引文格式:李清泉,姜三,王智均,等.无人机坞网新型测绘基础设施:概念、框架与实现[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(8):1537-1547.DOI:10.13203/j.whugis20260147

Citation:LI Qingquan,JIANG San,WANG Zhijun,et al.New Surveying and Mapping Infrastructure Based on UAV Dock Networks: Concept, Framework, and Implementation[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(8):1537-1547.DOI:10.13203/j.whugis20260147

无人机坞网新型测绘基础设施:概念、框架与实现

李清泉[1,2,3,4,5] 姜 三[1,4,5] 王智均[3] 于文率[2]

1 深圳大学建筑与城市规划学院,广东 深圳,518060
2 深圳大学土木与交通工程学院,广东 深圳518060
3 人工智能与数字经济广东省实验室(深圳),广东 深圳,518060
4 自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室,广东 深圳,518060
5 广东省城市空间信息工程重点实验室,广东 深圳,518060

摘 要:随着无人机技术普及与低空经济应用的快速崛起,首次提出了无人机坞网新型测绘基础设施概念,及其作为基础设施的核心特征:网络化组网能力、平台化服务能力、规模化支撑能力以及统一时空基准。构建了无人机坞网新型测绘基础设施的技术框架,涵盖硬件层、通信层、处理层与服务层。以此为框架标准,从多机协同数据获取、大规模场景三维重建、专题信息提取和综合服务平台等方面,提出了无人机坞网新型测绘基础设施的核心技术,并以城市治理更新、工程施工监测、灾害应急响应和环境保护监测等典型场景为例,论证无人机坞网新型测绘基础设施的业务化运行模式,为后续技术研发与工程实践提供理论指导。

关键词:无人机;摄影测量;低空经济;测绘基础设施

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-05-07

DOI:10.13203/j.whugis20260147 **文章编号**:1671-8860(2026)08-1537-11

New Surveying and Mapping Infrastructure Based on UAV Dock Networks: Concept, Framework, and Implementation

LI Qingquan[1,2,3,4,5] *JIANG San*[1,4,5] *WANG Zhijun*[3] *YU Wenshuai*[2]

1 School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China
2 College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China
3 Guangdong Laboratory of Artificial Intelligence and Digital Economy (Shenzhen), Shenzhen 518060, China
4 MNR Key Laboratory for Geo-Environmental Monitoring of Great Bay Area, Shenzhen 518060, China
5 Guangdong Key Laboratory of Urban Informatics, Shenzhen 518060, China

Abstract: **Objectives**: With the rapid development of low-altitude economy and the widespread application of unmanned aerial vehicle (UAV) technology, traditional manual-controlled single-UAV operation modes can no longer meet the requirements of large-scale, periodic, and high-efficiency surveying and mapping tasks. This paper, for the first time, proposes the concept of a new surveying and mapping infrastructure based on UAV dock networks (DN-SMI). It aims to define its core characteristics as an infrastructure, including networked networking capability, large-scale support capability, platform-based service capability, and unified spatiotemporal benchmark, and to establish a systematic technical framework and implementation scheme for DN-SMI. **Methods**: Based on the evolution of multi-platform observation systems (satellite, aerial, low-altitude UAV, and ground platforms), this paper first identifies the limitations of existing UAV mapping modes and the necessity of upgrading to a dock-network-based infrastructure. It then de-

基金项目:教育部基础学科和交叉学科突破计划(JYB2025XDXM111);国家自然科学基金(42371442);深圳市科技计划项目(JCYJ20250604181614019)。

第一作者:李清泉,博士,教授,中国工程院院士,研究方向为动态精密工程测量。liqq@szu.edu.cn

通信作者:姜三,副教授。jiangsan@szu.edu.cn

fines the core characteristics of DN-SMI: networked deployment of intelligent UAV docks enabling wide-coverage and rapid-response operations; large-scale support through cloud-edge-end collaboration for massive data processing; platform-based services supporting plug-and-play multi-sensors and on-demand data products; and unified spatiotemporal benchmark via integration with continuous operational reference system. A four-layer technical framework is constructed, covering the hardware layer (UAV platforms, standardized payload interfaces, and grid-deployed intelligent docks), communication layer (5G-Advanced/6G and Internet of things-based low-altitude ubiquitous connectivity), processing layer (offline structure from motion (SfM) and online simultaneous localization and mapping for three-dimensional (3D) reconstruction, plus intelligent image interpretation for thematic mapping), and service layer (crowdsourced task distribution, automated processing pipeline, and visualized product delivery). Key technologies are elaborated from four aspects: multi-UAV collaborative data acquisition (including optimized views photogrammetry for complex urban scenes), large-scale scene 3D reconstruction (efficient image matching, parallel SfM, distributed 3D Gaussian splatting, and real-time photogrammetry), thematic information extraction (accurate building polygonal mapping and parametric wireframe reconstruction), and an integrated service platform with crowdsourcing mechanism. Finally, typical application scenarios are demonstrated, including urban governance and renewal, engineering construction monitoring, disaster emergency response, and environmental protection monitoring. **Results:** The proposed DN-SMI concept and technical framework address the bottlenecks of traditional UAV mapping in large-scale, periodic, and high-timeliness tasks. The four-layer architecture and key technologies have been validated through practical deployments, demonstrating significant improvements in data acquisition efficiency, 3D reconstruction quality, and service delivery standardization. The crowdsourced service platform supports on-demand, traceable, and standardized geospatial product delivery, effectively lowering the threshold for high-precision mapping and providing reliable support for urban digital twins, low-altitude economy, and smart city management. **Conclusions:** The DN-SMI represents a fundamental shift of UAV surveying and mapping from a single data collection tool to a networked, intelligent, and service-oriented infrastructure. The proposed concept, core characteristics, four-layer technical framework, and key technologies provide systematic theoretical guidance for technological development and engineering practice. Future work should focus on enhancing robustness under complex environments, improving legality (airspace compliance, data security, privacy protection), and ensuring universality (cost-effective deployment and cross-regional interoperability), so as to promote DN-SMI as a reliable, lawful, and ubiquitous spatiotemporal information infrastructure for the digital economy and low-altitude economy.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); photogrammetry; low-altitude economy; surveying and mapping infrastructure

