,旨在加快全栈量子计算系统的开发步伐。该芯片能够实现多个量子位的控制,成为量子实用性道路上

的一个重要里程碑。

量子芯片领域,中国的研究成果处于领先地位。2019年7月,中国联合团队验证了24比特量子芯片的正确性,同时验证了玻色-哈勃德模型的理论,并在一定意义上显示了玻色子之间的强相互作用力,对于基础粒子的研究具有重要意义。该成果发表在《Physics Review Letter》期刊上^[7]。

2019年8月,面对当前量子计算科研两大核心难题——量子比特数和操纵精度,来自中国的联合团队发布了搭载有20个超导量子位的量子芯片,并操控其实现全局纠缠(即所有量子位协同工作),成功刷新了固态量子器件中生成纠缠态的量子比特数目的世界纪录。该成果发表在《Science》期刊上^[8]。

2020年7月,麻省理工学院发布一种制造和整合人造原子的工艺,这种工艺由钻石的微观薄片中的原子级缺陷产生,并带有光电集成技术电路,从而生产出同类最大的量子芯片。该成果标志着可伸缩量子处理器领域的转折点——建造量子计算机将需要数百万个量子处理器,这项新的研究证明了扩大处理器生产规模的可行方法。使用该技术能够构建一个128量子位的系统,这是迄今为止最大的集成人工原子光子学芯片。该成果发表在《Nature》期刊上^[9]。

2.3 拓扑量子比特

2018年2月,中国联合团队利用自主创新研发的随机绝热法,首次实现了利用量子模拟识别了二维系统中的Z2拓扑序,为未来研究量子物质和实现量子计算打下了重要基础。该成果发表在《Nature Physics》期刊上^[10]。

2018年8月,中国联合团队首次在铁基超导材料中发现了马约拉纳束缚态(或称为零能模)。与

传统的量子比特相比,拓扑量子比特由马约拉纳零能模编织操作的时间线纽结决定,对外界局域的扰动不敏感。因此具有丰富的潜在应用价值,可以用来构筑高容错的量子计算机。该成果不仅在较高温度、较高纯度的情况下实现了对马约拉纳零能模

的直接观测(如图4所示),而且可以直接应用于铁基超导的拓扑领域,实现编织量子比特,进而为制造拓扑量子计算机打下了坚实的基础。该成果发表在《Science》期刊上^[11]。

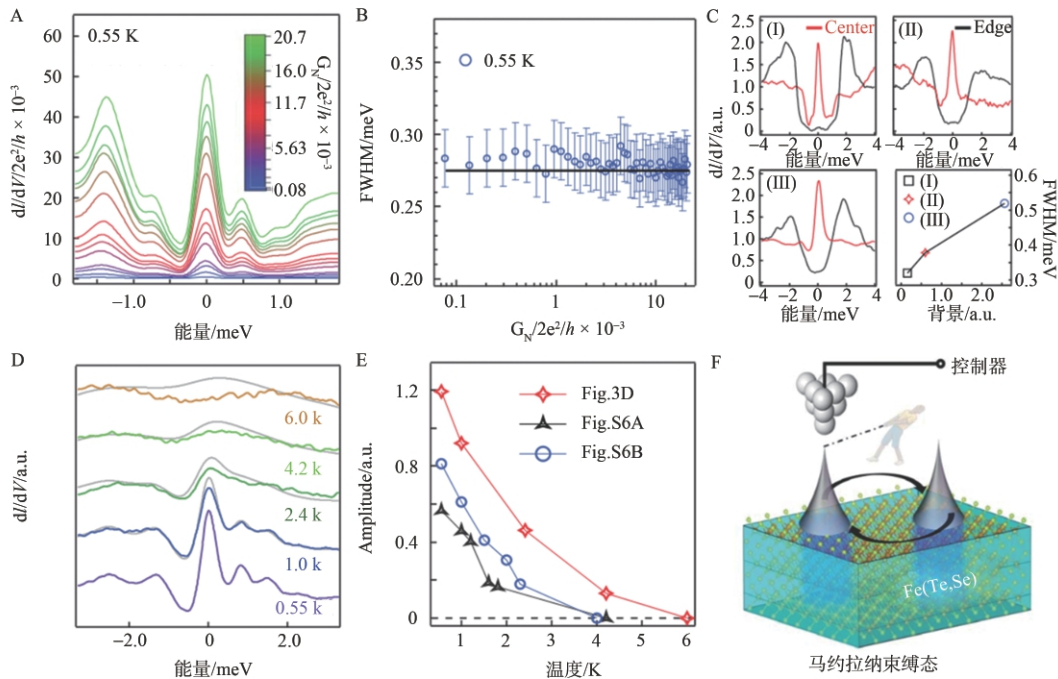


图4 在较高温度情况下实现了对马约拉纳束缚态的直接观测

Fig. 4 Realizing and manipulating Majorana bound states (MBSs) at a relatively high temperature

