

无人机先进地面站关键技术综述*

相晓嘉, 谭沁, 王菡, 周晗, 唐邓清, 牛轶峰
(国防科技大学智能科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要:具有沉浸显示、智能辅助、自然化人机交互等先进控制能力的新型无人机地面站已成为当前无人机控制领域的研究热点。为分析其中的技术脉络,系统性地梳理国内外一系列无人机先进地面站的功能要点及设计理念,在此基础上从无人机地面站指挥控制的观察—判断—决策—行动回路出发,归纳提炼了其技术体系构成,分析指出了其中的任务环境构建、战场态势沉浸式显示、智能化辅助决策和自然化人机交互等关键技术,并对各项技术的主要研究方法进行了深入剖析,还对无人机先进地面站目前存在的挑战和未来发展趋势进行了研判。该研究对新型地面站的研制具有指导和借鉴意义。

关键词:无人机先进地面站;任务环境构建;沉浸式显示;辅助决策;人机交互

中图分类号:V279 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)02-001-14



听语音
与作者互动
聊科研

Survey on key technologies of UAV advanced ground stations

XIANG Xiaojia, TAN Qin, WANG Chang, ZHOU Han, TANG Dengqing, NIU Yifeng

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The novel UAV (unmanned aerial vehicle) ground station with advanced control capabilities such as immersive display, intelligent assistance, and naturalized human-computer interaction has become a hot research topic in the field of UAV control. To analyze the technical aspects, the functional points and designs concepts of a series of advanced ground stations for UAVs at home and abroad were systematically compared. The technical system composition from the OODA (observe, orient, decide and act) loop of UAV ground station command and control were summarized and refined. The key techniques such as task environment construction, battlefield situation immersive display, intelligent assisted decision and naturalized human-computer interaction were analyzed and pointed out. The main research methods of various techniques were deeply analyzed, and the current challenges and future development trends of UAV advanced ground stations were also studied and judged. In addition, it provides guidance and reference for the development of novel ground stations.

Keywords: unmanned aerial vehicle advanced ground stations; task environment construction; immersive display; assisted decision; human-computer interaction

现代战场中,各种各样的无人机已经在侦察、打击等任务中发挥着越来越重要的作用,虽然无人机发展的终极目标是实现全自主智能化作战,但在当前的技术条件下,无人机执行任务还离不开地面站的指挥和控制(即人在回路控制方式),以“捕食者”“大乌鸦”等列装无人机为例,地面站对其有效的控制,直接影响到其任务的顺利完成。为提高无人机任务效率,目前各国在地面站研发上都投入了较大的人力、物力,并已研发出具有沉浸式、智能辅助、自然化人机交互等先进控制能力的多款新型无人机地面站。

本文基于对这一系列无人机先进地面站的分

析,归纳提炼其中涉及的关键技术。首先概述研究现状并分类梳理现有的技术体系;随后结合对相关领域的研究着重介绍了其中的四大关键技术,包括任务环境构建技术、战场态势沉浸式显示技术、智能化辅助决策技术、自然化人机交互技术;最后分析无人机先进地面站目前存在的挑战并提出对未来的展望。

1 无人机先进地面站研究现状

1.1 系统简介

无人机地面站是无人机系统的重要组成部分,是地面操作人员与无人机交互的桥梁。无人

* 收稿日期:2022-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61876187)

作者简介:相晓嘉(1980—),男,山东海阳人,研究员,博士,硕士生导师,E-mail:xiangxiaojia@nudt.edu.cn;

谭沁(通信作者),女,湖南湘乡人,硕士研究生,E-mail:tanqin20@nudt.edu.cn

机地面站接收由数据链回传的无人机遥测数据, 并对其进行解析, 将无人机的实时位置、姿态数据、传感器数据以及任务状态信息展示给操作人员, 同时通过遥控链路上传航线等任务指令对无人机的飞行航迹进行控制、改变任务载荷的状态^[1], 它是整个无人机系统的指挥控制中心和信息处理中心。

传统的无人机地面站由一个或多个分控设备组成, 主要实现数据传输、飞行控制、任务规划、载荷操作及数据分析等^[2]。典型代表为美国“捕食者”无人机地面站, 它是美国军方与 MIT 合作研发的远程中高空察打一体无人机监视控制系统, 具有地图浏览、航线编辑、定位识别目标及授权打击等功能。

为提高地面站对无人机的控制效能, 将各种先进技术应用用于地面站研制, 增强其在环境构建、辅助决策、人机交互等方面的能力, 已成为无人机领域重要的研究方向。目前典型的无人机先进地面站有加拿大 MicroPilot 公司研制的 Horizon 地面控制站^[3], 它不仅具有传统地面站的基本功能, 还能模拟测试相关训练任务; 美国通用原子航空系统公司研发的 Advanced Cockpit 地面控制站^[4]配置了多功能软件模块, 可适配多种无人机的任务规划、飞行控制等功能, 可支持对“捕食者”及“灰鹰”系列无人机的直接实时控制, 该地面站中以人为核心的沉浸式显示、态势分析、人体工程学设计等技术, 较好地提高了操作员的控制效率; 雷神公司推出的无人通用地面控制系统采用模块化、开放式架构, 对多域指挥和控制^[5]进行了探索; AMP 官方提供的 Mission Planner 地面站^[6]和 MAVLink 官方网站提供的 QGroundControl 地面站监控软件^[7], 由于是以开源方式发布, 具有良好的社区生态, 是目前被研究频率高且应用范围极广的地面站。此外, 美国贝尔直升机德事隆公司提出了先进的驾驶舱概念设计^[8]: 驾驶舱将任何给定条件下的最关键信息按逻辑通过视觉增强显示给飞行员, 飞行员将在虚拟工作空间使用语音、手势指令交互等, 该项目预计 2025—2030 年投入运营。

国内对无人机地面站系统的研究, 也取得了一定的成果, 如北京致导科技自主研发的 AheadX Space 地面控制软件, 其具备强大的航线编辑功能并支持数据回放; 由北航、西北工业大学等单位研制的无人机地面控制站, 在多机监督控制、自动任务规划、传感器数据并行处理等技术领域均取得了一定突破, 一站控多机技术已经成熟。

1.2 关键技术体系

与其他武器系统控制流程类似, 无人机地面站指挥控制流程同样可以用不断循环往复的观察—判断—决策—行动 (observe, orient, decide, act, OODA) 回路来描述。其中: ①观察节点为无人机地面站的前端输入节点, 对应通过环境信息的获取快速构建战场态势, 将无人机操作员在信息域的优势转化为指挥决策的优势, 有利于解决具有时敏性的战场任务。②判断节点在循环中最为关键, 指根据沉浸式显示获取行动结果、外部反馈等更清晰具体的战场态势, 辅助操作人员进行分析、研判。③决策节点对应无人机地面站通过智能化的辅助决策技术, 以机器智能拓展任务规划、情报生成、意外处置等技术能力。④行动节点注重通过更自然的交互方式, 支持操作员高效完成目标识别与打击等任务, 并提供对各类意外事件的灵活处理能力。此外, 行动节点后, 无人机地面站需要对行动效果评估信息进行采集比对, 依据行动效果判断是否进入下一个 OODA 回路。

由无人机地面站指挥控制 OODA 流程所决定的, 可有效提升其中各个环节的快速性、准确性的相关技术成为先进地面站领域研究人员攻关的重点方向, 主要包括: 任务环境构建技术、战场态势沉浸式显示技术、智能化辅助决策技术、自然化人机交互技术等。其关键技术体系架构如图 1 所示。

