

# 无人机遥感系统的研究进展与应用前景

李德仁<sup>1,2</sup> 李明<sup>1,2</sup>

1 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

**摘要:**阐述了无人机遥感兴起的背景。从无人飞行平台、飞行姿态控制与导航、数据传输与存储、数据处理、传感器技术、空域使用政策等方面探讨了发展无人机遥感系统的基础、问题、研究进展和趋势。通过描述无人机遥感系统在大量相关行业领域的应用与实践,点出了发展无人机遥感系统的必要性与意义所在。最后,从科技、政策等方面给出了发展无人机遥感技术和产业的建议。

**关键词:**无人机;无人机遥感;无人机遥感系统

**中图分类号:**P231.5;P246.2 **文献标志码:**A

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)是一种机上无人驾驶的航空器,其具有动力装置和导航模块,在一定范围内靠无线电遥控设备或计算机预编程序自主控制飞行<sup>[1]</sup>。UAV研制始于20世纪初有人驾驶飞机诞生后的十几年,经过近一个世纪的发展,已经形成了一个大家族。目前,全世界有超过50个国家装备了300种以上的UAV,比较著名的有美国的“全球鹰”、“捕食者”,中国的“ASN”系列大型UAV,英国的“凤凰”中型UAV,以色列的“云雀”、“鸟眼”系列小型UAV等。UAV种类繁多,从动力、用途、控制方式、结构、航程和飞行器重量等方面可划分为多种类型。例如,按动力可分为太阳能、燃油、燃料电池和混合动力UAV,按用途可分为军用、民用和多用途UAV,按控制方式可分为无线电遥控、预编程自主控制、程控与遥控复合控制UAV,按结构可分为固定翼、旋翼、无人直升机和垂直起降UAV,按航程可分为近程、中程、远程和全球UAV,按飞行器重量可以分为微型、小型、中型和大型UAV<sup>[2]</sup>。无人机系统(unmanned aircraft/aerial system, UAS)是一套综合的技术支撑系统,它是对UAV概念的扩展,它由机体、机上载荷和地面设备等组成,实现其飞行、操控、数据处理和信息传导等功能<sup>[3]</sup>。

无人机遥感(UAV remote sensing, UA-

VRS)是利用先进的无人驾驶飞行器技术、遥感传感器技术、遥测遥控技术、通信技术、POS定位定姿技术、GPS差分定位技术和遥感应用技术,具有自动化、智能化、专业化快速获取国土、资源、环境、事件等空间遥感信息,并进行实时处理、建模和分析的先进新兴航空遥感技术解决方案。无人机遥感系统(UAV remote sensing system, UAVRSS)即是一种以UAV为平台,以各种成像与非成像传感器为主要载荷,飞行高度一般在几千米以内(军用可达10 km之上),能够获取遥感影像、视频等数据的无人航空遥感与摄影测量系统。目前,成熟完备的民用UAVRSS主要由飞行平台系统、轻小型多功能对地观测传感系统、遥感空基交互控制系统、地面数据快速处理系统、数据传输链路、综合保障系统与装置、地面后勤人员等组成(见图1)。

## 1 UAVRS背景与意义

现代社会中,遥感技术已成为人类获取地理环境及其变化信息的必备高科技手段<sup>[4-5]</sup>。随着地理信息科学与相关产业的发展,各国对遥感数据的需求急剧增长,然而,对于许多不发达和发展中国家而言,目前发展耗资巨大的航天遥感系统存在技术和资金上的困难。将UAV作为航空摄

收稿日期:2014-01-17

项目来源:国家973计划资助项目(2012CB719905);中央高校基本科研业务费资助项目(2012213020206)。

第一作者:李德仁,教授,博士生导师,中国科学院院士,中国工程院院士,国际欧亚科学院院士。主要从事以RS、GNSS、GIS为代表的空间信息科学与多媒体通信技术的科研、教学和产业化应用工作。E-mail: drli@whu.edu.cn