2019年11月,微软公司提出全新拓扑量子比特技术,有望将构建逻辑量子比特所需的物理量子比特数量降低99%。据测算,由此产生的新量子算法将计算时间由3万年缩短至一天半时间。

2.4 量子纠缠

多个量子位的纠缠态制备是发展可扩展量子信息技术(特别是量子计算)的最核心指标之一。随着量子位数量的增加,相干操纵时所带来的串扰、噪声等错误也随之增加,这对量子计算体系的设计、加工和调控要求极高,成为量子计算发展的巨大挑战。2019年7月,英国格拉斯哥大学成功捕获人类有史以来第一张量子纠缠的照片,该成果对于推动量子计算领域的发展及催生新型成像技术和设备具有重要意义,该成果发表于《Science Advances》^[12]。

2019年9月,中国科学技术大学团队联合美

国、澳大利亚科研团队,利用墨子号量子科学实验卫星对穿越地球引力场的量子纠缠光子退相干情况展开实验与测试。这一成果被公认为是世界上首次利用量子卫星在地球引力场中对量子力学与广义相对论的理论进行综合实验检验,令人信服地排除了引力导致纠缠退相干现象,具有指标性和引领性,极大推动了相关理论和实验研究活动的发展。

2019年11月,曾率先开启量子霸权标准研究的中国国防科技大学QUANTA团队提出了依赖于量子纠缠度(运算过程中量子态的复杂程度)的量子计算模拟的算法,并在天河二号超级计算机上的测试性能达到国际领先水平(随机量子线路采样问题测试了49、64、81、100等不同数目量子位在不同量子线路深度下的问题实例)。评测量子霸权,需要高效的、运行于传统计算机的量子计算模拟器,

因此在后量子霸权时代,该类型模拟器还会成为加速量子计算理论研究与应用落地的重要抓手。该研究成果发表于《Physics Review Letter》^[13]。

2020年4月,南京大学团队在硅基集成光子芯片上实现了高维纠缠态的产生、滤波、调控等多项功能,并且利用精度的片上量子调控完成了量子模拟与量子精密测量等应用任务,如图5所示。

在量子模拟方面,通过对三维纠缠量子态的操控,团队在全球首次实现了利用量子光学器件模拟图论,特别是通过量子态的相干性的测量直接获得图的完美匹配数。该成果为多体高维量子纠缠体系的片上制备与量子调控技术的应用提供了重要基础。该研究成果发表于期刊《npj Quantum Information》^[14]。