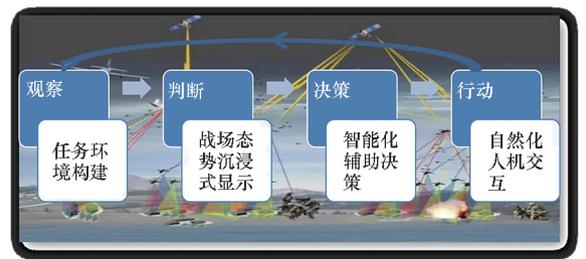


图 1 无人机地面站指挥控制 OODA 流程

Fig. 1 OODA process for UAV ground station command and control

2 任务环境构建技术

传统的基于二维地图的无人机指挥控制存在着战场环境显示不直观、不自然的缺点, 研究人员越来越关注无人机地面站中具备三维战场的任务环境构建技术, 并且对环境构建速度、环境构建精细化程度以及海量数据可视化呈现水平等指标提出了更高的要求。现有的构建技术主要包括基于传感器的方法和基于地理信息数据 (geographic

information system, GIS)方法。

2.1 基于传感器的环境构建技术

根据所使用的传感器不同,基于传感器的环境构建技术又可分为两类:基于图像传感器的构建技术和基于激光雷达传感器的构建技术。

2.1.1 基于图像传感器的构建技术

基于图像传感器的环境构建技术^[9-11]是通过大量数字图像来创建三维模型。该技术的图像处理通常遵循三种标准途径:多视点立体^[12]、运动结构^[13-16]以及表面纹理建模^[14,17]。这些途径已经被广泛研究过,并在不同规模上得到了论证,包括城市场景^[18]。

经典的多视点立体问题的解决方法一般基于体图切割、水平集优化或迭代匹配传播。这些解决方法普遍存在计算复杂度高、在线处理难等问题,对后续的研究具有启发式意义。Smith等^[19]开发了一种新的基于启发式的多视点立体重建质量连续优化方法,通过优化搜索视图方向及视图位置,得到更准确、完整的重建结果。Hepp等^[20]则提出分层的环境重构,允许算法区分未知的、空闲的和已占用的空间。

运动结构算法大部分使用简单的、预先编程的飞行路径且摄像机指向固定的方向,因而很难在大型城市环境中实现完整和密集的覆盖。许多研究者为了捕捉建筑的垂直面信息提出一个优化的相机路径和观察点规划体系,可在最大限度地减少飞行时间的同时实现完整、致密覆盖。Roberts等^[21]将轨迹规划任务公式化为一个定向问题,利用其直观的子模性设计了一种轨迹规划算法。Zhang等^[22]给出了一种典型的增量运动结构途径,即基于网络的运动统计策略。

表面纹理建模方法旨在保留不规则元素的细节,提高图像的分辨率,让复杂场景更加真实。现有研究工作主要分为两个方向:①针对单体化精细三维建筑模型,通过优化纹理来源和映射精度来改善映射效果^[23];②针对倾斜摄影测量等解决方案生成的三角网模型,采用逐格网纹理映射方法进行优化^[24]。

2.1.2 基于激光雷达传感器的构建技术

激光雷达是以发射激光束来探测目标的位置、姿态等特征量的雷达系统。将信号进行比较和适当处理(如图2所示)后,就可以获得目标的有关信息(目标距离、方位、高度、形状等)。



图2 激光扫描数据处理过程

Fig. 2 Process of laser scanning data processing

基于激光雷达的建模方法,其关键是对地面和空中点云进行对齐,点云类型如图3所示。迭代最近点^[25-26](iterative closest point, ICP)、相关扫描匹配^[27-28](correlation scan match, CSM)和正态分布变换^[29-30](normal distributions transform, NDT)是最常用的扫描配准技术。在遥感领域,常见方法有从原始点云中提取特征^[31-32],或从地面和航空激光云中提取建筑物轮廓的特征线^[33]或角点^[34],并利用这些特征对应关系估计两点云之间的旋转和平移尺度。此外,扫描配准技术还可依赖全球定位系统(global positioning system, GPS)或人工辅助。

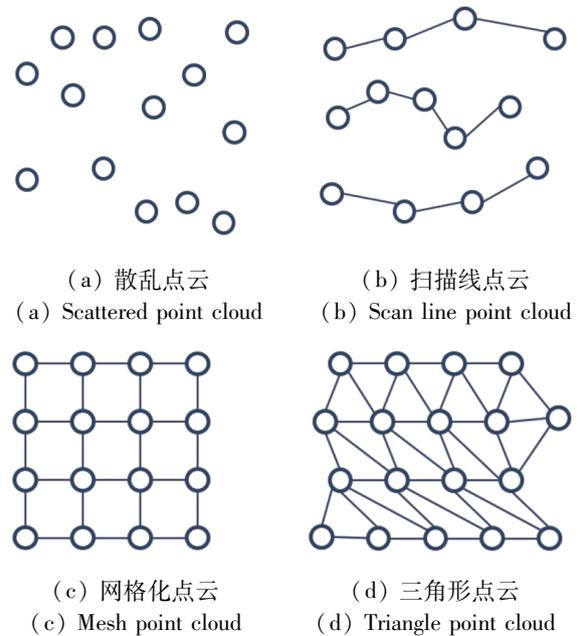


图3 点云的主要类型

Fig. 3 Main types of point clouds

2.2 基于地理信息数据的环境构建技术

GIS是对地理数据进行存储、查询与分析的技术。1998年1月,Königer等^[35]提出一种三维城市地理信息系统的框架,包括了相关概念以及第一款应用程序原型的实现,自此地理信息的三维分析展示为越来越多的人所熟知。以数字地球理念为指引,一系列的优秀平台出现在人们的视野中,包括ESRI公司的ArcGIS Explorer、谷歌的Google Earth、美国国家航空航天局的World Wind等平台,以及开源osgEarth^[36-37]等。

地理信息数据有数字高程模型 (digital elevation model, DEM)、数字线划图 (digital line graphic, DLG) 以及数字正射影像 (digital orthophoto map, DOM) 等。其采集方法大致包括测绘部门提供^[38-39]、用户上传^[40]以及基于开放街道地图 (open street map, OSM)^[41] 开源数据等。其中 OSM 是一个开源的地理信息共享项目,集成了建筑、街道、区划与地图影像等各项地理信息,可以较低的成本高效构建地理信息平台。

基于地理信息数据的环境构建技术以任务环境中 GIS 数据为基础,以地理空间数据可视化为媒介,实现任务环境地理信息的分析与应用。因此,国内外构建技术的相关研究也主要涉及任务环境要素的建模,海量要素的管理即分类、组织、存储、调度等方面。

任务环境中的要素复杂,所需的数据量较大,数据种类较多,包括城市的地形高程数据、地表影像数据、地物模型数据,以及道路桥梁等文化特征数据等。并且不同精细程度的三维地理信息数据产品对地理信息数据的需求存在差异^[42]。对于体块模型和基础模型,可根据二维数据推算高度等要素信息,具有快速、简便的特征,但精度直接受建筑物移位幅度或其距像主点距离影响;质量要求较高的模型,其数据可采用航片立体相对、激光测高仪等方式获取;精细模型信息数据可从建筑设计图或施工图以及实地测量中获得^[43]。

现如今模型的存储管理技术主要有两大方面:一是数据库管理方式,另一个是文件管理方式。常见的数据库管理有 HBase、MongoDB、PostgreSQL、Oracle RAC 和 Oracle RDBMS 等^[44-49] 几类方式。文件管理方式有着存储操作简单、存取速度快的优点,主要分为分布式存储技术^[50]、分级存储技术和缓冲区^[51] 三类。其中分级存储技术又包括四叉树^[52-54]、八叉树^[55]、R 树^[56] 以及瓦片文件^[57] 等结构。

GIS 技术适用于大型的无人机地面站,具备五种类型的功能:数据采集与编辑功能、空间分析功能、制图功能、空间数据库管理功能、航迹回放再现功能,在无人机地面站中发挥着重要作用^[58]。无人机执行飞行任务时,利用 GIS 强大的空间信息功能,能够直观、准确地监控无人机的航迹信息,实时掌握无人机的飞行状态,完成无人机航迹规划、动态监控、组合导航定位等任务,提高操作人员工作效率。