现代测绘技术体系正在经历从传统以地面、人工、静态为特征的测量模式向多平台、多传感器协同观测的深刻变革。以卫星、航空、低空及地面平台构成的天-空-地一体化立体观测体系,可实现对地球表面全天候、多尺度、高精度的动态监测[1]。其中,卫星平台凭借其全球覆盖与高频重访能力,在大范围宏观监测中占据主导地位[2];航空或低空平台以高精度、高机动作业能力,在大比例尺测图、工程测绘与监测中具有不可替代性[3];地面平台依托全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)接收机、移动测量系统以及无人船等技术,实现极高精度与极快响应的精细化数据采集。各平台在时间分辨率、空间分辨率及覆盖范围上形成优势互补,共同构建起现代测绘的基础感知网络。

在上述多平台测绘观测体系中,低空无人机近年来发展尤为迅猛。得益于无人驾驶航空器(unmanned aerial vehicle,UAV)技术的普及与低空经济应用的快速崛起,无人机测绘与巡检需求呈现爆发式增长。相较于传统航空平台,无人机具备机动灵活、低空飞行、时空分辨率高等显著优势,支持多机联网协同与全自主分区作业,能够实现全自动/贴近飞行、获取厘米至毫米级空间分辨率数据[4]。在交通状况监测、文物考古存档、建筑质量检测、电力走廊巡检等典型场景中,无人机已展现出不可替代的优势。无人机正从单一的数据采集工具逐步演变为支撑低空经济高质量发展的重要载体,其规

模化、高频次、高现势性的数据获取能力,为城市精细化管理、基础设施安全监测等领域注入了新动能[5]。

然而,当前无人机测绘与巡检主要依赖人工控制和单机作业模式,在面对大范围城市区域、复杂施工现场、环境恶劣山区、车流涌动高速公路等场景时,暴露出一系列突出瓶颈。一方面,人工控制模式下飞手现场操作安全风险大、成本高,尤其在电力设施周期巡检、高速公路快速监察、施工场景风险排查等任务中,人员依赖性强且作业效率受限于个体技能和现场条件;另一方面,单机作业导致远程调度效率低下,难以实现跨区域协同与多任务并发,无法满足大范围城市定期更新、大范围形变监测等对高时效性、大跨度范围、长周期性观测的迫切需求。现有作业模式的局限性已成为制约无人机测绘向规模化、业务化方向发展的关键障碍。为破解上述难题,将无人机与智能机坞(无人机巢)相结合,构建网络化、自动化、智能化的新型作业体系成为必然选择。智能机坞支持一次性部署、全天候值守、全自主运行,可实现无人机的自动起降、充换电、数据回传与远程控制。多机坞联合组网后,能够实现多机协同、实时调度与网络化协同作业,从而将无人机从单一的数据采集平台升级为具备常态化运营、网络化协同、标准化服务能力的无人机坞网新型测绘基础设施(new surveying and mapping infrastructure based on UAV dock networks,DN-SMI),如图 1 所示。在这一体系下,数据标准化、服务接口化、成果可追溯成为基本特征,用户可按需调用数据产品,实现从“人工单机”到“智能机坞网”的根本性跨越。

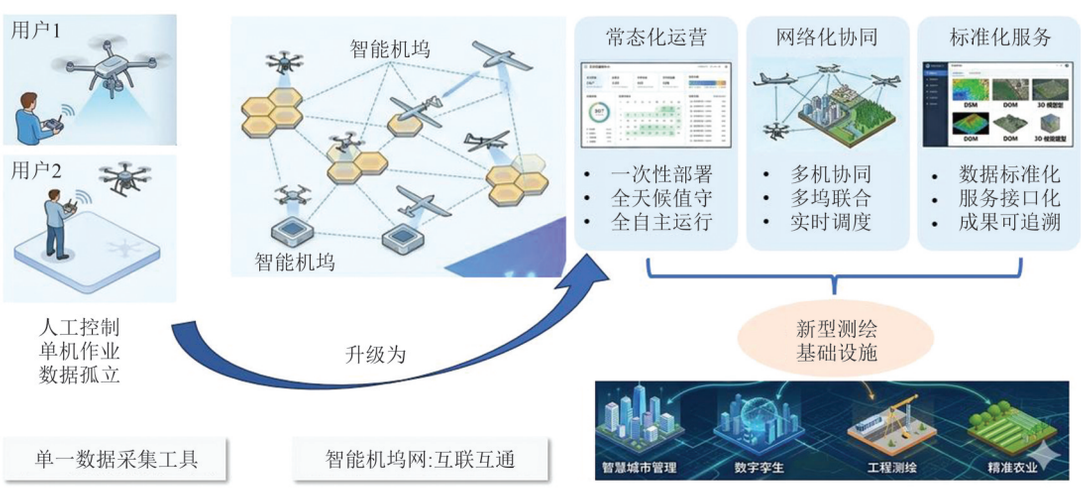


图 1　DN-SMI的演变过程

Fig. 1　Evolution Procedure of DN-SMI

综上所述,DN-SMI正在崛起为现代测绘基础设施体系的核心组成部分。立足于卫星、航空、低空及地面多平台协同观测的技术背景,本文系统阐述了DN-SMI的概念内涵与核心特征,构建涵盖硬件层、通信层、处理层与服务层的技术体系框架,并从多机协同数据获取、大规模场景三维重建、专题信息提取和综合服务平台建立等方面,提出了DN-SMI的实现方案。以城市治理更新、工程施工监测、灾害应急响应和环境保护监测等典型场景为例,论证了DN-SMI的业务化运行模式。

1　新型测绘基础设施概念

1.1　基本概念

基础设施原指为社会生产和居民生活提供公共服务的物质工程设施,是保证国家或地区社会经济活动正常运行的公共服务体系,其核心特征包括网络化布局、平台化服务、规模化支撑以及公共产品属性。传统测绘基础设施以国家大地控制网、高程控制网、重力基准网以及连续运行参考站系统(continuously operating reference system,CORS)为代表,其本质是通过布设覆盖全国或区域范围的基准站点,构建统一的空间定位基准框架,提供可追溯、可复用的时空基准服务。

随着经济社会发展对时空信息需求的质变,测绘基础设施的内涵正从基准服务向感知服务拓展。实景三维中国、自然资源调查监测等国家战略的实施,要求测绘不仅提供静态的基准框架,更要提供高频次、高现势性、高分辨率的空间感知数据。DN-SMI是指由智能机坞、无人机集群、通信网络、数据处理中心及服务系统构成,面向区域常态化监测与应急响应的综合性测绘服务支撑体系,如图 2 所示。该体系以无人机智能机坞为载体,以低空地理智能算法为核心,集成

