

面向城市治理的无人机管控平台设计与实现

王安平

(南京大学建筑与城市规划学院, 江苏南京 210089)

摘要: 针对政务无人机应用存在的“九龙治水”、跨平台协同不足问题,设计了一种城市级无人机综合管控平台架构。首先,在应用架构方面采用基础设施层、数据层、平台层、应用层、门户层五层开放体系;其次,在功能架构方面创新“业务平台+飞控平台”双核模式,业务平台面向政府用户,提供从智能调度到处置闭环的全流程管理,飞控平台通过标准协议接入多厂商无人机,实现异构设备统一管控;最后,介绍了飞控平台实现低延迟指令传输与智能决策的技术支撑,包括无人机领域的载荷集成化、集群协同工作、多源数据融合与大模型、通信安全的应用和发展趋势。实践表明,所提架构可整合分散的无人机资源,为智慧城市提供统一的空中感知与协同处置能力。

关键词: 架构设计;功能设计;城市治理;无人机;关键技术

DOI: 10.11907/rjdk.251328

扫描二维码阅读全文:



中图分类号: V279

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2026)008-0124-07

Design and Implementation of a UAV Control Platform for Urban Governance

WANG Anping

(School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210089, China)

Abstract: A city level UAV integrated management and control platform architecture is designed to solve the problems of "Jiulong Water Control" and insufficient cross platform collaboration in the application of government UAVs. First of all, in terms of application architecture, it adopts a five tier open system of infrastructure layer, data layer, platform layer, application layer and portal layer; Secondly, innovate the dual core mode of "business platform+flight control platform" in terms of functional architecture. The business platform is oriented to government users and provides full process management from intelligent scheduling to closed-loop disposal. The flight control platform accesses multi manufacturer UAVs through standard protocols to achieve unified control of heterogeneous devices; Finally, the technical support for flight control platform to realize low delay command transmission and intelligent decision-making is introduced, including the load integration, cluster cooperation, multi-source data fusion and large model, and the application and development trend of communication security in the UAV field. Practice shows that the proposed architecture can integrate decentralized UAV resources and provide a unified air perception and collaborative disposal capability for smart cities.

Key Words: architecture design; functional design; urban governance; UAV; key technology

0 引言

无人机作为监测工具,具有机动灵活、作业成本低、可搭载多种传感器、智能化水平高等特点。在应对突发和临时性事件、保障人员难以到达的危险区域、周期性的大面积监测等场景中,具有较大优势。2017年以来,无人机技术已广泛应用于城市运营领域,城市政府的各个服务部门纷纷采用无人机技术执行多样化的辅助任务^[1-2]。在实际应用中,无人机部署主要包括两种模式:一种是各部门根据各自业务需求独立构建无人机平台,导致资源重复配

置;另一种是构建统一的无人机综合管控平台(管控平台),服务于所有政府部门,但面临着如何与城市综合治理平台(治理平台)有效协同的挑战^[3]。

针对上述现状,本文提出一种创新性的解决方案:将城市综合治理平台中与无人机相关的管控功能模块独立分离,改造成一个可接入异构无人机的全市统一无人机综合管控平台。该平台既能完成治理平台提出的业务需求,又可独立高效地完成无人机的巡检任务,具备异构无人机动态接入能力、无人机实时性操纵保障能力、与治理平台的数据共享能力、通信与数据安全保障能力。

收稿日期: 2025-07-16

作者简介: 王安平(1994-),男,南京大学建筑与城市规划学院硕士研究生,研究方向为智慧城市。本文通讯作者: 王安平。

1 无人机管控平台设计

1.1 系统需求分析

1.1.1 城市治理典型场景

无人机遥感行业应用起始于测绘领域,逐渐向农林、地质灾害、电力等领域扩张,其中电力行业的应用发展最为迅猛^[4-6]。近两年,得益于国家政策推动的低空经济热潮,无人机在城市治理中的应用快速铺开,涵盖自然资源服务、城市建设管理、基础设施服务、防灾减灾服务、社会治理服务、生产生态服务六大领域,如表 1 所示^[1,7-10]。

1.1.2 系统功能需求

管控平台要满足基础运行、协同治理、安全合规三大核心功能要求。

(1)基础运行。异构无人机的动态接入功能,要求兼

容自主定制和主流厂商的无人机、单体异构和集成传感器。单机的路径规划和集群的任务调度功能,需支持三维空间的航线生成和多机协同工作,还要满足复杂环境中的自动避障和多任务的优先级排序。