3 战场态势沉浸式显示技术

鉴于虚拟现实 (virtual reality, VR) 技术以及增强现实 (augmented reality, AR) 技术在沉浸式体验、高效交互以及辅助决策方面展现的优势,研究人员针对基于虚拟现实以及增强现实的沉浸式显示技术开展了大量的研究,以满足无人机先进地面站中战场态势沉浸式显示的需求。

3.1 基于虚拟现实的沉浸式显示技术

虚拟现实技术是模拟仿真三维空间环境和人类的感觉 (视觉、听觉、触觉等), 营造出接近真实环境的感受,可提高虚拟环境中的人员对与其相应的现实环境的理解^[59-62]。目前的基于虚拟现实的沉浸式显示技术由于大部分需要依托头戴式显示器,因此主要面向封闭式指挥控制环境即地面站中对无人机的指挥控制 (见图 4)。



图 4 VR 沉浸式显示概念图

Fig. 4 VR immersive display concept map

基于虚拟现实的战场态势沉浸式显示技术将任务环境划分为各种功能区域,包括建筑、停车场、植被等,在此基础上绘制多模式数据,将战场信息完整呈现于无人机地面站操作人员面前。研究人员针对界面内容的丰富性及提供给操作人员战场态势最直观的表达开展了大量的研究。例如利用光谱图像添加日光、阴影^[63-64] 和全局照明^[65];应用各种大气环境,如云和雾等^[66];文献^[67] 设计了避障提醒功能,撞击产生白烟等应激反应。

在基于虚拟现实技术的战场态势沉浸式显示中,操作人员不必身处危险的战场环境,只需坐在安全的指挥中心,就可以沉浸直观地观察战场环境和环境信息的动态变化,与被控对象及传感器设备进行实时交互。后台的沉浸式显示算法在复杂战场任务实时关联分析下,通过交叉比对将多源异构的信息融合起来,并根据战场经验及专家信息或基于主题聚类分析等方法找出情报脉络,

最后将各类数据进行可视化渲染,展示给无人机指挥控制人员等。并且可以从获取情报(包括过去、现在、预测信息)中获得全面的共享态势感知^[68],预判危险并动态调整无人系统的操控策略以更好地执行战场任务,并最终提升操控质量和效率。

该技术的主要优势是可为指挥人员提供检查战场环境的综合视角。通过将海量的数据和信息来源整合到一个环境中,并呈现沉浸式(以自我为中心)和自上而下(以外心说)的视角,使指挥人员能够在空间和时间上改变被控对象视角和评估场景。

当前无人机先进地面站中该技术的发展进入了一个新的阶段。Bohemia Interactive 公司将游戏技术加入虚拟战场仿真中,研制出一款集真实感与交互性一体的虚拟战斗空间^[69](virtual battle space, VBS),在2014年与2021年相继推出了升级版的VBS3和VBS4,增加了阴影渲染、植被绘制、动态光源等效果,为战术训练、实验和任务排练提供了全地球渲染。Stotko等^[70]提出了一种基于VR的实用系统,操作人员可以完全独立于被控无人机的当前位置和视角,在远程站点进行探测和导航。与此同时,美国海军正在开发一种全息虚拟指挥与控制系统^[71],指挥官可通过VR最大限度地利用战场信息,与周围的作战单位快速信息共享,并利用触觉和视觉传感器实现全息操作,该系统预计2025年投入战斗。

3.2 基于增强现实的沉浸式显示技术

增强现实技术是将计算机构建的虚拟物体、场景或系统提示信息叠加到真实场景中,从而实现对真实世界的信息扩展^[72-74]。基于增强现实的沉浸式显示技术主要面向开放式环境,如城市作战、山地作战等作战环境中指挥控制无人机(见图5)。

基于增强现实技术的战场态势沉浸式显示技术不仅能向部队展示真实的战场场景,同时能够叠加肉眼无法看到的环境信息,甚至包括敌我双方的隐蔽力量等,实现多种战场信息的可视化。此外,考虑战场上指挥员对信息掌握的重要性,引入AR技术可以使各级指挥官同时观看战场的实际情况以及叠加的各种信息,并与之进行交互,进而实现指挥中心与各级战斗人员之间信息的快速传输与高度共享。指挥员在快速下达指挥命令的同时了解各个作战单元的情况,将地理上分散的小组联合成一个协同合作的整体。



图5 AR沉浸式显示概念图

Fig. 5 AR immersive display concept map

该技术的主要优势是可在操作员执行战场机动、武器射击等常规任务的同时,为其提供随时查看无人机传回的周边环境实时信息,并将一线情报用于下一步行动的支持。其中,由于操作人员处于枪林弹雨的战场一线,如何辅助其用有限的注意力完成对无人机的指挥控制是当前研究的重点。

上述技术可以成为无人机先进地面站中处理空间交互的强大工具。香港科技大学研发团队推出无人机全息AR控制系统^[75],将无人机重建的3D地图显示在操作人员面前的物理表面上,远程实现与自主无人机的交互。美国国防高级研究计划局的Ultra-Vis项目^[76]为作战步兵提供其所需的态势数据,包括所处环境的海拔及坐标等信息、无人机传输信息、附近友军数据、敌人潜在位置等,并叠加显示在士兵视线的场景中。

4 智能化辅助决策技术

在无人机地面站中,无人机操作员关注于对无人系统进行最优的任务计划拟制,以及当发生意外事件时的及时准确处理,为此,地面站系统要具有对其进行智能化辅助决策的能力。2016年,美军启动了指挥官虚拟参谋项目,辅助指挥人员决策,将飞行员从基本的任务中解放出来,使其关注高层次决策和关键事件确认,实现了“人在回路之上”的指挥控制方式,大大提升了动态不确定战场环境下执行任务的有效性和时效性,实现了精细化、高效性的人机指挥控制。

辅助决策主要在无人机任务过程中的两个阶段生效,即任务前的预先规划和执行任务中的实时规划,每个阶段又涉及任务分配、航迹规划、冲突消解等问题。

4.1 任务分配

任务分配主要完成将多个任务目标分配给单个平台依次执行或分配给多个平台同时执行,通

常被建模为多约束条件下的离散空间组合优化问题。好的分配是将任务分配给最适合的无人机, 高效、低成本、高质量地完成。常见的任务分配方法又分为集中式任务分配和分布式任务分配两个方面, 如表 1 所示。集中式任务分配的数学模型主要包括旅行商问题^[77-78]、车辆路径问题^[79]、多选择背包问题^[80-81]、混合整数线性规划问题^[82-83]、动态网络流优化模型^[84]、多处理器资源分配模型^[85]等。求解方法又可以分为最优化方法^[86]和启发式方法^[87-88]。与此同时, 分布式任务分配的典型模型主要包括多智能体决策理论^[89]、分布式约束^[90-91]、类市场机制^[92]等。

表 1 常见的任务分配方法

Tab. 1 Common task allocation method

任务分配方法分类	一级分类	二级分类
集中式	最优化方法	穷举法 约束规则法 图论法 整数规划法(矩阵作业法、单纯形法、匈牙利法、分支定界法)
	启发式方法	列表算法(动态列表、多维动态列表) 聚类算法 智能类算法(群智能算法、遗传进化算法等)
分布式	多智能体决策理论	马尔可夫法、博弈论方法、贝叶斯法
	分布式约束	
	类市场机制	合同网算法、拍卖算法

4.2 航迹规划

无人机的航迹规划是在已知或是未知战场环境中, 为无人机规划出一条从出发点 to 目标点、可避开敌方雷达或武器、禁飞区和障碍物的较优或最优安全飞行航迹。已有的典型单无人机航迹规划方法可以分为最优控制法^[93-94]、基于路标图形^[95-98]以及基于栅格^[99-100]的航迹规划等(见表 2)。多无人机协同任务规划过程则需要根据特定的需求进行分析。例如黄海涛^[101]利用深度强化学习方法削弱了无人系统对环境的影响。