通讯作者:李明,博士生。E-mail: lisouming@whu.edu.cn

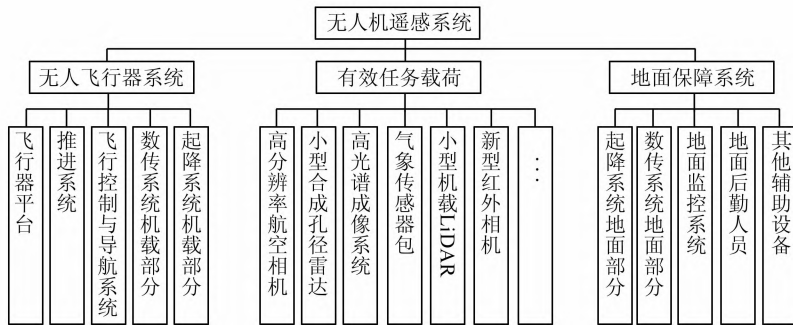


图1 无人机遥感系统的组成

Fig. 1 Components of UAVRSS

影和对地观测的遥感平台为应对这种困难提供了一种新的解决方案。同时,UAVRS技术有其他遥感技术不可替代的优点。它以固定翼 UAV、无人旋翼机和垂直起降 UAV 等作为遥感平台获取实时高分辨率遥感影像数据<sup>[6]</sup>,既能克服有人航空遥感受制于长航时、大机动、恶劣气象条件、危险环境等的影响,又能弥补卫星因天气和时间无法获取感兴趣区遥感信息的空缺,提供多角度、高分辨率影像,还能避免地面遥感工作范围小、视野窄、工作量大等因素。而且,随着计算机、通信技术的迅速发展以及各种重量轻、体积小、探测精度高的数字化新型传感器的不断面世,UAV 的性能不断提高,使 UAVRSS 具有结构简单、成本低、风险小、灵活机动、实时性强等独特优点,正逐步成为卫星遥感、有人机遥感和地面遥感的有效补充手段,给遥感应用注入了新鲜血液<sup>[7-15]</sup>。

一直以来,UAVRS 主要关键技术都掌握在军事遥感领域,应用于战场侦查、作战效果和战损评估、目标追踪与识别等。如 2014-01 进行第 9 次验证飞行的美国海军最新型无人情报、监视、侦察飞机平台“MQ-4C”遥感系统,可在 18 km 高空持续飞行 24 h,通过搭载的高性能传感器对视场下方进行 360° 监控,一次飞行即可侦察近 7 000 000 km<sup>2</sup> 海域,清晰识别出 0.1 m 以下的目标,并能实时进行数据收集和分发,自动识别舰艇,自动改正紊流引起的扰动,具备独特的除冰和防雷击功能,相比其他 UAVRSS 飞得更高、更远。目前,UAVRS 技术已经成为世界各国争相研究的热点,正得到研究者和生产者的青睐,特别是二十一世纪以来面对自然灾害、环境保护、恐怖主义、社会事件等问题,以及海岸监视、城市规划、资源勘查、气象观测、林业普查等众多活动,各国政府对 UAVRS 高新技术的需求与日俱增,各部门和组织亟需将这一新兴科技运用到自身部门和领域,应对不断出现的挑战和难题<sup>[16]</sup>。这使得越

来越多的关键技术已从研究开发发展到实际应用阶段,从军事应用领域扩展到商、民用市场,扩大了 UAVRS 技术的应用范围和用户群。当前,美国正在进行“全球鹰”和“捕食者”等军用 UAV 民用化改造和政策制定,欧洲正拟定实施 UAV 海事监视规划,中国已将“天翼”军用 UAV 应用到国家环保部卫星环境应用中心“节能减排与生态环境保护遥感技术支撑能力建设”等重大民生项目中。这些工作把 UAVRS 发展推向新的阶段,加速了世界范围内的 UAVRS 技术商、民用转化进程,将使其成为未来的主要航空遥感技术之一<sup>[17-18]</sup>。我国 UAV 航空遥感技术发展迅速,已成功研制无人飞行器、适用于航空遥感的飞行控制系统、通信系统,以及实现了轻小型传感器及其数据处理系统的集成<sup>[19]</sup>。

## 2 UAVRS 技术的发展与挑战

当今世界范围内,UAVRSS 虽然有了长足发展,取得了众多技术成果和实践经验,但是,面对日益繁杂的 UAVRS 任务、不断提高的 UAVRS 产品要求和潜在需求市场,正在运行的 UAVRSS 将在许多方面面临前所未有的挑战和发展机遇。

### 2.1 飞行平台

在机体材料方面,传统 UAV 的制造材料以航空用钢、铝等金属为主。为了减轻 UAV 自身重量、提高机体强度、延长飞行时间,各种重量轻、强度大的轻质复合材料得到了大量应用,玻璃纤维、碳纤维等成为 UAV 机体的主要替代材料。在发动机方面,传统发动机存在体积大、噪音高、寿命短、耗油量大、可靠性差等诸多问题,而各种体积小、噪音低、新能源推进系统相继面世,极大地增强了 UAV 有效载荷空间和能力,特别是针对未来微、小型和中、大型 UAV 对发动机的不同要求,高空长航时发动机和低速低空静音推进系

统的研制将是 UAV 在各领域发挥更大作用的关键。在空气动力学方面,传统 UAV 设计主要是针对中高空中侦察的中、大型 UAV。而在民用领域,UAV 航速、航高和尺寸都发生了变化,传统 UAV 设计不能满足此类飞行器对升阻特性和操纵特征的要求,沿用传统设计的微、小型 UAV 很难控制,必须对其进行总体和气动外形的优化。例如,改进普通翼和三角翼型设计,采用新型垂直翼片结构等。特别是在城市人口密集区和人类活动频繁区,宜用轻小型无人多旋翼机,实现安全起降和平稳飞行。