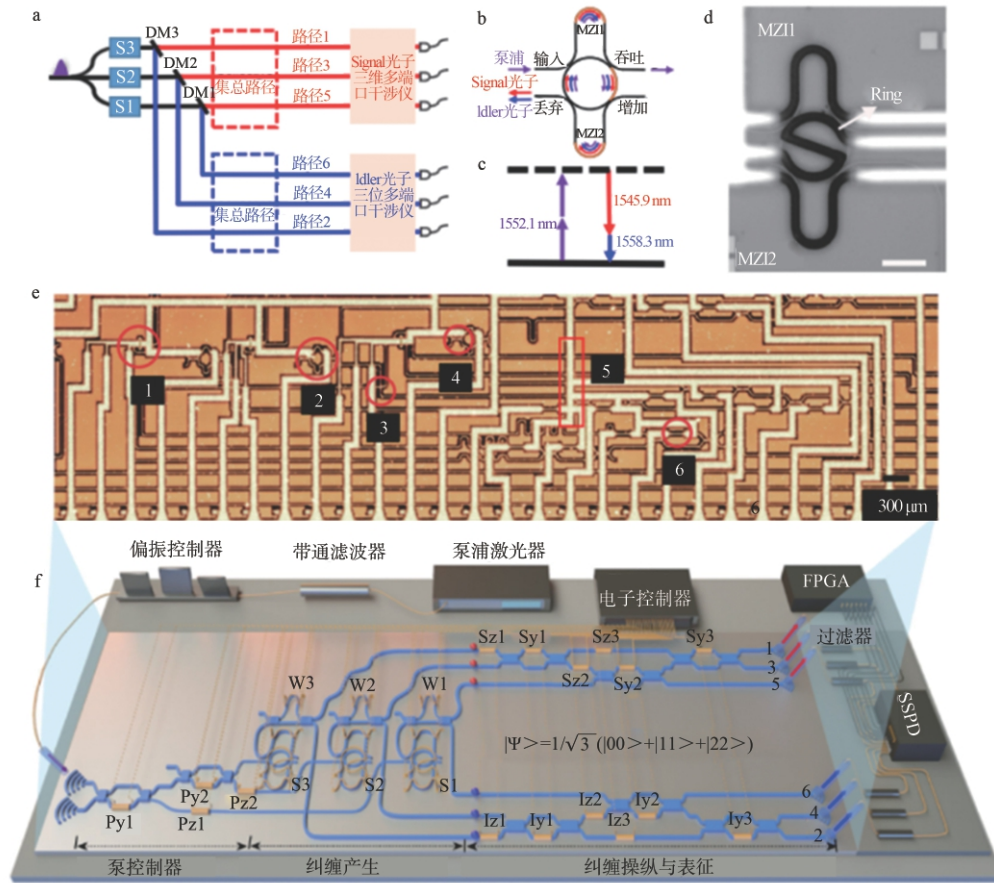


图5 基于硅量子光子芯片的高维纠缠态实验装置示意图

Fig. 5 Schematic of the experimental setup of high-dimensional entanglement based on silicon quantum photonic chip

3 深度学习技术在量子计算研究中的应用

近年来,人们发现了越来越多基础物理学与人工智能之间的联系。首先,深度学习与物理系统存在着本质上的对应关系;其次,机器学习是一种比传统的数值模拟、蒙特卡洛模拟更有效的对复杂问题近似求解的方法。这种有效性让人们开始思考物理与机器学习更深层次的关系,也许它能帮我们获得对智能以及宇宙本质的理解。深度学习技术

正在不断应用于量子计算相关研究,不仅提供了更多证明和验证量子霸权的角度,而且在很大程度上缓解了量子计算研究进一步发展所面临的问题(例如量子控制等)。

3.1 基于神经网络的量子表征与近似优化技术

2017年2月,瑞士苏黎世联邦理工学院研究者受AlphaGo的启发提出了基于神经网络的量子态表示方案,并展示了它在多个经典量子多体问题上的高精度和表达能力,如图6所示。人工神经网络是

否能够修改和调整自己以适应分析和描述量子多体系统是一个非常基本、也具有实际意义的问题。这种能力可以被用来解决在某种物理条件下,用现有的精确数值方法难以解决的量子多体问题。例如,基于人工神经网络的变分量子态能够用来有效捕获一维和二维的纠缠多体问题的复杂度。该研究虽然只是一个概念证明,而不是物理学家可以使用的实际工具,但是它展示了可能的实现路径。该成果发表于《Science》期刊^[15]。

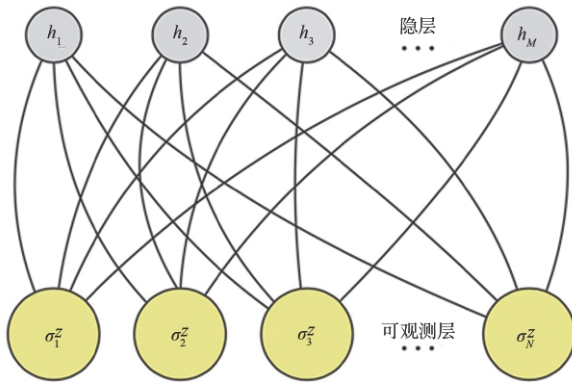


图6 神经网络编码了N个自旋的多体量子态
Fig. 6 Artificial neural network encodes N many-body quantum states

2017年6月,中美联合团队使用人工神经网络表征量子多体系统的波函数,让神经网络自动“学习”什么是系统基态(或力学)。结果证明,该方法比当前最先进的数值模拟方法的表现更好。该研究不仅为高度纠缠的量子态提供了有效的表征方式,模型还能生成多种有趣量子态的综合表征,包括那些纠缠数量巨大的量子态,为棘手且充斥着相互作用的量子多体难题提供了准确解决方案的新思路。该成果发表于《Physical Review X》期刊^[16]。