(2)协同治理。多模态数据融合是指无人机的视频、图片和传感器数据要在城市管理制度的基础上形成判定能力,这也是行业应用的基础。智能决策通过人工智能的行业数据进行训练,实现场景感知、智能预警、任务自主分配等功能。跨平台联动,与治理平台各业务部门实现无缝对接,支持基于触发事件的任务分配、人工介入决策及资源协同调度。

(3)安全合规。空域管控能对接民航局空域数据,自动规避禁飞区与临时管制区域。权限分级管控通过多角色设计实现权限管理(部门领导、业务科员、飞手),支持操作行为的实时审计与追溯。数据传输安全支持端到端的数据保密传输与防篡改的飞行日志存证。

Table 1 Applications of UAVs in urban governance
表 1 无人机在城市治理中的应用

应用领域	应用场景	具体业务
自然资源服务	规划管理	土地用途调查、用地实施情况跟踪、三维实景建模
	林草管理	种类调查、产量预估、病虫害监测、盗挖盗砍监测
	地质调查	水土流失、矿产资源监测、地质遗迹保护、地质填图
	海洋服务	海事巡检、岛礁测绘、海洋生态监测、物资运输
城市建设管理	项目建设	建设项目环境评估、建筑施工监测与进度管理
	城市管理	危房检测、违章建筑查处、占道经营巡查、环境卫生督察
	文物保护	考古勘察、古建筑结构隐患排查、数字文物建设
	道路	桥梁隧道检测、道路沉降监测、路政巡查、高速公路巡检、铁路巡检
基础设施服务	交通	交通疏导、勘查取证、邮政物流、低空客运
	电力	电力架线、电站检测、电力检修、太阳能电站巡检、风电场运维
	燃气	管道巡检、站点检测
	通信	线路巡检、通信基站巡检与维护
防灾减灾服务	应急救援	交通救援、消防救援、洪涝救援、疫情救援、地质灾害应急、通信保障应急、搜救与救援
	消防	火灾预警、救援指挥、城市灭火、森林防火
	地质灾害	灾害监测预警、灾区地形地貌建模、地震搜救
	水利	水域监测、河底地形勘测、水坝变形观测、非法侵入预警、河道治理、渔船监测
社会治理服务	安防	安防巡检、安防预警、安防应急
	公安	大型活动人群管控、日常空中警力、犯罪追踪打击、执法取证
	文化	空中展示和灯光秀、新闻采访与报道、拍摄电影和广告
	环保	污染源追踪、环境取样分析、违法取证
生产生态服务	国防	边界巡检、空中侦查、空中打击、训练靶机、军事活动
	农业生产	土壤修复、播种、植保喷洒、植物分析、生长评估、畜牧监测、虫害预警
	矿业生产	矿区勘探、场地勘测、监控库存、设备检查
	水域监测	水质监测、水污染监测、水流流速检测

1.1.3 系统性能指标要求

管控平台要满足系统运行的实时性、稳定性、扩展性、安全性指标要求,如表 2 所示^[11]。

1.2 总体架构

面向城市治理的无人机管控平台架构是一个开放的层次型架构,需要与城市综合治理平台进行高频的数据交换。为了满足无人机管控平台的通用性、扩展性和定制化能力,将该架构设计为五级分层架构,具体为基础设施层、数据层、平台层、应用层、门户服务层,如图 1 所示。其中,平台层和应用层是与城市综合治理平台进行衔接的核心。

(1)设施层。该层包含无人机及其地面站点,支撑管控平台运行的必要软硬件,如机房、服务器、网络通信设备和相关软件环境等^[12]。作为政府公共服务平台,对安全性和稳定性的要求极高,必须具备一定的容灾能力。

(2)数据层。管控平台自建三大数据库,涵盖无人机基础数据、传感器载荷采集数据和平台运行配置数据。城市时空大数据分为基础时空地理数据、城市管理对象数据和城市感知数据,业务处理数据是在部门业务处理中产生的数据^[13]。管控平台只需建立存放获取的城市感知数据的数据库,业务支撑所需数据直接调取治理平台的基础时空地理数据、城市管理对象数据,并将最终的业务处理结

Table 2 Performance requirements of UAV control platform system

表2 无人机管控平台系统性能要求

指标类型	指标要求
实时性	指令响应延迟:控制指令传输延迟≤80 ms
	视频分析时效:以1 080 P视频流为基准的识别延迟≤200 ms
	应急响应启动:无人机的触发出勤时间满足部门业务需求 并发处理能力:满足部门业务场景需要的同时在线架次
稳定性	服务可用性:系统全年可用率≥99.9%
	容错恢复时间:单节点故障恢复时间≤5 s
扩展性	协议兼容度:至少支持单一部门的飞控协议种类数的动态适配
	抗攻击能力:抵御200 Gbps级DDoS攻击
安全性	数据完整性:飞行数据篡改检测率≥99.6%
	通信可靠性:复杂城区环境通信丢包率≤0.5%