## 2.2 飞行控制与导航系统

飞行控制与导航系统是 UAV 飞行系统设计的关键,它通过飞行控制、管理与导航等功能实现 UAV 飞行姿态控制与导航,直接关系到 UAV 获取遥感信息的效果。目前,多数飞行控制系统主要利用经典的单回路频域或根轨迹等线性控制方法来设计飞行控制与导航系统,这种方式在 UAV 工业领域得到了成功应用。但是,随着 UAVRS 对 UAV 飞行性能要求的复杂化,常规的线性控制和单独的导航方法已很难满足 UAVRS 任务的实际需求。近年来,非线性动态控制、神经网络智能控制和组合导航等方法已有很多研究。这些新型飞行控制与导航方法能很好地从不同角度提高 UAV 飞行性能。如神经网络自适应控制方法能提供飞行器在整个飞行模式下连续的操纵品质,较大程度上提高了 UAV 飞行控制的稳定性。Guillaume J. J. Ducard 提出的基于 Kalman 滤波的完全非线性故障检测与隔离飞行控制系统,能在外部干扰和模型不确定时,保持控制与导航系统的鲁棒性,有效监测 UAV 的健康状态,并根据系统故障与机体损伤进行重构,实现容错性飞行控制与导航,为 UAVRS 作业提供更高的安全性<sup>[20]</sup>。因此,时效性、模块化和高效计算的非线性模型和多组合导航方法将是未来 UAV 飞行控制与导航系统的主要发展方向之一<sup>[21-24]</sup>。

## 2.3 数据传输存储技术

UAVRSS 数据传输包括两个方面:一是传送 UAV 和遥感设备的状态参数,可实现飞机姿态、高度、速度、航向、方位、距离及机上电源的测量和实时显示,并用于传输地面操纵人员的指令,引导 UAV 按地面人员旨意飞行。二是传输 UAV 获得的影像、视频等遥感信息,供地面人员处理应用。因此,数据传输存储技术直接影响到 UAV 遥感信息的获取质量和对 UAV 飞行状态的

掌控。

UAV 控制信息的传送可通过无线电遥测系统或特高频卫星链路数据传输系统实现,并在地面辅助设备中以数据和图形方式显示。

UAV 遥感信息的传输比 UAV 控制信息的传送要复杂得多。遥感数据的实时获取与下传与多模态传感器、飞行器平台的数据实时传输链路等都有密切关系,且 UAVRSS 产生的高分辨率遥感信息数据量大,易受环境干扰造成码率跳动,这对带宽受限的无线信道传输具有较大挑战。许多学者针对这些问题,考虑使用 C 波段数据链路系统和卫星数据传输系统,并进行了深入研究,相继推出了多种数据压缩方法试图解决这些问题。例如,根据 UAV 运动特点,求出序列图像之间的重迭区域,将运动序列图像转变成静态图像,然后以类 EBCOT 算法完成拼接图像的压缩。这种方法在压缩效率和运行时间上均优于 H·264 等视频压缩标准,可较好地满足 UAV 图像的传输需求。同时,通过比较研究 H·261 标准、MPEG-1 标准、JPEG 标准以及 MPEG-2 标准等压缩编码方法,发现 MPEG-2 不仅具有较高的分辨率和图像质量,且压缩比可以达到 30:1 而不会大幅降低视频图像质量<sup>[25-26]</sup>。因此,在 UAV 遥感信息实时下传过程中多采用高压缩比的有损图像压缩技术。目前,通过对 UAV 动态图像进行压缩编码后,图像/遥测复合数据传输速率为 1~2 Mb/s 左右(如美国为 1.544 Mb/s,以色列为 2.2 Mb/s),但其导致的误差限制了 UAV 航空遥感在一些高标准领域的应用。特别是在应对紧急事件,决策者要根据 UAV 传回来的实时影像决定应对方案和作出决策时,这制约了 UAVRS 的进一步发展。所以,为了 UAV 和地面站之间及时、不间断传递数据,先进的 UAVRSS 应选择合适的数据传输解压缩方法,采取多种高效可靠的数传链路系统,并考虑机上信息存储,将遥感信息在下传地面站的同时进行机上硬盘备份,以确保获得快速、安全、高质量的遥感数据<sup>[27]</sup>。

## 2.4 遥感数据处理

UAVRSS 多使用小型成像与非成像传感器作为机载遥感设备,与传统的航天和航空影像相比,存在采样周期短、分辨率高、像幅小、影像数量多、倾角过大和倾斜方向不规律等问题。因此,针对其特殊的飞行特性和图像处理要求,UAV 遥感图像处理系统与一般的图像处理系统相比也有所不同。如对一般影像处理,需要针对其遥感影像的特点以及相机定标参数、拍摄时的姿态数据



和有关几何模型,根据地面控制点进行几何和辐射校正;而对用于监测目的的遥感数据处理则有更高的实时性能要求,需要开发影像自动识别和快速拼接软件,实现影像质量、飞行质量的快速检查和数据的自动/交互式快速处理和自动变化检测等,以满足 UAVRSS 实时、快速工作的技术要求<sup>[10,28-30]</sup>。