量子化学领域已经逐渐开始使用深度神经网络结构进行相关的工作。

2019年9月,美国DeepMind公司发布一种新型神经网络架构——费米子神经网络,用于近似计算薛定谔方程进而为化学反应提供线索,该成果为深度学习技术在量子化学领域的发展奠定了基础。相比于以往被广泛视为量子化学黄金标准的耦合聚类方法,该成果显著提高了准确度,证明了深度神经网络的表现可以超过已有的量子化学方法,为以往难以处理的分子和固体的波函数的准确优化

开辟了新的道路。

3.2 基于生成对抗网络的量子计算

生成对抗网络是近年来深度学习领域最令人兴奋的突破之一,在图像/视频生成等各种具有挑战性的任务中表现突出。量子生成对抗网络与生成对抗网络的区别是后者的生成器和判别器是由量子器件或者量子网络构成,训练用的数据集也可以是量子数据(比如量子态等)。2019年1月,清华大学团队提出量子版生成对抗网络模型(如图7所示),阐释超导量子电路中量子生成对抗学习的原理证明及实验演示,是世界上首次在超导量子电路上证明量子计算能够利用生成对抗网络。该成果利用量子生成器和判别器制造出一种量子生成对抗网络,是证明量子霸权的又一案例。它通过数轮对抗学习策略来训练单量子位发生器,对量子信道模拟器输出的量子数据进行统计复制,达到了98.8%的高保真度,实验验证生成对抗网络中的判别器无法区分真实数据和生成数据。经测,该模型与经典方法相比具有潜在的“指数级”优势。该成果发表于《Science Advances》期刊^[17]。

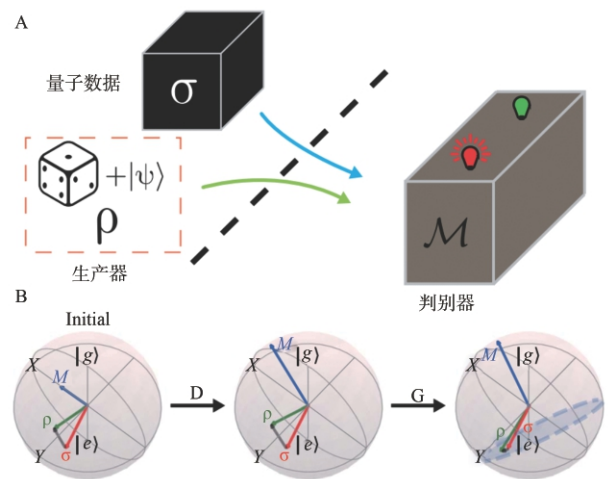


图7 量子生成对抗网络示意图

Fig. 7 Schematic of quantum generative adversarial networks

3.3 基于强化学习的量子计算

2019年10月,谷歌公司发布通过深度强化学习技术实现通用量子控制框架相关成果,核心创新之处在于对量子控制函数的改进以及提出的基于深度强化学习的高效优化方法(如图8所示)。具体而言,该框架可以通过单个控制成本函数来

概括量子位可控制优化领域中的各类实际问题。与深度学习中广泛采用的标准随机梯度下降的解决方案相比,该框架在大多数情况下能够将量子逻辑门的平均误差降低两个数量级,从而显著降低来自最优门生成的副本门的时间。这一成果证明了使用深度学习技术对通用量子控制方案的灵活性和附加计算能力提升的重要意义。接下来,该领域相关研究还需要更多的实验来探索将深度学习技术整合到实际的量子计算过程中,从而利用深度学习技术和机器学习技术来充分提高量子计算机的计算能力。该成果为使用量子设备来开展量子仿真、量子化学、量子霸权测试等开启了更加广阔的应用空间,被认为对大规模量子计算奠定了坚实基础。该成果发表在《npj Quantum Information》上^[18]。