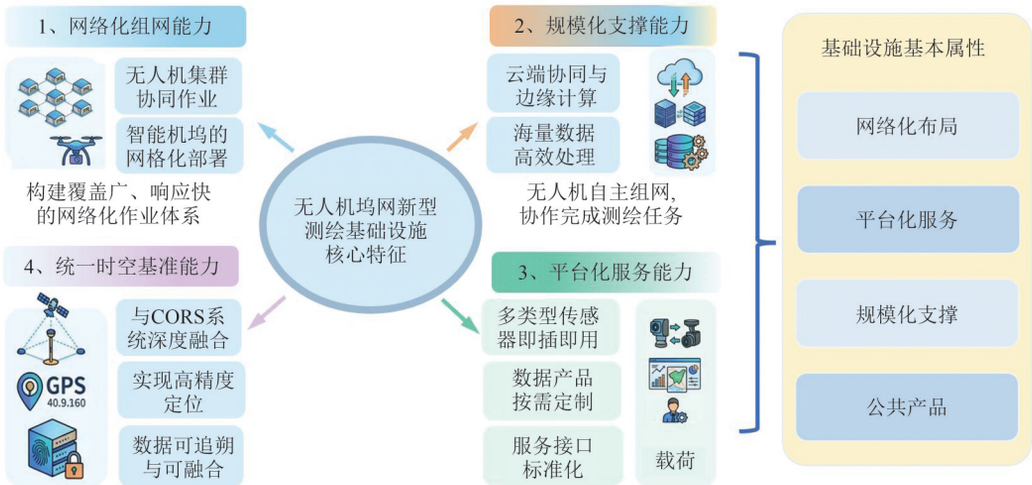


图2 DN-SMI的基本概念

Fig. 2 Basic Concept of DN-SMI

多型号无人机、多功能传感器和机载人工智能(artificial intelligence,AI)计算模块,构建空-地协同的组网模式,实现高精度、高频次、全自动和立体化监测,与卫星遥感网、地面传感网共同构成天-空-地一体化的智能感知体系。

1.2 核心特征

DN-SMI是通过智能机坞的网格化部署与无人机集群的协同作业,融合边缘计算、云端协同及标准化服务接口,构建起具备网络化组网、规模化支撑、平台化服务、统一时空基准的综合性测绘服务体系(图3)。

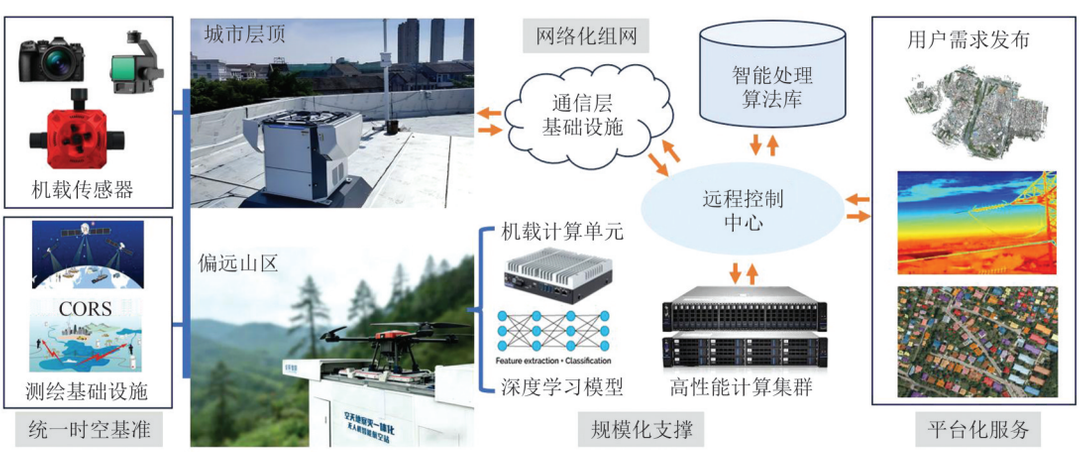


图3 DN-SMI的核心特征

Fig. 3 Core Characteristics of DN-SMI

核心特征包括以下4个方面:

1)网络化组网能力。网络化组网能力是DN-SMI的首要特征,核心在于智能机坞的网格化部署与无人机集群的协同作业。通过在城市重点区域、交通干线、灾害易发区等关键位置布设智能机坞,形成覆盖广、响应快的网络化作业体系。各机坞之间通过远程管控平台实现互联互通,支持多机坞联合调度与无人机集群的动态组网。当任务下达时,可自动指派最近机坞起飞无人机,多架无人机可依据任务需求分区协同作业,从而实现大范围区域的同步监测与周期性巡检。相较于传统单机人工操控模式,网络化组网能力将无人机测绘从点状作业升级为面状覆盖,显著提升了应急响应速度与大范围常态化观测能力。

2)规模化支撑能力。规模化支撑能力体现为云端协同与边缘计算的深度融合,以及海量时空数据的高效处理能力。DN-SMI产生大量的影像、点云、视频等数据,传统先采集后处理的串行模式难以满足高时效应用需求。为此,体系采用"云-边-端"协同架构:在机载端侧部署轻量化AI模型,实现实时目标检测与数据预处理;在边缘侧(机坞或区域节点)完成快速三维重建与智能分析;在云端进行多源数据融合、长期存储与深度挖掘。这种分层处理机制使得数据从采集到成果产出的时延大幅缩

短,支撑城市定期更新、工程形变监测等规模化、业务化应用场景,实现了从单机单任务到集群规模化生产的能力跃升。

3)平台化服务能力。平台化服务能力体现为多类型传感器即插即用、数据产品按需定制以及服务接口标准化。DN-SMI并非仅服务于单一测绘任务,而是面向智慧城市、应急管理、交通巡检、精准农业等多行业提供开放式时空信息服务。用户可根据业务需求,在统一管控平台上选择搭载可见光相机、激光雷达、多光谱和热红外相机等不同载荷的无人机,并定制输出数字正射影像、实景三维模型、变化检测报告、目标识别清单等标准化数据产品。平台提供统一的应用程序编程接口(application programming interface,API),支持第三方系统无缝调用,实现“一次采集、多方共享、按需服务”的集约化模式,显著降低了各行业获取高现势性空间数据的门槛。

4)统一时空基准。统一时空基准是DN-SMI区别于一般低空应用系统的本质特征,其核心在于获取的空间数据能够无缝融入国家统一的时空坐标框架。DN-SMI通过集成机载GNSS接收机与惯性测量单元(inertial measurement unit,IMU),实现厘米级的实时动态定位与姿态解算。时空基准的统一能力,使得无人机坞网获取的海量感知数据能够与CORS基准站网、卫星遥感、地面物联网等多源数据实现无缝集成,为数字孪生城市、实景三维中国等重大工程提供可度量、可复用的时空信息底座。