当前,UAV 遥感数据的处理可分为地面准实时处理和机上实时处理。传统 UAV 遥感数据的处理主要以地面处理为主,它通过固定或移动地面数据接收站,建立具有海量数据存储、管理和分发能力的数据中心,对遥感数据库中的遥感影像数据进行加工与应用。例如,武汉大学郭丙轩无人机数据处理团队通过无人机获取的测区数据以整飞行区数据进行统一平差、加密、高密度测量,自动化生成 DEM 和正射影像。机上实时处理则是随着全球定位系统、惯性导航技术以及高重复频率激光测距技术等的应用,面对越来越多的特殊、紧急事件的快速反应需求,发挥 UAV 灵活、机动、快速的独有优势而被提出的。它将 GPS、北斗定位技术、惯性导航技术、激光测距技术进行集成得到机载扫描激光地形系统,并依此来为同机或同步获得的遥感图像提供定位信息,用于遥感数据的机上处理,完全摆脱了对地面的控制,节省了大量的人力、物力,大大提高了遥感作业效率,已成为国内外遥感界的研究热点和发展目标之一<sup>[31-32]</sup>。未来,随着 UAV 飞行速度、遥感图像的分辨率、数据采样频率和通讯带宽度的不断提高,海量遥感图像数据自动、高速、高质量的实时处理将成为 UAV 遥感应用的新瓶颈。因此,不断进行大量科学研究与实践,解决新的技术问题,设计开发高性能的 UAV 航空遥感图像智能处理系统,是 UAV 遥感监测应用系统推陈出新的前提。

## 2.5 遥感传感器技术

自 20 世纪 80 年代以来,随着科学技术整体上的迅速发展,为了更好地发挥 UAV 遥感监测潜力,全球各相关研究机构在航空遥感技术上开发了许多新项目,小型多光谱/超光谱成像技术、合成孔径雷达技术、超高频/甚高频探测技术、LiDAR 成像技术等相关传感器高新技术得到了快速发展和大量研究<sup>[33-35]</sup>。各种数字化、重量轻、体积小、探测精度高的新型传感器不断面世。例如,美国仙童·维斯顿公司研制的 MV201B 型固态 CCD 电视摄像机仅重 397 g,大一些的型号,其重量也不超过 1.4 kg。美国洛拉尔公司研制的前

视红外仪仅重 6.8 kg,它具有  $3^{\circ} \times 22.5^{\circ}$  和  $9^{\circ} \times 12^{\circ}$  两种视场,其硅化铂热像仪在  $3.4 \sim 5.5 \mu\text{m}$  波段工作,功耗为 65 W。美国休斯公司正在研制的 NLOS 前视红外仪仅有 4.5 kg,远远低于市场上前视红外仪均重 20 kg 的水平。德国禄来公司推出的 2 200 万像素专业航空相机,配备了自动保持水平和改正旋偏的相机云台,开发了相应的成图软件。美国洛拉尔公司研制的“姆萨”小型合成孔径雷达系统,装备在美军短程和中程无人侦察机上,是一种高分辨力成像雷达,工作在 X、L 波段,在 20 km 的距离上可以探测有效反射面积为  $1 \text{ m}^2$ 、速度为 1 m/s 的目标,整套雷达系统重 30.8 kg,输入功率为 160 W,配有高清晰度实时成像处理器,能对目标进行实时分析<sup>[25,34]</sup>。我国传感器技术也已实现了由早期的胶片相机向大面阵数字化相机发展的历程,各种智能、轻小型化的光电红外传感器、激光三维扫描仪和合成孔径雷达等的综合化、模块化使用,为 UAVRS 提供了“大展拳脚”的利器,使国产 UAVRSS 具有了全天候的实时遥感观测能力。目前,国内制造的数字航空测量相机具有 8 000 多万像素,能够同时拍摄彩色、红外、全色的高精度航片;科研人员设计的基于多面阵 CCD 传感器成像方式的小型多光谱成像仪,内置摄影控制软件,具备飞行控制系统通信、获取飞行参数、解算适宜曝光时间、修正曝光时间、实时存储数据等功能,并已在无人机 SE-1(海洋探索 1 号)进行了验证试验。当前,遥感传感器技术的发展除了各种传感器在硬件技术上的突破与成功应用外,还体现在传感器智能化和自主化的发展上,它依托计算机处理能力和机上存储器的发展,利用传感器自动搜索符合目标数据库中特性或发生变化的目标,进行匹配计算,找出现势遥感场景中的目标变化情况,将地面先进处理系统与传感器组合起来,初步实现了传感器自主性观测。

传感器是 UAVRS 得以推广应用的设备之一,只有适合 UAV 的遥感传感器才能获得高质量的遥感信息,UAV 航空遥感质量的提升与传感器技术的发展密切相关,开发设计成本合理、通用性强、体积小、重量轻的 UAV 观测传感器,是 UAVRS 发展的长期奋斗目标。

## 3 UAVRSS 运行空域政策与环境

UAVRSS 商、民用需求和使用频率不断增长,而我国在相关空域管理法规、人员培训、基础

设施建设及保障方面,与急剧膨胀的 UAV 遥感市场空域开放需求不相适应,严重制约了 UAVRS 事业的发展。这些矛盾主要包括:① 部分中大型、长航时 UAV 飞行高度与商、民用载人飞行高度相互交叉;② 大量中小型遥感 UAV 航空设备较差、飞机小,具有飞行高度低、速度慢、灵活性强和时效性高等特点,而在我国某些地区,雷达探测能力弱、通信易被干扰,尤其是边境与沿海等敏感地区,极易造成航空飞行器飞行状态监视失控。因此,与美国等发达国家相比,空域管理是我国当前中低空域全面开放的难点所在。这涉及到多方面因素,需要在法规、制度、体制上改革和创新,进行开放空域划设、利用、监控及保障设施配置,并确保国土防空的安全。