Tripathi 等^[102]使用卡尔曼滤波解决有噪声情况下的目标定位和跟踪。上述航迹规划方法均基于逻辑规则, 除此之外还有基于集群智能的规划方法^[103-104]。

表 2 典型航迹规划方法

Tab. 2 Typical path planning method

航迹规划方法分类	一级分类	二级分类
单无人机航迹规划方法	最优控制法	间接法、直接法
	基于路标图形法	维诺图、概率路标图、可视图、快速扩展随机树
多无人机协同任务规划方法	基于栅格法	A* 算法 动态规划法 转为优化问题(人工势场法、智能优化法)
	基于逻辑规则	
	基于集群智能	

4.3 冲突消解

在分布式任务分配阶段, 研究人员解决多机系统在各无人机已知信息不对等的情形下造成的任务分配结果冲突问题的思路大致分为两种: 一种是对如何使各无人机环境信息达成一致进行了大量的研究^[105]。该思路理论上解决了造成冲突存在的根本问题, 但难以在通信带宽有限、决策时间有限的实际背景中实现^[106]。另一种是仅对各个无人机分配任务结果进行冲突消解处理, 使各无人机对任务分配结果保持一致。

在航迹规划阶段, 虽然航迹规划算法的约束条件是不能存在冲突, 但是由于无人机任务在完成规划后可能发生变更, 并且还涉及与其他任务要素的合成, 为此需要解决可能引起的时间、空间等不同维度上的冲突。冲突消解的基本方法可以分为基于轨迹^[107-108]、基于势场^[109]、模型转换三种类型。基于轨迹的方法一般是调整无人机到达冲突时间。这种方法简单直接, 但不适用于航线密集的情形。势场法形象定义无人机目标为引力级、空间冲突物为斥力级, 使得在该势场中的无人机受其目标位姿引力场和障碍物周围斥力场的共同作用, 朝目标前进, 其缺点是容易陷入局部极值。模型转化法可以将冲突分解为在线预测控制^[110]或者博弈问题^[111]。

5 自然化人机交互技术

无人机地面站作为集中式管理无人机协同控制的控制中心,当所有的态势信息、无人机信息、任务信息等都汇集到地面控制站后,由操作员和计算机共同对多架无人机进行管理控制。不同于以往对无人机系统的直接控制,操作员扮演着监督控制的角色,间歇地与计算机进行交互,从与该计算机连接的受控过程或任务环境中接收反馈,并向其提供高级别的规划、决策等任务命令。为了让无人机操作员高效直观地将自己的指挥意图下达给单架或多架无人机,无人机地面站中面向操作人员的自然化人机交互技术也是研究人员关注的焦点之一。

鼠标、键盘、手柄等是无人机地面站中常见的交互工具,操作人员可以通过这些交互工具对某个虚拟物体或区域进行选择、抓取、缩放、移动等操作。这种基于传统硬件设备的交互控制技术易于操作,但需要外部输入设备的支持,不能为用户提供自然的交互体验,降低了无人机先进地面站的沉浸感。同时,面对无人系统传回的海量、多源的数据信息,传统的交互方式难以支持操作员从中快速准确选取所需信息。因此,研究人员提出了基于体感、语音、脑电等自然化人机交互方法(见表3),可以支持操作人员高效完成对无人机的指挥控制。

表3 交互控制技术总结

Tab.3 Summary of interactive control technology

交互控制技术	优点	缺点
传统硬件设备	精度高、低延迟、反馈感强	较于自然交互不够直观
触控	精度高、多点或多用户的交互	较于自然交互不够直观
体感	自然、易于掌握	受距离和光线影响
语音	自然、易掌握、无须手动输入	受环境噪声影响、不易传递复杂信息
脑电	自然、无须手动输入	精度低、对操作员要求高
眼动	迅速、无须手动输入	不够自然
多模态	融合多种优势	复杂、成本高

5.1 基于体感的指挥控制方法

体感技术指直接使用肢体动作来与周边的装置或环境互动^[112]。基于体感的指挥控制方法在无人机先进地面站中表现为地面操作员直接通过手势等肢体动作,高效地与沉浸式显示的战场环境进行交互,从而达到指挥控制无人系统的目的。

通过手势的方法,主要是无人机地面站通过记录并解释操作员身体部位特定的动作来达到指挥控制的目的。记录手部运动数据的方法分为两种:一种是使用手套传感器感知手部运动^[113-115]。这种方法能够给出精确的结果,然而操作员必须佩戴笨重的设备,这阻碍了操作员与电脑交互的便利性,也不利于沉浸式体验。另一种方法是通过摄像机和计算机视觉识别动态手势^[116-117]。在虚拟现实的三维战场环境中,杜绝了传感器导线等对识别手部运动的阻碍,基于视觉的手势技术更容易实现。传统的输入设备主要有彩色摄像机、深度摄像机等,而新型的输入设备主要以 Kinect^[118]、Leap Motion^[119] 等体感传感器为代表。

5.2 基于语音的指挥控制方法

语言是人类最直接的沟通交流方式,具有交互信息量大、效率高的特点。因此,语音识别也成为一类重要的无人机先进地面站交互控制技术。

基于语音的指挥控制方法,只需要操作员记住唤醒词及语音命令词即可,操作简单且舒适。在沉浸式三维战场环境中,无人机先进地面站中的操作员与被控无人系统间的“交流”将更加拟人化且顺畅。此外,通过语音进行指挥控制也面临着一些独特的挑战,该方法容易受到环境噪声的影响,因此对无人机地面站的降噪能力提出新要求^[120]。

目前无人机地面站中的语音识别主要依托科大讯飞^[121]等技术供应商提供,科大讯飞语音云平台采用基于互联网的分布式 C/S 架构,保证了识别时具有较高的可靠性和稳定性,并且提供了语音合成、语音听写、语音识别等功能。

5.3 基于脑电的指挥控制方法

人脑相较于计算机具有处理更复杂情况的特殊能力。其优势一方面在对情感处理、语义理解和时间相关等非结构化的复杂信息具有更卓越的认知能力。另一方面,人脑总是可以高效自主,甚至无意识、不需要关联的,从感知信息中提取统计结果或相应规律。基于脑电的指挥控制方法指研究人员通过脑机接口技术使脑部的电信号直接与

计算机电信号互动,实现人脑对复杂场景和敏感信息的感知能力与计算机强大的信息处理能力相融合,使得大脑直接与虚拟世界连接沟通,将大脑信号解码为不同设备的直接、间接和隐含控制命令,从而使无人机先进地面站高效完成战场任务。受目前的脑机接口研究水平限制,脑电信号的识别准确率较低,具有多通道、强噪声的缺陷,这就需要研究人员研究低信噪比脑电信号高准确率识别,寻找和探索更有效的无人机指挥控制脑机交互范式^[122]。

5.4 基于多模态的指挥控制方法

集成不同的交互方法可以结合每种方法的优点。基于多模态的指挥控制方法可以增加通信通道的数量、处理高信息负载,用于在复杂环境下增强无人系统和无人机先进地面站操作人员之间的多种信息流传递。多模态信息流面临表示、翻译、对齐、融合和共同学习等挑战。其中多模态融合研究有利于使基于多模态的指挥控制方法更高效。多模态融合方法一般可分为两类:忽略模型方法和基于模型的方法。

忽略模型方法允许对每种交互方式使用不同的模型,具有更大的灵活性。它可以分为早期融合(特征被提取之前)、后期融合(单峰决策并使用一种融合机制,如平均^[123]、投票^[124]、信号方差加权^[125]等)和混合融合(结合了早期融合输出和单峰预测器)^[126]。