果数据存放至治理平台的业务处理总数据库,或分发给各个政府部门的业务处理数据库。

同时,定义平台的核心领域模型实现平台内部和对外交互的统一,以此保证多源数据平台内部数据的一致性和接口清晰度。其中,通过消息队列的确认机制(ACK)、重试(Retry)和死信队列(Dead Letter Queue)等核心策略保障数据一致性;全程采用HTTPS(TLS 1.2/1.3)通信保证数据传输安全;敏感字段(证书、口令等)数据库采用加密存储(AES-256)方式;更高等级的敏感通信通过VPN/专线进行。

(3)平台层。该层是管控平台的核心,是应用层各项业务能力的基础支撑,包括无人机端的运行维护能力等。其中,平台端与外部系统的接入能力相匹配,包括与异构无人机的动态接入能力、与城市综合治理平台的数据交换能力。数据的采集、治理能力包括无人机采集数据的储存和管理、对外部数据库的名录管理和映射,后者是管控平台调用外部数据进行业务处理的基础。应用层的通用能力支持包括数据的防篡改认证、三维可视化能力、融合分析运用和展示能力,通过工作流引擎进行工单流程处理、

组合应用组件。

(4)应用层。针对城市运行的六大领域设计相关应用功能。首先,集成Camunda、Flowable、Activiti等任意一个工作流引擎,通过图形化配置不同政务部门的流程、节点,对应部门审批、任务触发等;其次,每个部门都拥有自己的流程定义文件(XML/JSON格式),以保证平台的可移植性;再次,使用Nacos、Apollo、Consul、Spring Cloud Config等组件作为配置中心,管理不同城市/部门的运行参数,涵盖权限控制策略、通知方式阈值、地图服务密钥等;最后,支持个性化配置,无需修改代码即可适应不同环境。

(5)门户服务。该层使用弹性自适应窗口组件,可在管控平台大屏、Web端、PC端、移动端通用,也可作为窗口组件被集成到城市综合治理平台。

为了增强平台的通用性、可定制性,采用分层解耦设计将平台层独立于具体应用逻辑和硬件接口。其中,调度、数据处理、通信等通用能力位于平台层;各政务部门的具体功能定制位于应用层。同时,根据政务需求采用平台的标准通信协议进行通讯,数据流转通过消息队列(如Kafka、RabbitMQ)中间件,先依据具体功能需求设计分发策略,再将信息传输给平台层的各类中台。

为了增强平台的扩展性,无人机协议管理平台的动态接口采用可插拔适配器模式,并为平台定义了标准的内部数据格式和指令集,可将厂商SDK/通信协议转换为核心平台的标准格式,增加新无人机时,只需开发新的适配器即可使用。