2　新型测绘基础设施技术框架

作为新型测绘基础设施,技术框架是理论概念走向工程实践的关键环节。本文从系统架构视角构建硬件层、通信层、处理层、服务层4层技术体系框架,如图4所示。其中,硬件层聚焦无人机自动机库网格化部署与集群协同机制;通信层探讨5G/6G低空物联网的覆盖与传输协议;处理层分析边缘计算与云端协同的智能处理架构;服务层论述按需数据产品分发与平台化服务模式。

2.1　硬件层

硬件层是DN-SMI的物理底座,其核心构成包括多类型无人机平台、标准化载荷接口与网格化部署的智能机坞,共同构成全自动、高可靠、可扩展的低空感知硬件基础。无人机平台是硬件层的执行单元,涵盖多旋翼垂直起降和固定翼无人机等多种机型,以适应不同任务场景对续航、载荷、机动性的差异化需求。在集群协同模式下,多架无人机可依

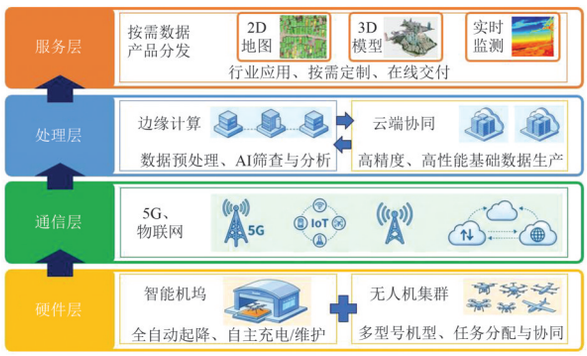


图4　DN-SMI的技术框架

Fig. 4　Technique Stack of DN-SMI

据任务规划灵活分工、动态组网,完成分区扫描、协同建图、目标追踪等复杂作业,实现从单机单任务到多机分布式协同的能力跃升。标准化载荷接口支持多种观测传感器的即插即用。用户可根据业务需求快速更换载荷,采集RGB影像、多光谱影像、高光谱影像、三维点云、热红外影像等多模态数据。这种模块化设计为平台化服务提供了灵活的技术支撑。

智能机坞是硬件层的节点中枢,通过网络化部署形成覆盖广、响应快的低空感知网络。每一座机坞集成了全自动起降平台、自主充换电系统、环境感知模块与远程通信单元,支持无人机全天候值守、一键起飞、自动回收与智能维护。多机坞之间通过管控平台互联互通,可实现跨区域协同调度与任务接力,显著提升大范围常态化监测效率。当前,国内智能机坞部署已逐步从试点示范迈向规模商用阶段。

2.2　通信层

通信层是DN-SMI的神经中枢,承担着无人机与智能机坞、地面控制中心、云端平台之间指令下发、状态回传、数据实时传输的关键任务。以5G-Advanced(5G-A)及未来6G移动通信网络为基础,融合物联网技术,构建覆盖低空空域的泛在通信能力,成为支撑无人机测绘与巡检业务化运行的协同脉络[6]。

在架构层面,数字低空网络采用空基-地面-卫星立体融合的组网模式,如图5所示。空基网络包括无人机集群之间的自组织通信链路,支持多机协同、动态组网与数据中继;地面网络由密集部署的5G-A基站、专用地面站及远程控制中心构成,保障低空飞行器的连续覆盖与高速接入;卫星链路则为偏远地区或无地面网络覆盖区域提供回传通道,实现全域无缝连接。全频谱资源的灵活调度与通感一体化设计,使得通信系统不仅能传输指令与数据,

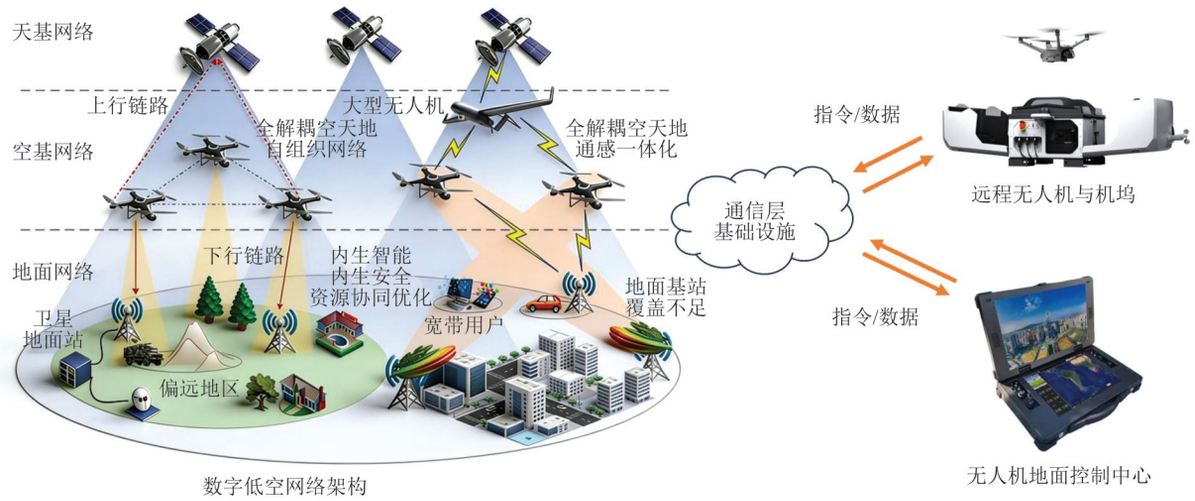


图5 通信层架构

Fig. 5 Architecture of the Communication Layer

还可感知低空飞行器的位置、速度与身份信息,为空域监管提供基础支撑。

2.3 处理层

处理层是DN-SMI的智能大脑,其核心目标是将采集的原始影像、点云等非结构化数据,通过智能化的处理流程,转化为可定位、可量测、可解译、可计算的高精度地理信息产品[7],如图6所示。该层融合离线与在线两种处理范式:离线处理依托运动恢复结构(structure from motion,SfM),通过影像匹配、空三平差、密集点云生成与网格模型构建,实现大范围场景的高精度三维重建,适用于周期性的城市建模与工程测绘;在线处理则基于同步定位与建图(simultaneous localization and mapping,SLAM)在无人机飞行的过程中实时解算位姿并增量式构建三维模型,满足灾害应急、动态监测等高时效性场景。处理层进一步集成了智能解译与制图能力,能从重建后的三维模型中自动提取建筑物二维轮廓与三维单体模型,实现从几何模型到语义专题图的转化。通过"离线高精度+在线高效率"的双轨机制,以及云端并行计算资源的弹性调度,处理层为无人机坞网的规模化、业务化运行提供了坚实的技术保障。