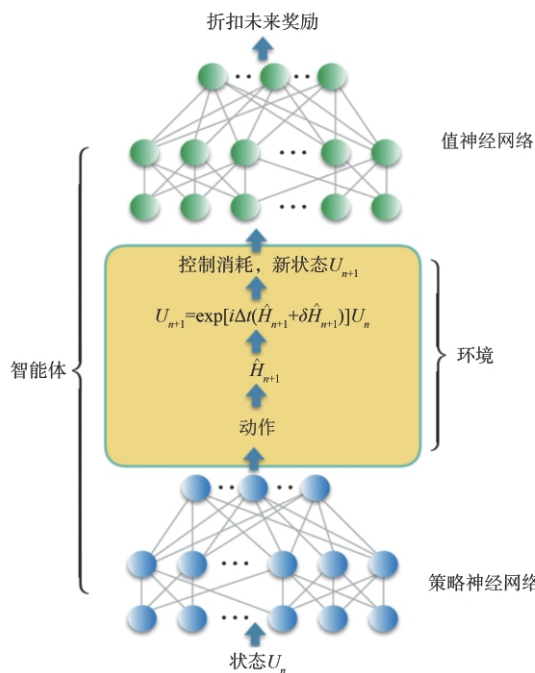


图8 面向通用量子控制的深度强化学习技术框架

Fig. 8 Framework of deep reinforcement learning for general quantum control

4 量子计算的发展趋势分析

2019年9月,新兴量子技术国际大会的白皮书将面向规模化、实用化方向演进的量子计算的研究路线概括为:第一阶段是实现量子霸权,量子计算模拟机具备针对特定问题超越传统超级计算机的

计算能力;第二阶段是实现具有应用价值的专用量子计算模拟系统,并在组合优化、机器学习、量子化学等方面发挥巨大作用^[19];第三阶段是实现可编程的通用量子计算机,并在经典密码破解、大数据搜索、人工智能等方面发挥重要作用。

相比量子优越性,业界已经开始将目标放在量子实用性上。例如,2019年11月,德国大众汽车宣布正在测试由量子计算机驱动的导航APP,通过云端的量子计算服务来解决更为复杂的宏观交通优化(已超出当今超级计算机能力范畴)问题,最终帮助公交车实时计算最快的行经路线,并计划将量子计算引入到旗下汽车中。量子计算的潜在应用还包括模拟金融数据以隔离关键的风险因素,从而进行更好的投资,实现超高效的物流和优化交付运营等。英特尔研究院认为,量子计算距离真正商业化应用,至少还需要探索10年的时间,因为其间需要解决更多问题,并积累更多关于量子位数量和规模等比例关系方面的经验与参数支撑。

量子计算商用化目前面临的挑战概括如下:量子计算商用化的成功很大程度上取决于量子位是否可以实现规模化扩展,这在理论研究和工程建设两个层面都是重要挑战,量子位规模化扩展势在必行,现在虽然只是几十个量子位,未来要解决几十万甚至上百万量子位的问题;学界和工业界目前都在开发各种固态量子系处理器,但是尚无商用层面的通用量子计算技术的统一标准;量子计算的产业应用,需要配备严格的环境控制,例如需要创造严格而稳定的低温环境,才能保障大量量子位稳定运行;软件堆栈演化面临挑战,既需要能够将算法投射到问题本身,又最终可以让高稳定性和可靠性的量子系统在真实应用场景中解决问题^[20]。

长久以来,量子计算的研究总是与人工智能的进展相关联,被认为是人工智能的重要驱动力。而随着近年来量子计算的里程碑式跃进,其与人工智能的关联更加密切。理论上,量子计算有助于解决人工智能的一些关键核心问题,但是量子计算真正作用于和服务于人工智能并提供明显助推力,还需要较长时间的探索。此外,从量子计算的应用领域看,量子计算最有可能被较早应用并产生有价值解决方案的领域包括分子建模、量子化学等。量子计算兴起初期备受关注的基于量子计算解密编码问

题,通常需要几千个甚至百万级量子位(有些其他科学问题用量子计算解决只需要10多个逻辑可靠的量子位),所以探索量子计算的可靠性和稳定性是量子计算成功应用于解密编码问题的关键^[21]。

5 结束语

量子计算被认为能够解决当前传统计算机系统无法处理的过于复杂的问题。由于量子信息技术的潜在价值,欧美各国都在积极整合各方面资源,开展对量子计算的国家级的协同攻关,以确保自身在发展量子技术征程中不处于落后地位。例如,欧盟于2016年启动量子技术旗舰项目,美国于2018年正式通过国家量子行动计划。近年来,以谷歌公司、微软公司、IBM公司等为代表的国外高科技巨头,纷纷强势介入和不断深化在量子计算领域的研究与应用布局并且战果频传。例如,谷歌公司2018年发布72量子位的量子计算机,2019年实现量子霸权。量子霸权的实现绝非量子计算研究的终点,而是量子计算发展的新起点。由于高精度量子位操控技术等相关技术的极端复杂性^[22],目前量子计算研究与应用仍处于初级阶段,除了继续提升量子计算硬件系统的性能外,量子纠错、抗噪量子计算、量子模拟等都将作为量子计算下一阶段的重要研究重点。未来,量子计算将极有可能彻底消除时间障碍,成本障碍也将随之降低,将来会出现全新类型的机器学习范式,但是真正像传统计算机那样具有通用功能的通用量子计算机成型依然需要一段漫长的探索过程。