1.3 功能结构设计

1.3.1 无人机综合管控平台

无人机管控平台的功能设计以业务平台为主、飞控平台为辅,如图2所示。其中,业务平台的用户是各个政府部门的业务科员,具体设计围绕各部门的业务展开;飞控



Fig. 1 Overall architecture design of UAV management platform

图1 无人机管控平台总体架构设计

平台以各部门下发的任务为基础,要求专业飞手执行无人机飞行任务。

同时,无人机管控平台应具备常态运行、应急管理两种工作模式,不同模式下的资源调动量和任务执行优先级逻辑存在较大差别。在应急管理模式下,要求各部门间的

工作协同性更高,计算资源更集中,通过共享信息来共同制定、执行应急方案,以确保无人机能优先迅速、准确地执行应急任务。

此外,在平台首页对平台运行数据进行概括性展示,提供后台配置入口并集成人工智能助手。

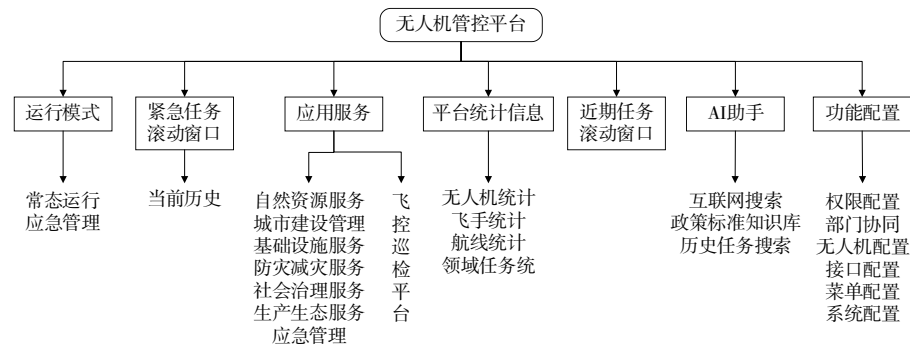


Fig. 2 Functional structure of UAV control platform

图2 无人机管控平台功能结构

1.3.2 无人机飞控平台

飞控平台为无人机巡检作业提供了全流程智能化的管理解决方案,采用模块化设计整合了六大核心功能,如图3所示。该六大核心功能包括:①支持全周期任务管理(创建、编辑、调度、执行、历史追溯),兼容手动控制与自动飞行模式,配备智能返航及安全设置;②通过资产管理、无人机库管理、站点管理实现设备全生命周期管控,并结合

三维监控大屏实时掌握资产状态;③提供实时数据流监控、数据分析及可视化报告生成功能,支持数据存储共享与故障智能追踪;④包含多级用户权限管理、系统安全配置及维护日志审计,以确保平台数据安全;⑤集成了系统更新维护、设备维护日志等运维管理模块;⑥通过可视化仪表盘实现全局态势感知与决策支持。

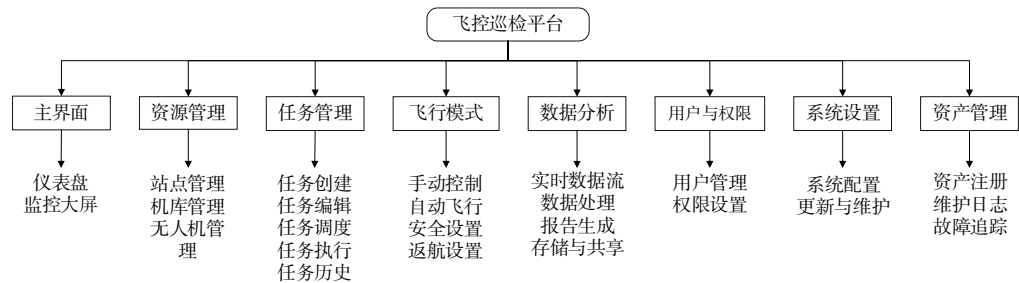


Fig. 3 Functional structure of UAV flight control platform

图3 无人机飞控平台功能结构

1.3.3 无人机业务平台示例

本文以无人机在自然资源领域服务为例,通过深度融合无人机技术与地理空间服务能力,构建“场景—业务—数据”联动的智能管理中枢,如图4所示。在不同功能层级,结合“统计面板”对无人机、飞手、航线进行多维度效能分析(任务执行率、设备利用率等)。在具体业务操作层面,通过集成机场监控、气象参数、载荷控制等基础参数模块,形成“空天地”一体化作业闭环。在执飞界面中,依据业务需要可自由切换手动控制或自动飞行模式。

1.3.4 业务平台的通用任务处理流程

无人机监测是城市治理手段的补充,主要应用于突发性、周期性、人为作业效率低的业务场景。根据一般业务问题的处理流程(现场监测、问题分析、任务分发、任务处理、结果反馈、监测验收)可知,无人机的巡检功能主要运

用在前3个环节和检测验收环节。

目前,无人机管控平台深度接入城市综合治理体系,构建了“工单驱动—智能调度—任务执行—数据闭环”的全流程数字化管理链路,如图5所示。

首先,业务流程始于业务部门发起的工单填报,经人工审核确认后,由管控平台自动执行飞手匹配(优先部门自有飞手或调用平台注册飞手);其次,同步启动航线智能设计模块,支持调用预设航线或实时规划巡检路径;再次,将任务指令下发至无人机,执行日常巡检并实时回传数据;最后,通过数据存档与业务分析模块,将巡检结果关联至城市问题分析、资源动态监测等场景,形成“任务执行—数据沉淀—决策优化”的闭环管理。综上,平台通过标准化流程衔接人工审核与自动化调度,显著提升了城市巡检效率及数据应用价值。