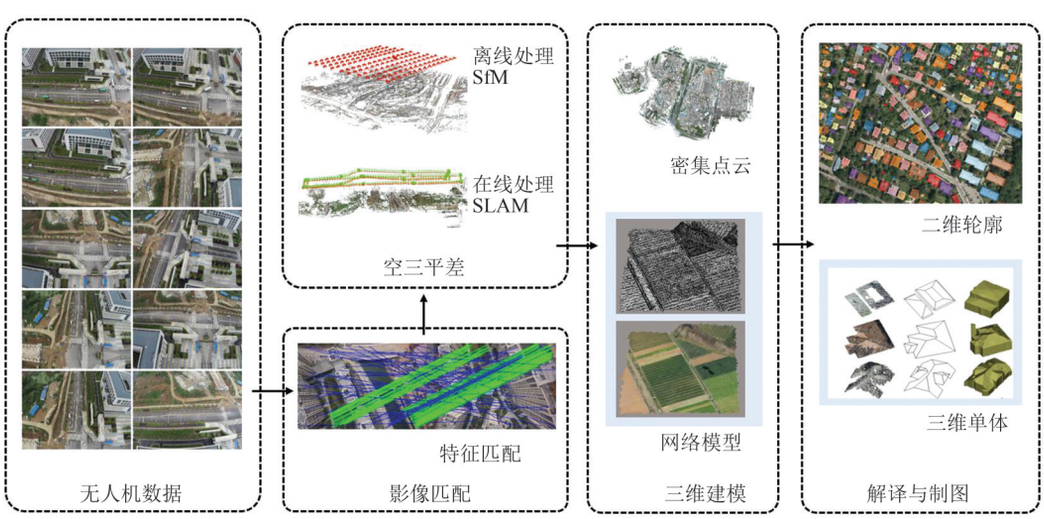


图6 处理层的核心步骤

Fig. 6 Core Workflow of the Processing Layer

2.4 服务层

服务层是DN-SMI价值输出的对接窗口,其设计理念旨在破解当前无人机摄影测量在实际应用中面临的设备集中度低、跨地域调度困难、作业成本高、数据获取时效性不足等现实困境。通过构建任务驱动-众包采集-集中处理-成果可视化的闭环服务流程,形成以任务(测绘需求)、机(无人机及机坞)、平台(云服务平台)为核心的协同作业机制,实现测绘数据产品的按需生产、高效交付与普惠共享,如图7所示。

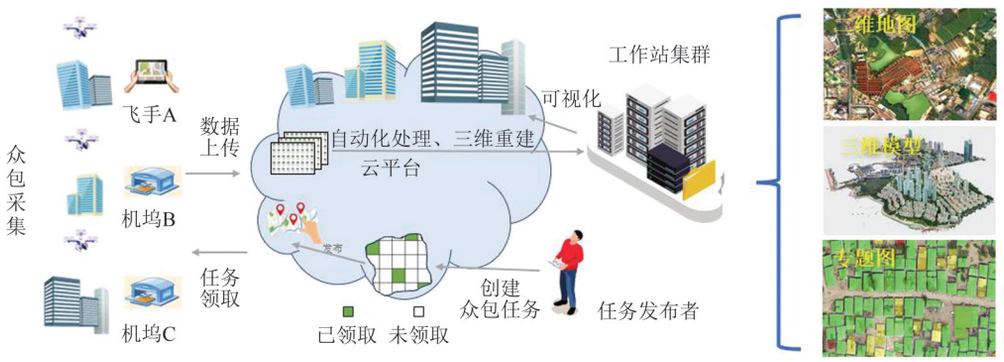


图 7　基于众包机制的服务层设计

Fig. 7　Service Layer via Crowdsource Mechanism

在架构层面,服务层可以采用众包模式设计,其核心价值在于实现测绘服务从“项目制”向“按需服务”的模式跃迁。用户无需自购设备、自组团队,只需在云平台发布需求,即可获得时效可控、质量可溯、成本可预期的地理信息产品。这种模式使无人机坞网真正成为低空经济时代泛在、智能、普惠的时空信息底座。

3　新型测绘基础设施关键技术

以上述技术框架为标准,本文进一步分析了DN-SMI的关键技术,涵盖多机协同数据获取、大规模场景三维重建、专题信息提取和综合服务平台等方面,形成了从数据获取、处理、解译到服务交付的技术闭环。

3.1　多机协同数据获取

复杂城市场景建筑密集、遮挡严重,传统航线规划易产生观测盲区,导致模型精度下降。无人机智能航线规划可基于先验模型优化视点,确保对建筑物立面、内凹等关键区域的全覆盖与高精度成像。同时,多机协同数据采集通过并行作业可大幅提升大范围场景的采集效率,缩短外业周期,实现数据完整性与时效性的统一。因此,新型测绘基础设施实施首先要解决精准航线规划与多机协同数据采集难题。

无人机航线规划正向基于场景先验信息的智能规划方向发展。通过引入概略模型或预采集数据,系统能够分析目标区域的三维几何特征,优化飞行路径与相机视点,确保对复杂结构的完整覆盖与高分辨率成像,从而提升三维重建的精度与可靠性。在多机协同数据采集方面,已有技术已从简单分区作业演进为具备任务动态分配、自主避障、协同建图能力的集群作业模式。多架无人机可依据任务需求实时组网,并行执行大范围或分布式目标的采集任务,并结合边缘计算与云端协同,实现数据的实时回传与融合处理[8-9]。其中,代表性的成果为优视摄影测量与多机协同数据获取技术[10-11]。结合场景先验模型,综合考虑无人机数据采集代价与摄影测量三维重建精度指标,全局优化无人机飞行路径与相机拍照视点方向,实现复杂场景下观测目标的几何感知与精准覆盖。

3.2　大规模场景三维重建

大规模场景三维重建是实现DN-SMI业务化应用的核心技术瓶颈。随着无人机续航能力的提升和多相机摄影测量设备的使用,无人机采集的影像数量巨大,动辄数万至数十万张。同时,结合场景几何感知的航线规划,无人机数据获取具有航线不规则、采集影像具有大倾角拍摄、高空间分辨率等特点,给SfM空三平差、3D高斯溅射(3D Gaussian splatting,3DGS)渲染的产品精度、处理效率及稳健性等方面带来了巨大挑战[12-13]。面对城市级实景三维的高精度、高时效需求,传统串行处理模式在数据量爆炸、场景复杂度提升的背景下已难以应对。为此,综合摄影测量与计算机视觉领域发展,大规模场景三维重建可从以下几个方面形成突破:

1)无人机倾斜影像具有航线不规则、大倾角拍摄、数量海量等特点。大规模场景无人机影像匹配的首要挑战在于如何从海量影像中快速筛选有效匹配对引导特征匹配,并实现高外点率下的粗差剔除[14]。现有技术引入全局描述子与高效图索引机制,比如VLAD(vector of locally aggregated descriptors)描述子与HNSW(hierarchical navigable small world)图索引,通过量化局部特征描述子为少量高维向量,实现候选匹配对的快速筛选。同时,联合局部和全局几何约束,显著提升高外点率下粗差剔除的稳健性与效率[15-16]。与传统穷举匹配模式相比,大幅压缩了匹配对的搜索空间,使大规模影

像匹配具备工程可行性。

2)并行化SfM空三解决了增量式SfM在处理海量影像时的误差累积与低效问题。现有方法采用“分而治之”策略:首先构建影像连接图,利用归一化割或边权值分析将大场景划分为若干重叠子块,保证子块内部的几何连接强度;其次,对各子场景独立进行增量式SfM重建,生成局部相机位姿与稀疏点云;最后,通过基于公共连接点的全局优化或无需固定锚点的合并策略,将子场景精确对齐到统一坐标系。并行框架有效消除了大规模空三对计算资源的极限依赖,实现了对数十万张影像场景的高效、高精度处理。对于并行化SfM,如何实现子场景稳健融合是“分块-合并”策略所需要解决的关键难点[17-18]。

3)传统多视图立体视觉在弱纹理、镜面反射区域易产生空洞,而3DGS通过显式高斯球进行可微渲染,实现高质量的新视角合成[19]。针对城市级大场景,3DGS分块渲染是近年兴起的高效三维表示方法:将大场景按空间网格或视点分布划分为子块,各子块独立训练高斯参数,再通过边界融合与全局优化消除接缝。关键技术包括自适应分块策略以平衡负载、重叠区域辅助点机制以对齐监督信号,以及正则化约束抑制块间视觉伪影。该方案在保证渲染质量的同时,大幅降低显存峰值占用,使消费级硬件也能处理城市场景[20-21]。

4)实时摄影测量技术核心是“边采集、边重建”的在线处理架构,依托SLAM技术与边缘端算力协同实现。在无人机端侧,轻量化SLAM算法实时估算相机位姿并构建稀疏点云;在边缘端或云端,基于滑窗或流式处理方法,增量式地完成密集匹配、表面重建与纹理映射。关键技术包括多传感器(相机、IMU、实时动态差分定位)紧耦合定位,以提升鲁棒性,以及增量式三维重建算法实现新帧与已有模型的快速融合[22]。实时摄影测量使无人机在飞行过程中即可输出初步的三维成果,可为灾害救援、突发事件提供即时空间决策依据[23]。

3.3 专题信息提取

实景三维模型仅提供几何与纹理信息,缺乏语义与结构化的专题信息。智能影像解译与专题制图致力于将语义不明确、模型不可算的二维/三维底图,转化为可解释、可计算的专题图信息。对于城市场景而言,需要重点突破建筑物轮廓矢量的精准提取与多边形简化,以及建筑物高精度单体化重建,实现从三维表面模型到单体化语义模型的转换。最终输出建筑物二维矢量轮廓、三维单体模型等专题制图成果。

1)二维影像提取建筑物轮廓矢量旨在将影像中建筑边缘、角点及其结构拓扑自动转换为矢量化的几何骨架[24]。与传统三维网模型相比,建筑物线框模型可摆脱海量像素冗余,获得轻量、结构化的建筑物表达,直接支撑三维重建、立面测绘与城市数字孪生。在测绘地理信息产品生产中,建筑物轮廓矢量支持从单视或多视影像中批量提取,实现大范围建筑信息的自动化采集,可为后续三维网格模型提供精确的轮廓先验,提升建模效率与保真度。同时,轮廓矢量数据量小、编辑灵活,便于快速进行布局分析与空间量测。

2)建筑物单体化重建可将场景中单个建筑物从整体三维数据中分离出来,进行语义识别和独立建模,生成具备清晰几何边界与结构特征的三维模型[25]。与常规的表面重建方法侧重于连续表面生成不同,单体化建模更加强调建筑物的空间独立性与结构规则性,不仅要精确提取其轮廓边界,还需识别屋顶结构和立面形态,实现几何精确的三维表达。

3.4 综合服务平台

综合服务平台为DN-SMI提供服务能力,包括任务管理模块、众包调度模块、自动处理管线、成果可视化引擎及开放API接口等核心组件。其中,任务管理模块支持用户在线创建测绘或巡检任务,设定任务区域、时效要求、成果类型等参数。众包调度模块通过云平台将任务包发布至数据采集者,支持任务领取、状态追踪与质量审核。数据采集完成后,原始影像、定位定姿系统数据等被上传至云平台,触发智能数据处理与三维建模管线,并输出正射影像、实景三维模型等标准化产品。如图8所示,综合服务平台采用B/S架构,以Web应用形式提供服务,涵盖了三大核心层,即用户层、核心功能层与支撑层。该平台以众包模式整合社会资源,以标准化流程保障数据质量,以自动化处理提升生产效率,为DN-SMI的规模化服务提供了成熟的软硬件支撑。

4 新型测绘基础设施应用领域

DN-SMI具备网络化组网、规模化支撑、平台化服务等能力,通过与现有的CORS等测绘基础设施融合,可广泛应用于地图测绘、城市规划、城市治理、交通监测、环境监测、灾害应急、保险理赔、生态保护、资源调查等行业和领域。