为 UAV 遥感飞行创造良好的空域环境可从以下几个方面考虑。首先,应进行通用航空飞行空域结构的合理化调整,在一定条件、范围、高度、时间内适当划设非管制空域,对 UAVRS 业务飞行组织和部门进行考核和评估,颁发具有一定时效和范围的 UAVRSS 飞行许可与适航证,提供中低空空域(3 km 以下)UAV 遥感作业“飞行自由”。其次,完善军、民空域保障设施建设与协调,为各类作业 UAVRSS 装载 GPS 导航仪、应答机以及通信联络系统等被监控配套设备,保证空域管制部门能准确、实时定位作业 UAVRSS,并为 UAVRSS 开发轻小型化的感知与防撞装置,提高安全飞行系数。再者,进一步完善、细化、明确、规范通用航空市场,并区分 UAV 商业飞行和科学实验、飞行训练、演示等任务,对不同任务进行分类管理与服务。最后,应进行有条件空域开放区的先行试点工作,探索方向、积累经验、逐步推广,并可尝试在国家空管委、军方和地方政府的领导下,酝酿专门机构负责协调和管理中、低空域的飞行申请、审批、认证事宜,发布与使用中、低空域飞行有关的航空信息资料,协助处理各类飞行事件和事故,制定从事中、低空域 UAV 遥感飞行相关人员的统一培训计划等<sup>[36]</sup>。

## 4 UAVRSS 应用与实践

### 4.1 气象监测与预报

无人气象飞机可装载遥感设备对温度、湿度、气压、风速、风向和电场等气象参数进行测量。目前,这方面的研究已取得大量成果,美国、澳大利亚、法国、中国等相继研制了 Perseus 和 Theseus、Aerosonde、FOX 和 Chacal、TF-1 等 UAV 气象

遥感系统。其中,Aerosonde 航空气象探测 UAV 由碳纤维制成,无机轮,机腹机壳覆以轻型玻璃纤维,重 15 kg,翼展 2.9 m,置于汽车车顶,当车速达 80 km/h 时起飞升空,降落时发动机停转以机腹落地,机上配备飞行控制与导航系统、数据传输系统,一台功率 1.25 kW 的增压发动机,最大航程 3 000 km,续航时间 30 h,工作高度范围 100~6 000 m,有效载荷 5 kg,可搭载湿度、温度、气压、红外、相机、化学探测、积冰探测、合成孔径雷达等传感器,需要 2~3 名操控人员。TF-1 气象探测 UAV 采用碳纤维复合材料一体化成型技术,重不足 22 kg,通过优化气动外形、动力和飞控系统,能实现连续 15 h、1 500 km 长航时自主飞行,并通过分立空速管、高精度压力传感器、GPS 和多坐标联合解算技术,解决了小型长航程低速 UAV 风参数测量的技术难题,并首次在国内 UAV 上采用“北斗”数据链路,解决了 UAV 气象探测系统数据传输受制于航高和航距的问题;且采用智能化监测与控制技术,解决了机载电子设备的电磁兼容问题,各项气象参数测量达到了国际同类产品的先进水平<sup>[24]</sup>。

### 4.2 国土资源环境调查与城市管理

UAVRSS 在国土资源环境调查与城市管理方面的应用主要是土地及资源调查与分类、环境监测、违章用地监测、城市交通管理等,已开展了大量研究实践工作。例如,国土事业部门和相关公司利用 UAV 装载小型高分辨率数码相机对一些县市开展土地资源调查,制作区域土地利用类型遥感图,提供农村集体土地所有权确权测量依据,大大改善了传统外业测量人为因素大、效率低、大范围工作成本高、工作时间长等弊端,并实地取样测量检验证实,由 UAV 遥感信息处理所得数据在外业像控和内业整合后,能满足工作精度要求,使 UAVRSS 逐步成为了国土资源管理的好帮手。林业与药业部门和公司利用 UAVRSS 进行中药资源、林业资源分布等的抽样调查、分类与资源总量估算等,且其结果具有统计学的可靠性<sup>[7,36-38]</sup>。城市规划管理与建设部门利用 UAVRSS 拍摄低空大比例尺图像和实时画面,通过地物分类进行异常提取,解译出违法乱建、废弃物乱堆乱放、道路拥堵和规划执行现状等信息,用于城市执法调查、处理与效果评估。环保部门使用 UAVRSS 携带大面阵数码相机、特殊化学物质探测仪、水色遥感器,对高危湖泊、河道、海岸和涉污工厂集中区进行追踪调查观测,完成环境监测与执法取证工作<sup>[25]</sup>。