基于模型的方法可以归纳为基于核的方法、图形模型和神经网络。基于核的方法^[127-128]允许使用不同的核来处理不同的数据形式及视图。主要缺点是在测试期间依赖于训练数据,导致推理缓慢和内存占用很大;使用浅图形模型如耦合和阶乘隐马尔可夫模型^[129-131]以及动态贝叶斯网络^[132-133]进行多模态融合虽然能够轻松地利用数据的空间和时间结构,允许在模型中加入人类专家的知识,但通常假设图是稀疏的,因而其结果与现实之间存在误差。使用神经网络进行多模态融合的有 Rajagopalan 等^[134]提出的多视图长短期记忆网络模型。这种方法性能良好,且能处理复杂决策边界,但缺乏可解释性。

多模态的指挥控制方法在无人机地面站应用中,有广阔的发展前景。德事隆公司提出的先进驾驶舱概念中就使用了语音命令、图标、预测人工智能、触摸手势等多模态交互方法进行界面交互,以期降低飞行员在高工作负荷环境下的紧张程度及缩短航空专业技术的学习曲线。

6 结论

综上所述,无人机先进地面站技术可以使操作人员更高效地完成对无人机的指挥控制。当前,无人机先进地面站技术仍在不断研究发展中,现有的研究成果在满足自组网集群、有人-无人协同等新型无人机地面站控制需求方面还存在较大的改进空间。

自组网集群控制需求包括无人机先进地面站同时监测和控制多架无人机,通过自组网实现无人机多机协同的同屏多任务操控,以此提高系统集成度及任务执行效率等。

有人-无人协同控制需求包括有人系统与无人系统既各自独立的计算、存储、处理,又自发且平等的交互,在智能技术的支持下实现人机互理解、互信、互操作,相互配合提高整个系统的任务能力等。

这些新的控制需求对控制站带来了更高控制能力、更好人机智能融合能力等方面的挑战。未来研究中,通过人机智能高效融合、极低人机比控制等关键技术研究,地面站的控制能力有望得到进一步提高。

参考文献 (References)

- [1] PAJARES G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs) [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2015, 81(4): 281-329.
- [2] 周焱. 无人机地面站发展综述[J]. *航空电子技术*, 2010, 41(1): 1-6.
ZHOU Y. A review of UAV GCS development [J]. *Avionics Technology*, 2010, 41(1): 1-6. (in Chinese)
- [3] MicroPilot. Horizon^{mp} [CP/OL]. [2022-06-16]. <https://micropilot.com/products-horizonmp.htm>.
- [4] General Atomics Aeronautical Systems, Inc.. Advanced cockpit ground control station flies predator C avenger [CP/OL]. [2022-06-16]. <https://www.ga-asi.com/advanced-cockpit-ground-control-station-flies-predator-c-avenger>.
- [5] Raytheon Intelligence & Space. Multi-domain command and control [CP/OL]. [2022-06-16]. <http://www.raytheonintelligenceandspace.com/what-we-do/decision-superiority/battle-management/mdc2>.
- [6] ArduPilot Dev Team. The mission planner [CP/OL]. [2022-06-17]. <https://ardupilot.org/planner/index.html>.
- [7] Anon. QGroundControl [EB/OL]. [2022-06-17]. <http://qgroundcontrol.com/>.
- [8] HUBER M. Bell unveils single-screen V-280 cockpit [EB/OL]. (2015-05-21) [2022-06-17]. <https://www.ainonline.com/aviation-news/defense/2015-05-21/bell-unveils-single-screen-v-280-cockpit>.

- [9] 蒲泓亦, 李锋, 徐铮, 等. 基于全景图像的空地一体虚拟地理环境构建方法[J]. 地理信息世界, 2022, 29(3): 31-36.
PU H Y, LI F, XU Z, et al. A method of air-ground virtual geographic environment construction based on panorama[J]. Geomatics World, 2022, 29(3): 31-36. (in Chinese)
- [10] 武肖搏, 董志国, 马志鹏, 等. 基于单目聚焦序列图像的对象三维轮廓构建研究[J]. 现代电子技术, 2022, 45(9): 50-54.
WU X B, DONG Z G, MA Z P, et al. Research on object 3D contour construction based on monocular focus sequence images[J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(9): 50-54. (in Chinese)
- [11] BRADLEY D, BOUBEKEUR T, HEIDRICH W. Accurate multi-view reconstruction using robust binocular stereo and surface meshing [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008.
- [12] SONG S, TRUONG K G, KIM D, et al. Prior depth-based multi-view stereo network for online 3D model reconstruction[J]. Pattern Recognition, 2023, 136: 109198.
- [13] WU C C. Towards linear-time incremental structure from motion [C]//Proceedings of International Conference on 3D Vision-3DV, 2013.
- [14] FUHRMANN S, GOESELE M. Floating scale surface reconstruction[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): 1-11.
- [15] SCHÖNBERGER J L, FRAHM J M. Structure-from-motion revisited [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016.
- [16] MOULON P, MONASSE P, MARLET R. Adaptive structure from motion with a contrario model estimation [C]//Proceedings of Asian Conference on Computer Vision, 2012.
- [17] KAZHDAN M, HOPPE H. Screened poisson surface reconstruction[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(3): 1-13.
- [18] JANCOSEK M, PAJDLA T. Multi-view reconstruction preserving weakly-supported surfaces [C]//Proceedings of CVPR, 2011.
- [19] SMITH N, MOEHRLE N, GOESELE M, et al. Aerial path planning for urban scene reconstruction: a continuous optimization method and benchmark[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(6): 1-15.
- [20] HEPP B, NIEBNER M, HILLIGES O. Plan3D: viewpoint and trajectory optimization for aerial multi-view stereo reconstruction[J]. ACM Transactions on Graphics, 2019, 38(1): 1-17.
- [21] ROBERTS M, SHAH S, DEY D, et al. Submodular trajectory optimization for aerial 3D scanning [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2017.
- [22] ZHANG X M, XIE Z. Reconstructing 3D scenes from UAV images using a structure-from-motion pipeline [C]//Proceedings of the 26th International Conference on Geoinformatics, 2018.
- [23] 桂德竹, 林宗坚, 张成成. 倾斜航空影像的城市建筑物三维模型构建研究[J]. 测绘科学, 2012, 37(4): 140-142.
GUI D Z, LIN Z J, ZHANG C C. Research on construction of 3D building based on oblique images from UAV[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(4): 140-142. (in Chinese)
- [24] 李明, 张卫龙, 范丁元. 城市三维重建中的自动纹理优化方法[J]. 测绘学报, 2017, 46(3): 338-345.
LI M, ZHANG W L, FAN D Y. Automatic texture optimization for 3D urban reconstruction[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(3): 338-345. (in Chinese)
- [25] 王文博, 田茂义, 俞家勇, 等. 改进的迭代最近点点云配准方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 390-399.
WANG W B, TIAN M Y, YU J Y, et al. Improved iterative nearest point point cloud alignment method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(2): 390-399. (in Chinese)
- [26] POMERLEAU F, COLAS F, SIEGWART R, et al. Comparing ICP variants on real-world data sets [J]. Autonomous Robots, 2013, 34(3): 133-148.
- [27] OLSON E. M3RSM: many-to-many multi-resolution scan matching [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015.
- [28] REN R K, FU H, WU M P. Large-scale outdoor SLAM based on 2D lidar[J]. Electronics, 2019, 8(6): 613.
- [29] CHEN S B, MA H, JIANG C H, et al. NDT-LOAM: a real-time lidar odometry and mapping with weighted NDT and LFA[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(4): 3660-3671.
- [30] KAN Y C, HSU L T, CHUNG E. Performance evaluation on map-based NDT scan matching localization using simulated occlusion datasets[J]. IEEE Sensors Letters, 2021, 5(3): 5500204.
- [31] GAWEL A, DUBÉ R, SURMANN H, et al. 3D registration of aerial and ground robots for disaster response: an evaluation of features, descriptors, and transformation estimation [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR), 2017.
- [32] SURMANN H, BERNINGER N, WORST R. 3D mapping for multi hybrid robot cooperation [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017.
- [33] YANG B S, ZANG Y F, DONG Z, et al. An automated method to register airborne and terrestrial laser scanning point clouds[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 109: 62-76.
- [34] CHENG L, TONG L H, LI M C, et al. Semi-automatic registration of airborne and terrestrial laser scanning data using building corner matching with boundaries as reliability check[J]. Remote Sensing, 2013, 5(12): 6260-6283.
- [35] KÖNINGER A, BARTEL S. 3D-GIS for urban purposes[J]. GeoInformatica, 1998, 2(1): 79-103.
- [36] TANG H, WANG C, LI P F, et al. Research and achieve 3D