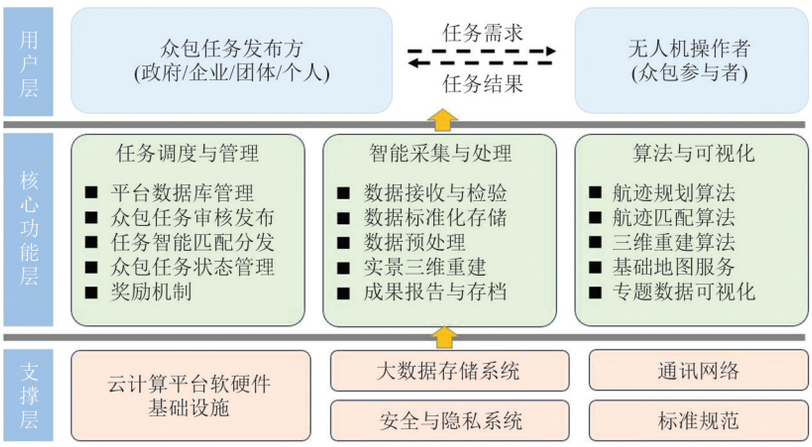


图 8　综合服务平台总体架构设计

Fig. 8　Structure Desing of the Integrated Service Platform

4.1　城市治理更新

DN-SMI 为城市建设与更新提供了高频率、高精度、全覆盖的低空感知能力,成为物理城市与数字城市同步演进的重要技术支撑。在城市实景三维层面,无人机坞网通过机巢部署与集群协同采集,可实现城市级实景三维模型的快速构建与动态更新。相比传统人工航测,该模式显著缩短数据获取周期,支持每季度乃至每月的高精度模型迭代,为数字孪生城市提供现势性强的时空基底。在城市管理与更新层面,无人机坞网赋能城市精细化管理。系统可按需执行违章建筑自动识别、市容环境卫生巡查等任务,结合 AI 变化检测算法,实现“发现-定位-处置”的全链条闭环,极大提升城市治理的智能化水平与响应效率。同时,无人机可为拆迁测算、改造方案比选提供高频次、可量测的实景数据支撑。面向低空经济应用,无人机坞网作为低空感知基础设施,与城市低空物流、空中交通管理、低空旅游等业态形成协同。其标准化数据服务接口为低空飞行器提供高精度的城市三维信息,支撑航线规划、障碍预警与安全监管,促进低空经济在城区规模化、安全化发展。

4.2　工程施工监测

DN-SMI 凭借网格化部署、自动化巡检与实时数据处理能力,可为工程建设的进度、安全与质量提供了高频率、高精度的数字保障。在形象进度管理方面,无人机坞网可按天对施工现场进行自动化航拍与三维建模,生成可量测的实景模型及正射影像。通过前后时相数据对比,系统自动计算土方量、识别施工区域变化、统计完成进度,并将结果可视化呈现于管理平台。在施工安全识别方面,无人机搭载可见光与热红外相机,结合边缘 AI 算法,可实时检测工人未佩戴安全帽、临边防护缺失、明火烟雾等安全隐患,并自动推送告警至安全员终端。同时,对深基坑、高边坡、脚手架等高风险区域进行定期巡检,通过三维形变分析预警滑坡、沉降风险,将被动响应转为主动预防。在工程质量检测方面,无人机坞网支持对混凝土养护温度、裂缝分布、平整度等进行非接触式检测。高分辨率影像与激光点云融合,可识别毫米级裂缝等表观缺陷;热红外成像可检测渗漏、空洞施工质量。

4.3　灾害应急响应

DN-SMI 在灾害应急响应中,将传统“人工调度、单机作业”模式升级为“网格化值守、集群响应”的智能体系,显著提升了灾情获取与研判的时效性与安全性。在复杂场景自主导航方面,机坞网格化部署保障了灾害发生后无人机可在数分钟内起飞,无需进行远程设备调度。面向灾区通信中断、GNSS 信号遮挡及建筑物倒塌等恶劣环境,无人机集成视觉 SLAM 与多源融合导航技术实现无 GNSS 条件下的自主避障与航迹规划,可深入坍塌废墟、峡谷陡坡等危险区域执行侦察任务。在数据采集与建图方面,多架无人机从不同机巢同步起飞,协同覆盖灾区全域,通过机载边缘计算实时回传影像与视频。云端自动化处理管线可快速完成正射影像拼接与三维模型重建,为应急指挥提供即时、可视化的灾场底图,支持灾害范围快速评估与救援力量精准部署。在泥石流、坍塌等灾害识别方面,基于深度学习的变化检测模型将无人机影像与灾前模型比对,自动识别滑坡体边界、坍塌建筑物、道路阻断及泥石流掩埋范围;结合热红外相机可探测生命体征,为搜救小队提供目标指引。无人机坞网具备全天候值守、快速成图与智能识别能力,极大缩短了灾害应急响应时间。

4.4 环境保护监测

DN-SMI为环境监测保护构建起全天候、网格化的低空感知网络,实现对森林、近海及海岸带生态系统的常态化、高精度巡查。在森林火情预警方面,无人机坞网部署于林区关键位置,支持每日多频次自动巡航。无人机搭载热红外与可见光双光谱相机,可实时探测地表高温异常点,结合机载AI识别模型,可在火势蔓延前精准定位火源,并将告警信息及坐标推送至防火指挥中心。在近海水质监测方面,无人机坞网可定期对沿海养殖区、入海河口及近岸海域进行多光谱航测。通过反演叶绿素、悬浮物、浊度等水质参数,生成高分辨率水质分布图,直观反映富营养化、赤潮、污水排放等异常区域。数据实时上传至环保云平台,结合历史时序分析,为污染溯源和治理评估提供高频次、可追溯的科学依据。在海岸带红树林监测方面,无人机坞网支持红树林分布范围、种群健康及病虫害的常态化普查。高精度正射影像与激光点云可精确提取红树林边界、冠层高度及密度,变化检测算法自动识别非法砍伐、围垦养殖或滩涂侵蚀等威胁。同时,可结合潮汐周期进行定期观测,评估红树林生态修复工程的成效,为海岸带蓝碳核算与生物多样性保护提供基础数据。综上所述,无人机坞网以自动化、高频次、多传感器融合的能力,实现了从陆地到近海的立体化环境感知,成为生态保护与灾害预警中不可或缺的低空基础设施。

5 结 语

本文首次系统提出了DN-SMI的科学概念,从基础设施理论视角界定其内涵与核心特征,突破了将无人机仅视为单一作业工具的传统认知。然后构建了涵盖硬件、通信、处理、服务4个层次的DN-SMI的技术框架。最后从多机协同数据获取、大规模场景三维重建、专题信息提取和综合服务平台建立等方面,给出了DN-SMI的实现方案。结合其在城市治理更新、工程施工监测、灾害应急响应和环境保护监测等领域的应用,为技术研发与工程实践提供了系统化的理论指引。

DN-SMI作为现代测绘体系的重要组成部分,其建设与发展是一项长期而系统的工程,需在合法性、普适性、鲁棒性3个方面实现进一步突破。在合法性方面,需解决空域审批效率低、数据安全隐患和隐私侵犯问题,应对接民航管理系统实现动态审批,建立全链路数据加密与脱敏机制。在普适性方面,需克服建设成本高、区域覆盖不均、标准不统一等挑战,可通过政府与社会资本多元投入、制定统一接口标准、开发低代码服务平台,实现普惠化时空信息服务。在鲁棒性方面,需应对恶劣天气、GNSS拒止及单点故障,采用多源融合导航、机巢间任务迁移及自适应起降平台等冗余设计。三者协同方能确保无人机坞网合规、普惠、可靠地运行。因此,未来需持续完善标准规范、创新运营机制、深化协同应用、加强技术攻关,推动无人机基础设施与CORS等现有基础设施深度融合,共同构建现代测绘基础设施体系,为数字中国建设提供坚实的时空信息底座。

参 考 文 献

[1] 李德仁,郭昊南. 时空智能助推新质生产力发展[J]. 科技导报,2025,43(24):27-34.
LI Deren, GUO Haonan. Spatiotemporal Intelligence Boosts the Development of New Quality Productive Forces[J]. *Science & Technology Review*, 2025, 43(24): 27-34.