### 4.3 海事信息化建设与动态管理

海事工作与很多区域、城市发展密切相关。随着国家提出建设长江黄金水道、北部湾、天津滨海新区、上海国际航运中心、海南生态旅游岛等战略,海事工作正面临日益上升的水上交通流量、愈加复杂的通航环境、严峻的航道水域污染监督与巡查形势,而海事工作因科技和人员的制约,已不能满足现势条件下的海事管理。同时,各种新增安全隐患也逐渐成为海事部门必须面对的问题,因此,海事部门必须通过科技创新来应对海事工作发展中的新趋势和新问题。近年来,各级海事部门逐步引入安装 GPS 和轻小型稳定平台,一般任务载重 10~20 kg,搭载 1~4 个相机和光电红外系统、小型合成孔径雷达的低空 UAVRSS,利用其机动灵活、多任务作业等优势完善现有监管体系,与已有海事海-空监测系统组合,形成全方位、全天候的海-空-天立体监测,实现了海事监管水域的多维可视化。这正成为海事部门深入贯彻科技创新精神,利用科技提升海事事业的重要手段。它能为近海常规巡航与目标搜索、应急现场监控与信息传递、船舶事故探查与污染监视等提供新的技术解决手段,发挥 UAV 遥感监测机动灵活、应急迅速,可长时间持续执行任务,监视范围广,安全风险小,投入成本低及费效比高等优势。例如,上海市为提高其对所属长江航道、国际性港口等地发生的应急水上交通事故、近海水域油污和水上交通流量等的动态监测和应急处置能力,快速获得大量有用证据和信息,通过 UAV 遥感监测系统搭载的各种光电、红外传感器开展了大量实验,进行了多次业务试飞和联合演习,取得了令人满意的运行效果,提高了事故处置响应速度和效率,为临港工业园、水域资源勘查开发和港口运输提供了可靠的保障和服务,凸显了 UAV 遥感监测在海事事件现场应急信息采集中的良好应用能力,有效解决了海事事件点散面广,获取证据难度大、时间长等问题。

### 4.4 灾害预报、监测与评估

在灾害预报、监测与评估中,灾害勘查与救援人员往往受制于灾区环境风险,导致一时无法安全抵近的问题,而遥感无疑是一种快速部署、零伤亡的灾情获取技术手段。UAV 灾害遥感监测作为遥感监测的一部分,很好地弥补了卫星遥感、航空遥感等对地观测精度、时效和频度上的不足,健全了对地观测技术在灾害中的应用。

近年来,我国发生的地震、泥石流、滑坡、洪涝、火灾等灾害中,UAVRSS 无处不在。如汶川

地震中,国家测绘地理信息局、国家减灾中心、武汉大学遥感团队等纷纷利用 UAVRSS 迅速抵达灾区进行航拍,通过对大量现势遥感影像的快速处理与对比分析,短时间内获得了灾区灾情的初步评价结果,为减灾救灾科学决策与指挥提供了更加客观、及时、全面、具体的灾情信息,大大提高了减灾效果,提升了灾害现场勘查能力,避免了因重灾区域短时难以抵达、交通受阻而无法掌握具体灾情的“信息盲区”现象<sup>[6,18,39-40]</sup>。国外对 UAVRSS 在灾害中的应用也给人们提供了许多参考。例如,美国运输部示范性地建立了基于 UAV 的遥感系统,利用所得的近实时遥感影像进行快速分析,将其应用于快速获取道路运输网络图像,对地震后出现问题的道路、桥梁进行评估,用以快速确定震后救灾线路。日本减灾组织使用 RPH1 和 YANMAHA UAV 携带高精度数码相机和雷达扫描仪对正在喷发的火山进行调查,抵达人们难以进入的地区快速获取现场实况,对灾情进行评估。日本环境省利用 YAMAHA UAV 加载核生化传感器进行核污染监测,对不同地理环境与埋藏深度的辐射源的辐射强度的反映能力进行量化研究,为核电站及其他核设施的管理提供基础数据。此外,UAVRSS 正为城市火灾提供新的监测途径。当火灾现场环境风险过大时,消防员无法靠近现场作战,指挥员无法了解实地情况,无法制定快速有效的救火方案。无人机便可利用其独有优点,在最短时间内,最大限度地接近灾情现场,提供最直接、最真实的第一手数据。对观测消防人员无法抵达的区域,监视灾情发展,为制定有效的应急方案提供依据<sup>[41]</sup>。

### 4.5 国家海洋权益保障

近年来,我国周边海域、海岛礁等海洋国土与资源纷争不断,国家海洋局的公务活动处于复杂多变的环境中。许多重点海域(如钓鱼岛、南海、黄海等)和项目(春晓油田等)亟需进行多频次、高精度的监视监测,但仅靠海监执法船和有人驾驶飞机、卫星难以实现人员安全、效费平衡和不间断监视。因此,国家海洋局实施了“国家海域动态监视监测系统”的研究与建设,这项工作以 UAVRSS 动态监测为主要内容。已完成试点试验工作的海洋局 UAVRSS 作为一种新型遥感监测手段,弥补了现有卫星遥感、有人航空遥感和现场监测技术手段的不足,具有机动性强、成本低、效率高等特点,其所获取的遥感影像分辨率高达 0.1 m,远高于卫星遥感影像,其续航能力最大可达 16 h 以上,将成为国家海域动态监视、监测管