- simulation system of contour extraction [C]// Proceedings of IEEE 3rd International conference on Frontiers Technology of Information and Computer(ICFTIC), 2021: 723-728.
- [37] BROVELLI M A, KILSEDAAR C E, ZAMBONI G. Visualization of VGI data through the new nasa web world wind virtual globe [C]// Proceedings of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2016.
- [38] LYU Z H, LI X M, ZHANG B Y, et al. Managing big city information based on WebVRGIS [J]. IEEE Access, 2016, 4: 407-415.
- [39] 甘麟露. 基于 Web 的大规模三维城市模型可视化关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- GAN L L. Research on web-based visualization technologies of massive 3D city models [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [40] YAO Z H, NAGEL C, KUNDE F, et al. 3DCityDB—a 3D geodatabase solution for the management, analysis, and visualization of semantic 3D city models based on CityGML [J]. Open Geospatial Data, Software and Standards, 2018, 3: 5.
- [41] ILHAM M. Extraction of open street map to produce digital maps [C]// Proceedings of International Conference on Sustainable Infrastructure, 2018.
- [42] 谢林甫. 航空与地面数据集成的城市三维建模方法 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- XIE L F. Integration of aerial and ground data for optimized 3D modelling in urban areas [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (in Chinese)
- [43] 张春奎, 李想, 许有田, 等. 利用 3 维 DLG 数据获取建筑物高度的方法 [J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(6): 115-117, 121.
- ZHANG C K, LI X, XU Y T, et al. The method of acquiring building height using 3D DLG data [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 35(6): 115-117, 121. (in Chinese)
- [44] 王珂, 周传义, 翟敏, 等. 地理时空信息的精细化存储方法 [J]. 中国科技论文, 2018, 13(3): 291-296.
- WANG K, ZHOU C Y, ZHAI M, et al. A precise and detailed storage method of geographical spatial-temporal information [J]. China Sciencepaper, 2018, 13(3): 291-296. (in Chinese)
- [45] 赵彦庆, 程芳, 李鸿飞, 等. 海量空间数据存储与管理云平台设计 [J]. 信息系统工程, 2016(12): 34-36.
- ZHAO Y Q, CHENG F, LI H F, et al. Design of cloud platform for mass data storage and management [J]. China CIO News, 2016(12): 34-36. (in Chinese)
- [46] 王卓琳, 高心丹. 分布式环境下遥感影像数据存储方法 [J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(10): 129-135, 145.
- WANG Z L, GAO X D. Research on remote sensing image data storage in distributed environment [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2018, 37(10): 129-135, 145. (in Chinese)
- [47] 彭瑾, 熊伟, 吴焯, 等. 可扩展的分布式矢量空间数据库集群原型系统研究 [J]. 地理信息世界, 2017, 24(1): 59-64.
- PENG J, XIONG W, WU Y, et al. Research on prototype system of scalable distributed cluster vector spatial database [J]. Geomatics World, 2017, 24(1): 59-64. (in Chinese)
- [48] 杨涛, 沈大勇, 贾军辉. 基于 Oracle RDBMS 的遥感影像分布式存储的研究 [J]. 科学技术创新, 2018(30): 89-90.
- YANG T, SHEN D Y, JIA J H. Research on distributed storage of remote sensing images based on Oracle RDBMS [J]. Scientific and Technological Innovation, 2018(30): 89-90. (in Chinese)
- [49] 李文龙, 卢浩, 云惟英, 等. 空间大数据在 MongoDB 中的存储探索 [J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(增刊 1): 39-41.
- LI W L, LU H, YUN W Y, et al. Research on spatial big data storage in MongoDB [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2017, 40(Suppl 1): 39-41. (in Chinese)
- [50] 邓科. 海量空间数据分布式存储管理系统的研究与实现 [J]. 科学中国人, 2017(11): 17.
- DENG K. Research and implementation of distributed storage management system for massive spatial data [J]. Scientific Chinese, 2017(11): 17. (in Chinese)
- [51] LI J, ZHAO Y, XIE C, et al. Equational buffer and its potential application [C]// Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011.
- [52] 张涵斐, 黄忠红, 孟永军. 海量遥感影像的存储与快速调度显示方法 [J]. 测绘与空间地理信息, 2011, 34(3): 36-39, 43.
- ZHANG H F, HUANG Z H, MENG Y J. Mass remote sensing image storage and rapid scheduling display method [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2011, 34(3): 36-39, 43. (in Chinese)
- [53] 宋娟, 张宏. 基于海量存储的三维地理信息系统应用与研究 [J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(5): 144-148.
- SONG J, ZHANG H. Application and research of three geographic information system based on mass storage [J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(5): 144-148. (in Chinese)
- [54] 鲍鹏, 霍亮, 王锐, 等. 基于嵌入式金字塔模型的城市三维数据组织方法研究 [J]. 北京建筑大学学报, 2017, 33(4): 33-38.
- BAO P, HUO L, WANG R, et al. Research on urban 3D data organization method based on embedded pyramid model [J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017, 33(4): 33-38. (in Chinese)
- [55] LIU J C, MILLS S, MCCANE B. RocNet: recursive octree network for efficient 3D processing [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2022, 224: 103555.
- [56] CHENG H, XIE K, WEN C, et al. Fast visualization of 3D massive data based on improved hilbert R-tree and stacked LSTM models [J]. IEEE Access, 2021, 9: 16266-16278.
- [57] XU Z, ZHANG L, LI H, et al. Combining IFC and 3D tiles to create 3D visualization for building information