参考文献

- [1] Steane A. Quantum computing [J]. Reports on Progress in Physics, 1998, 61(2): 117.
- [2] Colin P W, Charles B. Explorations in quantum computing [J]. Physics Today, 1999, 52(2): 66-68.
- [3] 林雄, 林帅. 量子计算与量子计算机展望 [J]. 微型机与应用, 2012, 31(22): 4-6.
- [4] Arute F. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor [J]. Nature, 2019, 574: 505-510.
- [5] Charles H B, Ethan B, Djabeur M S Z, et al. Strengths and weakness of quantum computing [J]. Siam Journal on Computing, 2016, 26(5): 1510-1523.
- [6] Arute F, Arya K, Babbush R, et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor [J]. Nature, 2019, 574: 505-510.
- [7] Ye Y, Ge Z Y, Wu Y L, et al. Propagation and localization of collective excitations on a 24-qubit superconducting processor [J]. Physics Review Letter, 2019, 5(123): 1-6.
- [8] Song C, Xu K, Li H, et al. Generation of multicomponent atomic Schrödinger cat states of up to 20 qubits [J]. Science, 2019, 365(6453): 574-577.
- [9] Wan N H, Lu T J, Chen K C, et al. Large-scale integration of artificial atoms in hybrid photonic circuits [J]. Nature, 2020, 583: 226-231.
- [10] Luo Z, Li J, Li Z, et al. Experimentally probing topological order and its breakdown through modular matrices [J]. Nature Physics, 2018, 14(2): 160-166.
- [11] Wang D, Kong L, Peng F, et al. Evidence for Majorana bound states in an iron-based superconductor [J]. Science, 2018, 362(6412): 333-335.
- [12] Moreau P A, Toninelli E, Gregory T, et al. Imaging Bell-type nonlocal behavior [J]. Science Advances, 2019, 5(7): 1-8.
- [13] Guo C, Liu Y, Xiong M, et al. General-purpose quantum circuit simulator with projected entangled-pair states and the quantum supremacy frontier [J]. Phys Rev Lett, 2019, 123: 190501-190501.
- [14] Lu L, Xia L, Chen Z, et al. Three-dimensional entanglement on a silicon chip [J]. npj Quantum Inf, 2020, 6(30): 1-9.
- [15] Giuseppe C, Matthias T. Solving the quantum many-body problem with artificial neural networks [J]. Science, 2017, 355(6325): 602-606.
- [16] Deng D, Li X, Das S S. Quantum entanglement in neural network states [J]. Physical Review X, 2017, 7(2): 1-17.
- [17] Hu L, Wu S, Cai Z, et al. Quantum generative adversarial learning in a superconducting quantum circuit [J]. Science Advances, 2019, 5(1): 1-5.
- [18] Niu M Y, Boixo S, Smelyanskiy V N, et al. Universal quantum control through deep reinforcement learning [J]. npj Quantum Inf, 2019, 33: 1-8.
- [19] 黄一鸣, 雷航, 李晓瑜. 量子机器学习算法综述 [J]. 计算机学报, 2018, 41(1): 145-163.
- [20] Lee G. Quantum computing: Both here and not here [J]. IEEE Spectrum, 2018, 55(4): 42-47.
- [21] 周正威, 涂涛, 龚明, 等. 量子计算的进展和展望 [J]. 物理学进展, 2009, 29(2): 127-165.
- [22] 张焕国, 毛少武, 吴万青, 等. 量子计算复杂性理论综述 [J]. 计算机学报, 2016, 39(12): 2403-2428.

作者简介:



江逸楠(1988-),女,博士,工程师,主要研究方向为复杂网络、社会网络计算、大数据与人工智能应用等。



征稿启事

《无人系统技术》期刊

《无人系统技术》期刊是由中国航天科工集团有限公司主管，北京海鹰科技情报研究所主办，中国无人系统产业联盟（筹）、中国指挥与控制学会无人系统专业委员会、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。

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 Yantao Shen

无人系统技术 2018 年创刊 (双月刊)

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)

中国指挥与控制学会无人系统专业委员会

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

Unmanned Systems Technology Started in 2018 (Bimonthly)

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

Technical Committee on Unmanned Systems, CICC

Research Center for Unmanned System Strategy

Development, NWPU

Unmanned System Research Institute, NWPU

Editor-in-Chief: ZHANG Dongqing

Associate Editor: CAI Shuncai 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.