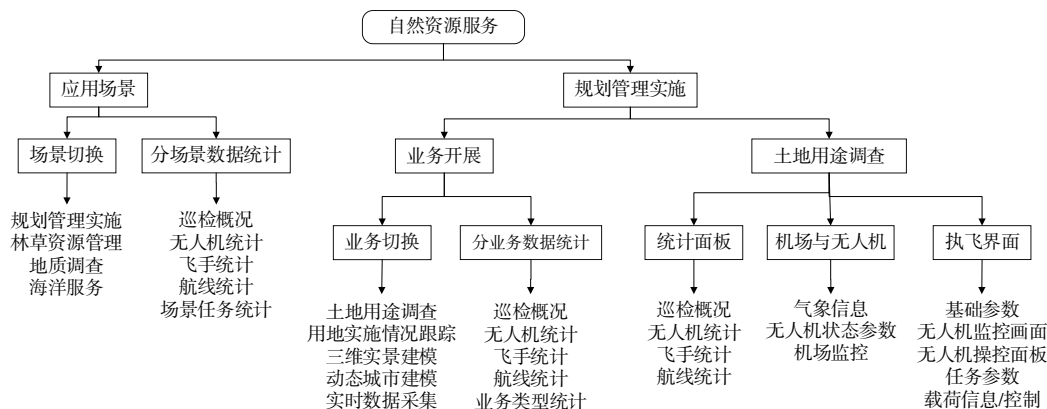


Fig. 4 Functional structure of application domain module

图4 应用领域模块的功能结构

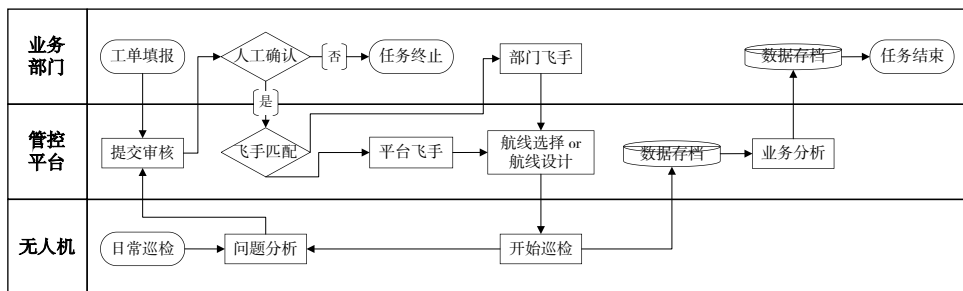


Fig. 5 Common task flow

图5 通用任务流程

2 关键技术研究进展

本文从城市治理应用领域出发,将各政府部门已投入运营的无人机进行组网,但存在以下问题:规模扩大时通信负载和系统复杂度激增、如何保证多类型无人机的动态接入、不同种类业务工作对自适应调整能力的要求等。此外,单体无人机的感知和计算能力有限,随着应用环境和任务之间的复杂性增加,单机已无法满足应用需求。

本文为了更好实现所提架构,剖析了在城市治理领域支撑平台功能中落地的前沿无人机技术,发现需突破的关键技术包括:无人机载荷能力、高效的平台动态接入能力、无人机与平台之间的通信安全。无人机集群协同感知计算既是这3个技术的解决方案,也是未来无人机领域的主要发展方向^[11,14-16]。此外,弹性计算框架、机器学习、大语言模型也可对无人机集群协同感知计算提供有效支撑^[17]。

2.1 无人机载荷及其运用

遥感载荷是无人机实现行业应用的基础,按功能进行分类的结果如表3所示。在实际的业务场景中,往往需要多种载荷协同工作才能满足具体的业务需求。例如,重庆北碚区城市管理局部署8台搭载多光谱传感器与高清镜头的无人机,通过15条预设航线识别违建、黑臭水体等15类问题,AI算法将事件响应时间从4 h缩短至30 min,月均发现问题200余个^[18];苏州高新区“低空城管”机场的无人机集群,配备了热成像、烟雾识别、远程喊话系统,可完成

森林防火、违规停车抓拍、应急抢险等任务,通过“无人机+AI+物联网”技术闭环使投诉处理时效提升40%^[19]。

Table 3 Types of unmanned aerial vehicle remote sensing payloads

表3 无人机遥感载荷类型

功能	载荷类型
二维图像生成	数码相机、高分辨率相机
三维模型生成	激光雷达(LiDAR)、合成孔径雷达(SAR)、深度相机、声纳传感器
物质属性检测	合成孔径雷达(SAR)、多光谱/高光谱相机、探地雷达
物体裂纹、形变检测	超声波传感器、激光雷达(LiDAR)、合成孔径雷达(SAR)、深度相机、声纳传感器

当前,载荷技术的瓶颈在于:①受消费级无人机载重能力的限制,搭载的传感器必须重量轻、体积小、耗能低;②国内科研院所和企业擅长于无人传感器设备集成,但在传感器的核心部件上长期依赖进口,国产无人机的遥感载荷研制水平距离成熟的行业应用还有不小的提升空间^[4];③当前的载荷和无人机平台大多相互独立、无法相互调用。