- modeling[J]. *Automation in Construction*, 2020, 109: 102995.
- [58] 房鑫言, 芦利斌, 谭力宁, 等. 对无人机地面站软件设计的两种常用方法的比较[J]. *现代计算机(专业版)*, 2012(13): 59-62.
FANG X Y, LU L B, TAN L N, et al. Comparison of two common use methods of unmanned machine earth station software design[J]. *Modern Computer*, 2012(13): 59-62. (in Chinese)
- [59] LUIGI M, MASSIMILIANO M, ANIELLO P, et al. On the validity of immersive virtual reality as tool for multisensory evaluation of urban spaces[J]. *Energy Procedia*, 2015, 78: 471-476.
- [60] MONTIEL C, LOYOLA M. Realidad virtual Como medio de representación de la experiencia especial: su uso en el diseño participativo [C]//*Procedimientos Legales Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital*, 2016.
MONTIEL C, LOYOLA M. Virtual reality as a means of expressing special experience: application in participatory design [C]//*Proceedings of Ibero-American Digital Graphics Society Congress*, 2016. (in Spanish)
- [61] BURNETT D, THORP J, RICHARDS D, et al. Digital twins as a resource for design research[C]//*Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Pervasive Displays*, 2019.
- [62] TOMKO M, WINTER S. Beyond digital twins—a commentary[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2019, 46(2): 395-399.
- [63] 周锋. 三维可视化引擎及关键算法的设计与实现[D]. 北京: 北京大学, 2006.
ZHOU F. Design and implementation of 3D visualization engine and key algorithms [D]. Beijing: Peking University, 2006. (in Chinese)
- [64] 蔺悦. 基于樽海鞘群和阴影模型的高光谱图像解混方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
LIN Y. Research on hyperspectral image unmixing method based on salp swarm algorithm and shadow model [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [65] MAGRO M, BUGEJA K, SPINA S, et al. Interactive cloud-based global illumination for shared virtual environments [C]//*Proceedings of the 11th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games)*, 2019.
- [66] SHAN X M, ZHAO Z H, XU G X. Design and realization of virtual simulation training system for certain type artillery radar [C]//*Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology*, 2010.
- [67] 赵俊峰. 无人机航迹规划虚拟视景仿真系统设计[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
ZHAO J F. UAV route planning virtual vision simulation system design [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019. (in Chinese)
- [68] BALFOUR R E, DONNELLY B P. The what, why and how of achieving urban telepresence [C]//*Proceedings of IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT)*, 2013.
- [69] JAMESON S M, CROZIER M D, PLUNKETT M E. System of system trade analysis of AI/ML processing for joint all-domain operations [C]//*Proceedings of Artificial Intelligence and Machine Learning for Multi-Domain Operations Applications IV*, 2022.
- [70] STOTKO P, KRUMPEN S, SCHWARZ M, et al. A VR system for immersive teleoperation and live exploration with a mobile robot [C]//*Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020.
- [71] 孙柏林. 虚拟现实技术在美国军队中的应用述评[J]. *计算机仿真*, 2018, 35(1): 1-7.
SUN B L. Review of the application of virtual reality technology in American army [J]. *Computer Simulation*, 2018, 35(1): 1-7. (in Chinese)
- [72] 王戈, 王晓宁, 徐顺前. 增强现实技术及其军事应用[J]. *甘肃科技*, 2013, 29(22): 81-82.
WANG G, WANG X N, XU S Q. Augmented reality technology and its military application [J]. *Gansu Science and Technology*, 2013, 29(22): 81-82. (in Chinese)
- [73] 陈玉文. 增强现实技术及其在军事装备和模拟训练中的应用研究 [J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(增刊1): 258-262.
CHEN Y W. Research on application of augmented reality technology in military equipment and simulation training [J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(Suppl 1): 258-262. (in Chinese)
- [74] 王宇希, 张凤军, 刘越. 增强现实技术研究现状及发展趋势[J]. *科技导报*, 2018, 36(10): 75-83.
WANG Y X, ZHANG F J, LIU Y. Augmented reality technology [J]. *Science & Technology Review*, 2018, 36(10): 75-83. (in Chinese)
- [75] LIU C H, SHEN S J. An augmented reality interaction interface for autonomous drone [C]//*Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2021.
- [76] ROBERTS D, MENOZZI A, COOK J, et al. Testing and evaluation of a wearable augmented reality system for natural outdoor environments [C]//*Proceedings of Head- and Helmet-Mounted Displays XVIII-Design and Applications*, 2013.
- [77] SU S B, CAO X B, ZUO X K. Traveling salesman problems on a cuboid using discrete particle swarm optimization [C]//*Proceedings of International Conference on Information Engineering and Applications*, 2011.
- [78] ECKSTEIN S, GLOTZBACH T, AMENT C. Towards innovative approaches of team-oriented mission planning and mission languages for multiple unmanned marine vehicles in event-driven mission [C]//*Proceedings of MTS/IEEE OCEANS-Bergen*, 2013.
- [79] YAN P, TAN B. Evolutionary group theoretic tabu search approach to task allocation of autonomous unmanned aerial vehicles [C]//*Proceedings of 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, 2013.
- [80] HE C, LEUNG J Y T, LEE K, et al. An improved binary search algorithm for the multiple-choice knapsack problem [J]. *RAIRO-Operations Research*, 2016, 50(4/5):

- 995 - 1001.
- [81] LAMANNA L, MANSINI R, ZANOTTI R. A two-phase kernel search variant for the multidimensional multiple-choice knapsack problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 297(1): 53 - 65.
- [82] JIANG X W, ZHOU Q, YE Y. Method of task assignment for UAV based on particle swarm optimization in logistics [C]// *Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence*, 2017.
- [83] ADELGREN N, GUPTA A. Branch-and-bound for biobjective mixed-integer linear programming [J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2022, 34(2): 909 - 933.
- [84] ZHU Q, ZENG H B, ZHENG W, et al. Optimization of task allocation and priority assignment in hard real-time distributed systems [J]. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 2012, 11(4): 1 - 30.
- [85] JIA G Y, HAN G J, JIANG J F, et al. Dynamic resource partitioning for heterogeneous multi-core-based cloud computing in smart cities [J]. *IEEE Access*, 2015, 4: 108 - 118.
- [86] 马焱, 赵捍东, 张玮, 等. 基于自适应烟花算法的多无人机任务分配 [J]. *电光与控制*, 2018, 25(1): 37 - 43.
MA Y, ZHAO H D, ZHANG W, et al. Task allocation for multiple UAVs based on adaptive fireworks algorithm [J]. *Electronics Optics & Control*, 2018, 25(1): 37 - 43. (in Chinese)
- [87] 尹高扬, 周绍磊, 莫骏超, 等. 基于多目标粒子群优化的无人机协同多任务分配 [J]. *计算机与现代化*, 2016(8): 7 - 11.
YIN G Y, ZHOU S L, MO J C, et al. Multiple task assignment for cooperating unmanned aerial vehicles using multi-objective particle swarm optimization [J]. *Computer and Modernization*, 2016(8): 7 - 11. (in Chinese)
- [88] 杨尚君, 孙永维, 庞宇. 基于改进鱼群算法的多无人机任务分配研究 [J]. *计算机仿真*, 2015, 32(1): 69 - 72, 102.
YANG S J, SUN Y W, PANG Y. Research on multi-UAV cooperative task allocation based on improved fish swarm algorithm [J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(1): 69 - 72, 102. (in Chinese)
- [89] WU H, SHANG H L. Potential game for dynamic task allocation in multi-agent system [J]. *ISA Transactions*, 2020, 102: 208 - 220.
- [90] TURNER J, MENG Q G, SCHAEFER G, et al. Distributed task rescheduling with time constraints for the optimization of total task allocations in a multirobot system [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(9): 2583 - 2597.
- [91] CHEN X Y, ZHANG P, DU G L, et al. A distributed method for dynamic multi-robot task allocation problems with critical time constraints [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2019, 118: 31 - 46.
- [92] 李娟, 张昆玉. 基于改进合同网算法的异构多 AUV 协同任务分配 [J]. *水下无人系统学报*, 2017, 25(6): 418 - 423.
LI J, ZHANG K Y. Heterogeneous multi-AUV cooperative task allocation based on improved contract net algorithm [J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2017, 25(6): 418 - 423. (in Chinese)
- [93] BERGMAN K, LJUNGQVIST O, AXEHILL D. Improved path planning by tightly combining lattice-based path planning and optimal control [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2021, 6(1): 57 - 66.
- [94] MA D F, HAO S F, MA W H, et al. An optimal control-based path planning method for unmanned surface vehicles in complex environments [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 245: 110532.
- [95] JIANG Z X, WANG X M, XIE R. 3-D online route planning for UAVs based on an improved PRM [C]// *Proceedings of IEEE Conference Anthology*, 2014.
- [96] UPADHYAY A, SHRIMALI K R, SHUKLA A. UAV-robot relationship for coordination of robots on a collision free path [J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 133: 424 - 431.
- [97] 曾国奇, 赵民强, 刘方圆, 等. 基于网格 PRM 的无人机多约束航路规划 [J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(10): 2310 - 2316.
ZENG G Q, ZHAO M Q, LIU F Y, et al. Multi-constraints UAV path planning based on grid PRM [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(10): 2310 - 2316. (in Chinese)
- [98] BHANDARI S, SRINIVASAN T. Path-planning around obstacles for a quadrotor UAV using the RRT algorithm for indoor environments [C]// *Proceedings of AIAA Infotech @ Aerospace*, 2016.
- [99] 陈逸怀, 朱博. 基于单元分解法的移动机器人遍历路径规划 [J]. *装备制造技术*, 2014(4): 148 - 149, 152.
CHEN Y H, ZHU B. Complete coverage path planning of mobile robot based on partition of unity method [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2014(4): 148 - 149, 152. (in Chinese)
- [100] 丁家如, 杜昌平, 赵耀, 等. 基于改进人工势场法的无人机路径规划算法 [J]. *计算机应用*, 2016, 36(1): 287 - 290.
DING J R, DU C P, ZHAO Y, et al. Path planning algorithm for unmanned aerial vehicles based on improved artificial potential field [J]. *Journal of Computer Applications*, 2016, 36(1): 287 - 290. (in Chinese)
- [101] 黄海涛. 基于无人机的未知环境自适应智能监控系统 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
HUANG H T. Drone-based adaptive intelligent monitoring system in unknown environment [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [102] TRIPATHI S K, SAPRE R M. Robust target localization and tracking using Kalman filtering for UGV-UAV coordinated operation [C]// *Proceedings of International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, 2017.
- [103] 霍梦真, 魏晨, 于月平, 等. 基于鸽群智能行为的大规模无人机集群聚类优化算法 [J]. *中国科学: 技术科学*,