理系统的重要信息源。该试点试验工作初步确定了 UAVRSS 的配置,研究建立了 UAV 海域监视、监测管理模式、管理制度和技术规范,组织了一支业务熟练的无人机遥感监视、监测技术团队,明确了对重点海域和重大项目的监测内容、监测频率、监测精度,实现了 UAV 监视、监测成果在海域管理与执法工作中的实际应用,形成了海域管理、海监执法与动态监测三者之间的信息共享和协同作业机制。国家海洋局计划到“十二五”末期在全国建立 11 个沿海省级 UAV 基地,每个基地至少配备一架 UAV,使 UAV 遥感监视、监测技术与现有海域监视、监测技术手段有机结合,将 UAV 遥感监测作为国家海洋局海域管理的常态化工作。同时,在深化近岸海域监视、监测的基础上,逐步扩大监测内容和范围,全面加强包括黄岩岛、钓鱼岛、苏岩礁以及西沙、中沙和南沙群岛附近海域在内的我国全部管辖海域的综合管控,进一步丰富和完善国家海域动态监视、监测管理系统,提高对重点海域和重点项目的动态监管水平,增强海域综合管控能力。

## 5 结论与展望

UAVRSS 因其独有优势,将在传统农林作业、工业测量和土地资源调查、智慧城市、数字考古、抢险救灾、三维实景、城市规划、新农村建设、物流配送、地理国情监测等应用中保持强势增长与快速拓展,其使用需求和频率将不断加大,这对于完善遥感动态观测体系和服务具有重要意义。而 UAVRSS 自身及其产业发展还存在诸多亟待考虑和解决的问题,需要从技术、政策等诸多方面予以突破和扶持。

在技术方面,通过建设高水平联合研究中心,从飞行平台气动布局与结构设计、材料研发与制造技术、推进系统与能源技术、导航与飞行控制技术、微机电技术、微型高效一体化智能传感器技术、发射与回收技术出发,加强 UAVRSS 的技术进步和生产力跃升,使 UAVRSS 朝小型化、自动化、自主化、智能化、模块化、集成化方向深度发展,助其飞得更远、更稳、更久,更加突出 UAVRS 独有优势,为用户提供更多、更快、更好的 UAV 遥感数据。同时,研究开发高性能的 UAV 航空遥感数据处理应用系统是 UAVRS 发挥其独有优势和广泛应用的基础,应针对 UAV 数据的特点,在影像校正、拼接、融合、分析等处理中研究新的算法和技术,实现 UAV 遥感数据的自动、智

能、高效处理与应用。

在政策方面,由于民用无人航空遥感主要在 3 km 中、低空空域内作业,应积极吸取国内外经验,在确保地面人员安全的情况下,进一步加快并明确中空无人遥感业务飞行的指导性法规、健全 UAV 飞行保障从业人员的职业能力评价体系和监管体制机制,并在《无人机航摄安全作业基本要求》等测绘行业标准的基础上,会同其他应用主管部门和机构,分类制定各行业的 UAVRSS 建设内容、技术标准和考核统计指标体系等,为无人机遥感市场的有序、健康发展提供基本产品质量保障和服务标准。另外,还应在航空航天、地理信息等新兴高科技产业政策中更加重视 UAVRSS 发展规划和布局,从顶层设计中助推 UAVRSS 协同创新。同时,还应在国家高新科技专项中,设立 UAVRSS 关键技术导向性研究项目,在给予国家专项资金的基础上,充分引进和利用市场融资渠道,设立基础研究、应用转化、产品试制与运作推广经费和奖励基金,吸引优秀人员进行深入研究、联合攻关和市场培育,并在高科技企业用地、进出口贸易、专利转让、人才引进、个人所得、企业经营中提供优惠的配套服务、信贷融资和税收政策。

## 参 考 文 献

- [1] Adam C, Vincent G, Everett A. Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use[J]. *Remote Sensing*, 2012(4): 1 671-1 692
- [2] Wu Hanping. Unmanned Aircraft System Introduction (Second Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003 (吴汉平. 无人机系统导论(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2003)
- [3] Jeremiah G. Unmanned Aerial Systems [R]. U S Congressional Research Service, USA, 2012
- [4] Li Deren, Gong Jianya, Shao Zhenfeng. From Digital Earth to Smart Earth[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35 (2): 127-132 (李德仁, 龚健雅, 邵振峰. 从数字地球到智慧地球[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(2): 127-132)
- [5] Li Deren. Development Prospect of Photogrammetry and Remote Sensing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33 (12): 1 211-1 215 (李德仁. 摄影测量与遥感学的发展展望[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33 (12): 1 211-1 215)