综上,未来发展趋势在于:多载荷集成、载荷与无人机一体化、无人机边缘计算。

2.2 异构无人机动态接入技术

随着无人机产业不断发展,市面上涌现出各种制式的无人机。各类无人机的生产商不同、生产批次不同,无人机平台的开源情况也各不相同,造成了管控平台和无人机

之间通信、无人机集群之间通信的困难,难以形成统一的通信标准和实现数据实时可靠传输。对于统一的通信标准而言,无人机集群的自组网技术研究刚起步,虽已具备一定的研究基础,但信号传输与消息传递并无统一规范,各大厂商的无人机无法实现自组网的通用控制^[20-21]。对于数据实时可靠传输而言,无人机的数据按传输方向可分为上行数据和下行数据,从平台端到无人机端为上行,反之为下行,难点在于随着载荷信息采集能力不断增强,下行数据(即大量采集数据的回传)对带宽的要求非常高。

针对多平台的系统通信问题,数据链是当下较为成熟的解决方案,研究者主要关注无人机数据链系统的通信规则设计(控制协议)和通信模式选择(接口通信协议)^[22-23]。然而,随着无人机集群规模的不断扩大,将涉及无人机集群的规模扩张和节点种类变化、协同感知计算能力的拓展、不同任务的适应能力等问题。针对第一个问题,弹性计算框架可通过实时监测各个节点的算力状态和网络拓扑,动态调整各节点的工作量;针对第二个问题,小规模集群可采用强化学习进行任务分配,在大规模集群任务分配中大语言模型正被逐步采用;针对第三个问题,可通过强化学习分配和优化不同任务和资源^[14]。

2.3 多模态数据融合与智能决策

通常情况下,无人机的载荷只能实现基础数据的收集,无法就业务需求作出判断。在行业应用中,一般采取两种方案来解决这个问题:①对于小数据量且不需要与平台数据库进行信息比较的任务,在无人机上搭载轻量化AI模型进行本地化处理,以降低延迟;②对于有较高算力要求的大数据量或需要与平台数据库进行信息比较的任务,将采集信息传回至地面端进行处理,但延迟较高。

多模态数据融合能力是指导无人机智能决策的基础,上述两种处理方式均基于多模态数据融合能力技术衍生出的技术手段。通过算法或大模型融合无人机载荷采集的图像、声音和传感器信息,并与平台数据库的信息进行比较,以指导无人机下一步行动。然而,异构无人机载荷的传感器型制和批次不同,采集数据的环境、时空分辨率、数据空间维度均不一致,管控平台数据库的数据结构复杂,目前对此类具备时空属性的数据进行高效关联融合和管理的手段较为匮乏^[4,13]。

随着深度学习、多模态大模型技术的发展,无人机系统的智能化有望推进。其中,多任务学习可对多源数据进行高效融合;深度学习可提升遥感数据信息提取效率,使无人机直接实现自主目标锁定。多模态大模型不仅具备复杂环境的分析和理解能力,还继承了大语言模型的便捷人机交互能力,可依据无人机和环境的实时状态动态分配任务和路径规划。将该技术运用到无人机系统的难点在于:大模型与复杂的无人机系统集成、大模型在执行关键任务时如何保证可靠性、有限的无人机计算资源与大模型算力要求的矛盾、数据安全和隐私等^[24]。

2.4 安全运行保障技术

无人机管控平台的业务开展涉及多个平台的接入和多个政府部门业务协同,因此对数据提出了防泄密、防篡改、分级权限的要求^[25]。具体地,通过入侵检测、信道加密技术和应急熔断机制设计动态防御体系,及时发现入侵等异常情况,保证遥控指令、载荷数据的机密性。针对超负荷的攻击情况,自动切断通信链路并自动返航或迫降。

民航局发布的行业标准(MH/T 2015-2024),明确提出使用区块链技术对飞行数据进行全生命周期存证管理。区块链特有的分布式账本、Hash算法和多方共识机制,可有效防止飞行数据被篡改^[24,26,27]。分级权限设计的关键在于身份认证的权威性,可通过SM2国密证书与协同签名算法实现双向身份认证。

3 结语

本文针对当前的政务无人机行业应用“九龙治水”、无人机飞控平台与城市综合治理平台难以协同的情况,提出面向城市治理的无人机管控平台架构设计方案。该方案将各政府部门的无人机运营统一到同一飞控巡检平台上,并抽离城市治理平台各个部门的业务处理算法,实现了无人机资源的高效利用,保证了无人机飞控指令的低延迟和感知数据的处理效率。

同时,对无人机飞控系统接入城市治理平台的关键软硬件技术进行总结,发现将无人机飞控系统接入城市治理平台的关键为:①无人机的载荷轻量化、集成化;②无人机集群及其控制平台的边缘计算能力;③统一的通信标准;④多模态数据的处理技术发展及与其无人机系统的整合。

参考文献:

- [1] ZHU J. Application and development trends of UAV monitoring technology in urban operations management[J]. Cybersecurity and Informatization, 2025(1): 14-16.
朱靖. 无人机监测技术在城市运行管理中的应用与发展趋势[J]. 网络安全和信息化, 2025(1): 14-16.
- [2] YAN C, TU L H, WANG Y H, et al. Overview of UAV applications in civilian fields in China[J]. Flight Dynamics, 2022, 40(3): 1-6, 12.
闫超, 涂良辉, 王聿豪, 等. 无人机在我国民用领域应用综述[J]. 飞行力学, 2022, 40(3): 1-6, 12.
- [3] XI C H, LIU L, ZHAO H P, et al. Design and implementation of Nantong spatiotemporal information cloud platform[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(3): 137-142.
奚春华, 刘莉, 赵和鹏, 等. 南通时空信息云平台的设计与实现[J]. 测绘地理信息, 2023, 48(3): 137-142.
- [4] GUO Q H, HU T Y, LIU J, et al. Progress in lightweight UAV remote sensing and its industrial applications[J]. Progress in Geography, 2021, 40(9): 1550-1569.
郭庆华, 胡天宇, 刘瑾, 等. 轻小型无人机遥感及其行业应用进展[J]. 地理科学进展, 2021, 40(9): 1550-1569.
- [5] LI Y L. Design and implementation of UAV management system for power inspection[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2024.