[2] 王建荣,杨元喜,胡燕,等. 光学测绘卫星现状与发展趋势分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(3):333-338.
WANG Jianrong, YANG Yuanxi, HU Yan, et al. Analysis on Status Quo and Development Trend of Optical Surveying and Mapping Satellites[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(3): 333-338.

[3] 张力,刘玉轩,孙洋杰,等. 数字航空摄影三维重建理论与技术发展综述[J]. 测绘学报,2022,51(7):1437-1457.
ZHANG Li, LIU Yuxuan, SUN Yangjie, et al. A Review of Developments in the Theory and Technology of Three-Dimensional Reconstruction in Digital Aerial Photogrammetry[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1437-1457.

[4] 张继贤,刘飞,王坚. 轻小型无人机测绘遥感系统研究进展[J]. 遥感学报,2021,25(3):708-724.
ZHANG Jixian, LIU Fei, WANG Jian. Review of the Light-Weighted and Small UAV System for Aerial Photography and Remote Sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 25(3): 708-724.

[5] 刘纪平,王琢璐,徐胜华,等. 人工智能时代下的应急测绘[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2025,50(6):1029-1041.
LIU Jiping, WANG Zhuolu, XU Shenghua, et al. Emergency Surveying and Mapping in the Era of Artificial Intelligence[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(6): 1029-1041.

[6] 李峰，禹航，丁睿，等. 我国空间互联网星座系统发展战略研究[J]. 中国工程科学，2021，23(4)：137-144.
LI Feng，YU Hang，DING Rui，et al. Development Strategy of Space Internet Constellation System in China[J]. *Strategic Study of CAE*，2021，23(4)：137-144.

[7] JIANG S，JIANG W S，WANG L Z. Unmanned Aerial Vehicle-Based Photogrammetric 3D Mapping：A Survey of Techniques，Applications，and Challenges[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*，2022，10(2)：135-171.

[8] MABOUDI M，HOMAEI M，SONG S，et al. A Review on Viewpoints and Path Planning for UAV-Based 3-D Reconstruction[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*，2023，16：5026-5048.

[9] ZHANG H，YAO Y C，XIE K，et al. Continuous Aerial Path Planning for 3D Urban Scene Reconstruction[J]. *ACM Transactions on Graphics*，2021，40(6)：1-15.

[10] 李清泉，黄惠，姜三，等. 优视摄影测量方法及精度分析[J]. 测绘学报，2022，51(6)：996-1007.
LI Qingquan，HUANG Hui，JIANG San，et al. Optimized Views Photogrammetry and Its Precision Analysis[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*，2022，51(6)：996-1007.

[11] LI Q Q，HUANG H，YU W S，et al. Optimized Views Photogrammetry：Precision Analysis and a Large-Scale Case Study in Qingdao[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*，2023，16：1144-1159.

[12] 陈武，姜三，李清泉，等. 无人机影像增量式运动恢复结构研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2022，47(10)：1662-1674.
CHEN Wu，JIANG San，LI Qingquan，et al. Recent Research of Incremental Structure from Motion for Unmanned Aerial Vehicle Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2022，47(10)：1662-1674.

[13] JIANG S，JIANG C，JIANG W S. Efficient Structure from Motion for Large-Scale UAV Images：A Review and a Comparison of SfM Tools[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*，2020，167：230-251.

[14] JIANG S，MA Y C，LIU J H，et al. Efficient Match Pair Retrieval for Large-Scale UAV Images via Graph Indexed Global Descriptor[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*，2023，16：9874-9887.

[15] JIANG S，JIANG W S，GUO B X. Leveraging Vocabulary Tree for Simultaneous Match Pair Selection and Guided Feature Matching of UAV Images[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*，2022，187：273-293.

[16] JIANG S，JIANG W S，LI L L，et al. Reliable and Efficient UAV Image Matching via Geometric Constraints Structured by Delaunay Triangulation[J]. *Remote Sensing*，2020，12(20)：3390.

[17] JIANG S，MA Y C，JIANG W S，et al. Efficient Structure from Motion for UAV Images via Anchor-Free Parallel Merging[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*，2024，211：156-170.

[18] JIANG S，LI Q Q，JIANG W S，et al. Parallel Structure from Motion for UAV Images via Weighted Connected Dominating Set[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*，2022，60：5413013.

[19] KERBL B，KOPANAS G，LEIMKUEHLER T，et al. 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering[J]. *ACM Transactions on Graphics*，2023，42(4)：1-14.

[20] WU Y C，QI Z P，SHI Z W，et al. BlockGaussian：Efficient Large-Scale Scene Novel View Synthesis via Adaptive Block-Based Gaussian Splatting[PP/OL]. V2. arXiv(2025-04-15)[2025-10-14]. https://arxiv.org/abs/2504.09048.

[21] LIU Y，LUO C C，FAN L，et al. CityGaussian：Real-Time High-Quality Large-Scale Scene Rendering with Gaussians[PP/OL]. V3. arXiv(2024-07-17)[2026-02-22]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.01133.

[22] 刘飞. 多传感器融合的高精度无缝定位模型与方法研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2020.
LIU Fei. Research on High-Precision Seamless Positioning Model and Method Based on Multi-sensor Fusion[D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2020.

[23] LIU Y J，AKBAR A，YU T，et al. ARTEMIS：A Real-Time Efficient Ortho-Mapping and Thematic Identification System for UAV-Based Rapid Response[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*，2025，229：396-421.

[24] XU B W，XU J K，XUE N，et al. HiSup：Accurate Polygonal Mapping of Buildings in Satellite Imagery with Hierarchical Supervision[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*，2023，198：284-296.

[25] HUANG S F，WANG R S，GUO B，et al. PBWR：Parametric-Building-Wireframe Reconstruction from Aerial LiDAR Point Clouds[C]// IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)，Seattle，WA，USA，2024.