- 2020, 50(4): 475–482.
- HUO M Z, WEI C, YU Y P, et al. Clustering optimization algorithm for large-scale unmanned aerial vehicle based on intelligent behavior of pigeons [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2020, 50(4): 475–482. (in Chinese)
- [104] 刘森琪, 王鸿, 于宁宇, 等. 基于信息素启发狼群算法的 UAV 集群火力分配 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(2): 297–305.
- LIU S Q, WANG H, YU N Y, et al. Weapon-target assignment in UAV cluster based on pheromone heuristic wolf pack algorithm [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(2): 297–305. (in Chinese)
- [105] MOALLEMI C C, VAN ROY B. Consensus propagation [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(11): 4753–4766.
- [106] 郑小祥. 分布式任务分配及其冲突消解研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2014.
- ZHENG X X. Research on distributed task assignment and conflict resolution [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [107] SUI D, ZHANG K. A tactical conflict detection and resolution method for en route conflicts in trajectory-based operations [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 2022: 9283143.
- [108] WU Y, LOW K H, HU X T. Trajectory-based flight scheduling for AirMetro in urban environments by conflict resolution [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 131: 103355.
- [109] LIU H X, LIU F, ZHANG X J, et al. Aircraft conflict resolution method based on hybrid ant colony optimization and artificial potential field [J]. *Science China Information Sciences*, 2018, 61(12): 129103.
- [110] 魏瑞轩, 吕明海, 茹常剑, 等. 基于 DE-DMPC 的 UAV 编队重构防撞控制 [J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(12): 2473–2478.
- WEI R X, LYU M H, RU C J, et al. Reconfiguration collision avoidance method for UAV's formation based on DE-DMPC [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(12): 2473–2478. (in Chinese)
- [111] 茹常剑, 魏瑞轩, 戴静, 等. 基于纳什议价的无人机编队自主重构控制方法 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(8): 1349–1359.
- RU C J, WEI R X, DAI J, et al. Autonomous reconfiguration control method for UAV s formation based on Nash bargain [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(8): 1349–1359. (in Chinese)
- [112] KURET E. Emily shaw, gesture in multiparty interaction [J]. *Language in Society*, 2021, 50(2): 325–326.
- [113] SUH J H, AMJADI M, PARK I, et al. Finger motion detection glove toward human-machine interface [C]// *Proceedings of IEEE SENSORS*, 2016.
- [114] HOANG T N, SMITH R T, THOMAS B H. Passive deformable haptic glove to support 3D interactions in mobile augmented reality environments [C]// *Proceedings of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 2013.
- [115] SZELITZKY E, ALUȚEI A M, CHETTRAN B, et al. Data glove and virtual environment—a distance monitoring and rehabilitation solution [C]// *Proceedings of E-Health and Bioengineering Conference (EHB)*, 2011.
- [116] 李文生, 解梅, 邓春健. 基于机器视觉的动态多点手势识别方法 [J]. *计算机工程与设计*, 2012, 33(5): 1988–1992.
- LI W S, XIE M, DENG C J. Dynamic multi-point gesture recognition based on machine vision [J]. *Computer Engineering and Design*, 2012, 33(5): 1988–1992. (in Chinese)
- [117] 郭子雷. 基于计算机视觉的手势识别系统的设计与实现 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- GUO Z L. The design and implementation of gesture recognition based on computer vision [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [118] MASHOOD A, NOURA H, JAWHAR I, et al. A gesture based kinect for quadrotor control [C]// *Proceedings of International Conference on Information and Communication Technology Research (ICTRC)*, 2015.
- [119] MOLINA G, GIMENO J, PORTALÉS C, et al. A comparative analysis of two immersive virtual reality systems in the integration and visualization of natural hand interaction [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2022, 81(6): 7733–7758.
- [120] YADAVA G T, JAYANNA H S. Enhancements in automatic Kannada speech recognition system by background noise elimination and alternate acoustic modelling [J]. *International Journal of Speech Technology*, 2020, 23(1): 149–167.
- [121] 佚名. 科大讯飞 智能语音领军者 [J]. *中国名牌*, 2020(12): 64. (in Chinese)
- Anon. Iflytek intelligent voice leader [J]. *China Top Brands*, 2020(12): 64. (in Chinese)
- [122] LAN Z, YAN C, LI Z X, et al. MACRO: multi-attention convolutional recurrent model for subject-independent ERP detection [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2021, 28: 1505–1509.
- [123] SHUTOVA E, KIELA D, MAILLARD J. Black holes and white rabbits: metaphor identification with visual features [C]// *Proceedings of the Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, 2016.
- [124] MORVANT E, HABRARD A, AYACHE S. Majority vote of diverse classifiers for late fusion [C]// *Proceedings of IAPR Joint International Workshops on Statistical Techniques in Pattern Recognition and Structural and Syntactic Pattern Recognition*, 2014.
- [125] EVANGELOPOULOS G, ZLATINTSI A, POTAMIANOS A, et al. Multimodal saliency and fusion for movie summarization based on aural, visual, and textual

- attention[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2013, 15(7): 1553–1568.
- [126] LAN Z Z, BAO L, YU S I, et al. Multimedia classification and event detection using double fusion [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2014, 71(1): 333–347.
- [127] BUCAK S S, JIN R, JAIN A K. Multiple kernel learning for visual object recognition: a review[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2014, 36(7): 1354–1369.
- [128] PENG Y R, QIU T R, WEI L L. An approach to extracting graph kernel features from functional brain networks and its applications to the analysis of the noisy EEG signals[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2023, 80: 104269.
- [129] ZIA T, ARIF Z. Probabilistic data fusion model for heart beat detection from multimodal physiological data [J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2017, 25: 449–460.
- [130] XIAO Q K, QIN M Y, GUO P, et al. Multimodal fusion based on LSTM and a couple conditional hidden Markov model for Chinese sign language recognition [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 112258–112268.
- [131] MAMYRBAYEV O Z, ALIMHAN K, AMIRGALIYEV B, et al. Multimodal systems for speech recognition [J]. *International Journal of Mobile Communications*, 2020, 18(3): 314–326.
- [132] NOULAS A, ENGLEBIENNE G, KROSE B J A. Multimodal speaker diarization [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(1): 79–93.
- [133] WU Z D, YANG J J, ZHANG J W, et al. Multibiometric fusion authentication in wireless multimedia environment using dynamic Bayesian method [J]. *Security and Communication Networks*, 2018, 2018: 5783976.
- [134] RAJAGOPALAN S S, MORENCY L P, BALTRUŠAITIS T, et al. Extending long short-term memory for multi-view structured learning [C]//*Proceedings of European Conference on Computer Vision*, 2016.