- 李友利. 面向电力巡检的无人机管控系统设计与实现[D]. 南京:南京信息工程大学, 2024.
- [6] LI J H, ZHANG M M, XIONG D Y. UAV inspection management platform based on real-time information transmission technology[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, 43(6): 165-167, 171.
- 李君海, 张苗苗, 熊道洋. 基于实时信息传输技术的无人机巡检管控平台[J]. *测绘与空间地理信息*, 2020, 43(6): 165-167, 171.
- [7] LIU D Z. Future applications of UAVs in urban planning, management and operations[J]. *Future City Design and Operations*, 2023(7): 42-44.
- 刘德政. 未来无人机在城市规划、管理、运营中的应用探讨[J]. *未来城市设计与运营*, 2023(7): 42-44.
- [8] ZENG Z F, XIE L F. Human-vehicle flow detection method based on dual attention mechanism, trajectory prediction and UAV remote sensing technology[J]. *Software Guide*, 2024, 23(6): 75-84.
- 曾张帆, 谢临风. 基于双重注意力机制、轨迹预测与无人机遥感技术的人车流量检测方法[J]. *软件导刊*, 2024, 23(6): 75-84.
- [9] LIU F F, WANG H F, ZHANG A B, et al. Land use classification of UAV images based on improved DeeplabV3+: a case study of residential areas near Yuecheng Reservoir[J]. *Software Guide*, 2022, 21(11): 130-136.
- 刘粉粉, 王贺封, 张安兵, 等. 基于改进 DeeplabV3+ 的无人机影像土地利用分类——以岳城水库附近居民区为研究区[J]. *软件导刊*, 2022, 21(11): 130-136.
- [10] DING L F, LI X Y. Analysis of Jiangsu expressway traffic management platform based on UAV technology[J]. *China ITS Journal*, 2020(9): 111-112.
- 丁黎峰, 李兴运. 基于无人机技术的江苏高速公路交通管控平台浅析[J]. *中国交通信息化*, 2020(9): 111-112.
- [11] ZHANG J Q, GUO X, LI W R, et al. Deep network model compression and acceleration design method for UAV scenarios[J]. *Software Guide*, 2023, 22(12): 56-62.
- 张佳奇, 郭宣, 李魏然, 等. 面向无人机场景的深度网络模型压缩与加速设计方法[J]. *软件导刊*, 2023, 22(12): 56-62.
- [12] XIANG Y, TAN R C, HE W, et al. Design and implementation of urban drainage pipeline hidden danger investigation platform based on microservice architecture[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2020(5): 95-98.
- 向祎, 谭仁春, 何伟, 等. 基于微服务架构的城市排水管网隐患排查与治理平台设计与实现[J]. *城市勘测*, 2020(5): 95-98.
- [13] GUO R Z, LIN H J, HE B, et al. GIS framework for smart cities[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(12): 1829-1835.
- 郭仁忠, 林浩嘉, 贺彪, 等. 面向智慧城市的gis框架[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(12): 1829-1835.
- [14] YU Z W, SUN Z, CHENG Y, et al. Survey on collaborative perception computing for intelligent UAV swarms[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2024, 45(20): 1-16.
- 於志文, 孙卓, 程岳, 等. 智能无人机集群协同感知计算研究综述[J]. *航空学报*, 2024, 45(20): 1-16.
- [15] SHEN L. Research on air-ground cooperative edge computing task offloading and resource allocation based on DQN-DDPG[J]. *Software Guide*, 2024, 23(4): 74-81.
- 沈乐. 基于DQN-DDPG的空地协作边缘计算任务卸载与资源分配研究[J]. *软件导刊*, 2024, 23(4): 74-81.
- [16] HE Y L. Research on multi-UAV cooperative operation planning algorithm based on swarm intelligence algorithm[D]. Ji'nan: Shandong Jiaotong University, 2025.
- 何宇来. 基于群体智能算法的多无人机协同运行规划算法研究[D]. 济南: 山东交通学院, 2025.
- [17] WANG N, MA L M, JIANG Y C, et al. UAV cooperative planning method based on multi-agent deep reinforcement learning[J]. *Computer Applications and Software*, 2024, 41(9): 83-89, 96.
- 王娜, 马利民, 姜云春, 等. 基于多Agent深度强化学习的无人机协作规划方法[J]. *计算机应用与软件*, 2024, 41(9): 83-89, 96.
- [18] Civilized Beibei. Our district uses AI drones to empower urban governance and create a new pattern of intelligent monitoring with the integration of air, space, and earth [EB/OL]. http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=Mzg5MDE4NTk5NA==&mid=2247541827&idx=3&sn=90eac2466d53ab6b9176d2e3f7c70ce5&chksm=cda634dab7be87fc02111afa9986174e2fb04dd6d1cb289fd079c80e2802ece78bfb1dc667d#rd.
- 文明北碚. 【同心共创文明城】我区启用AI无人机赋能城市治理 打造“空地一体”智慧监测新格局[EB/OL]. http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=Mzg5MDE4NTk5NA==&mid=2247541827&idx=3&sn=90eac2466d53ab6b9176d2e3f7c70ce5&chksm=cda634dab7be87fc02111afa9986174e2fb04dd6d1cb289fd079c80e2802ece78bfb1dc667d#rd.
- [19] Suzhou High-tech Zone Urban Management Bureau. New China Daily: urban management opens up the smart "sky eye" [EB/OL]. 2025-06-03. <https://cgj.suzhou.gov.cn/srsz/mtgz/202504/b1a2b4701af54b17958679bb7749a1b2.shtml>.
- 苏州高新区城市管理局. 【新华日报】城市管理打开智慧“天眼”[EB/OL]. 2025-06-03. <https://cgj.suzhou.gov.cn/srsz/mtgz/202504/b1a2b4701af54b17958679bb7749a1b2.shtml>.
- [20] MO Q. Control and interface technology for UAV data link systems[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- 莫琼. 无人机数据链系统控制与接口技术[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [21] FANG C. Cooperative data link technology for UAV swarms[J]. *Modern Navigation*, 2024, 15(1): 60-64.
- 方成. 集群式无人机协同数据链技术[J]. *现代导航*, 2024, 15(1): 60-64.
- [22] CHU X. Design and verification of key technologies for UAV data links[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- 褚轩. 无人机数据链关键技术设计与验证[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2022.
- [23] CLERIGUES D, WUBBEN J, CALAFATE C T, et al. Enabling resilient UAV swarms through multi-hop wireless communications[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2024(1): 39.
- [24] LIU C X, CHEN S H, YANG F. Intelligent UAV systems based on multi-modal large models: summary and prospects[J]. *Radio Engineering*, 2024, 54(12): 2923-2932.
- 刘畅行, 陈思衡, 杨峰. 基于多模态大模型的智能无人机系统: 总结与展望[J]. *无线电工程*, 2024, 54(12): 2923-2932.
- [25] ZHU Q S, SONG X F, HE Z W. PUF-based lightweight identity authentication scheme for UAV networks[J]. *Software Guide*, 2024, 23(6): 114-120.
- 朱庆森, 宋翔飞, 何智旺. 基于PUF的无人机网络轻量级身份认证方案[J]. *软件导刊*, 2024, 23(6): 114-120.
- [26] YANG Z J, ZHU W X, HE H Y, et al. Research on security of UAV swarm based on smart contract[J]. *Software Guide*, 2023, 22(8): 164-171.
- 杨忠举, 朱卫星, 何红悦, 等. 基于智能合约的无人机集群安全性研究[J]. *软件导刊*, 2023, 22(8): 164-171.
- [27] KUMAR A, BHATT D, SINGH Y, et al. Blockchain-empowered secure data communication for UAV[J]. *SN Computer Science*, 2024, 5(8): 1163.

(责任编辑: 刘嘉文)