- [6] Zang Ke, Sun Yonghua, Li Jing, et al. Application of Miniature Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing System to Wenchuan Earthquake[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2010, 19(3):162-166(臧克, 孙永华, 李京, 等. 微型无人机遥感系统在汶川地震中的应用[J]. *自然灾害学报*, 2010, 19(3): 162-166)
- [7] Jose A J, Pablo J, Lola S, et al. Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(3): 722-738
- [8] Xiang Haitao, Tian Lei. Development of a Low-Cost Agricultural Remote Sensing System Based on An Autonomous Unmanned aerial Vehicle[J]. *Bio-systems Engineering*, 2011, 108: 174-190
- [9] Amir K, David S, Lei T. Low Power Greenhouse Gas Sensors for Unmanned Aerial Vehicles[J]. *Remote Sensing*, 2012(4): 1 355-1 368
- [10] Joshua K, Arko L. Sensor Correction of a 6-Band Multispectral Imaging Sensor for UAV Remote Sensing[J]. *Remote Sensing*, 2012(4): 1 462-1 493
- [11] Watts A, Perry J, Smith S, et al. Small Unmanned Aircraft Systems for Low-Altitude Aerial Surveys [J]. *J Wildl Manage*, 2010(7): 1 614-1 619
- [12] Ma Ruisheng, Sun Han, Lin Zongjian, et al. Geometric Correction Registration of Optic Remote Sensing Image from Miniature Unmanned Aerial Vehicle[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2005, 28(5):632-639(马瑞升, 孙涵, 林宗桂, 等. 微型无人机遥感影像的纠偏与定位[J]. *南京气象学院学报*, 2005, 28(5): 632-639)
- [13] Gui Dezhu. Study on Construction of 3d Building Based on Wide-Angle Combine Camera Image form Uav [D]. Xuzhou: China University of Mining Technology, 2010(桂德竹. 基于组合广角相机低空影像的城市建筑物三维模型构建研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010)
- [14] Cheng Yuanhang. Reaearch on the Technology of Mosaic of Aviation Remote Sensing Image from UAV [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008(程远航. 无人机航空遥感图像动态拼接技术的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008)
- [15] Li Ming, Li Deren, Fan Dengke. A Study on Automatic UAV Image Mosaic Method for Paroxysmal Disaster[C]. The 22nd ISPRS, Melbourne, Australia, 2012
- [16] Li Deren, Sui Haigang, Shan Jie. Discussion on Key Technologies of Geographic National Conditions Monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(5): 505-512(李德仁, 睢海刚, 单杰. 论地理国情监测的技术支撑[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2012, 37(5): 505-512)
- [17] van Blyenburgh P. UAVs: An Overview[J]. *Air & Space Europe*, 1999, 1(5): 43-47
- [18] Lei Tianjie, Li Changchun, He Xiaoying. Application of Aerial Remote Sensing of Aircraft to Disaster Emergency [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(1):178-183(雷添杰, 李长春, 何孝莹. 无人机航空遥感系统在灾害应急救援中的应用[J]. *自然灾害学报*, 2011, 20(1): 178-183)
- [19] Liu Yangjun. Control Circuit Design on Digital Aerial Camera Shooting of Unmanned Aerial Vehicles [D]. Beijing, Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008(刘杨俊. 无人机数字航摄影机控制电路设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008)
- [20] Ducrad G J J. Fault-Tolerant Flight Control and Guidance Systems-Practical Methods for Small Unmanned Aerial Vehicles [M]. London: Springer, 2009
- [21] Liu Bo, He Qinghua, Zou Xiangfu. Elementary Discussion of Flight Control Technology for an Unmanned Air Vehicle[J]. *Flight Dynamics*, 2007, 25(2):5-8(刘波, 何清华, 邹湘伏. 无人机飞行控制技术初探[J]. *飞行力学*, 2007, 25(2): 5-8)
- [22] Yew C P, Gary B. Development and Application of an Integrated Framework for Small UAV Flight Control Development [J]. *Mechatronic*, 2010, 21(5): 789-802
- [23] An S, Park B, Suk J. Intelligent Attitude Control of an Unmanned Helicopter[C]. ICCAS KIN-TEX, Korea, 2005
- [24] Shen Huairong, Shao Qiongling, Wang Shengjun, et al. Unmanned Aerial Vehicle for Meteorological Observation Technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010(沈怀荣, 邵琼玲, 王盛军, 等. 无人机气象探测技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010)
- [25] Jin Wei, Ge Hongli, Du Huaqiang, et al. A Review on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing and Its Application[J]. *Remote Sensing Information*, 2009(1):88-92(金伟, 葛宏立, 杜华强, 等. 无人机遥感发展与应用概况[J]. *遥感信息*, 2009(1): 88-92)
- [26] Tian Jinwen, Xie Qingpeng, Tan Yihua, et al. Methods for Compressing Sequence Image of Unmanned Aerial Vehicle[J]. *J Huazhong Univ fo Sci & Tech (Nature Science Edition)*, 2005, 33(12):76-78(田金文, 谢清鹏, 谭毅华, 等. 无人机序列图像压缩方法研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(12): 76-78)



- [27] Fontana A A, Knight J, Richley E J. Ultra Wide Band Technology for Aircraft Wireless Inter-communications Systems (AWICS) Design[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2004, 19(7): 14-18
- [28] Li Ming, Liu Huan, Zhu Xinyan. Approach to Fast Mosaic UAV Image for Disaster Emergency[J]. *Journal of Catastrophology*, 2012, 27(3): 139-144 (李明, 刘欢, 朱欣焰. 一种面向灾害应急的 UAV 影像快速拼接方法[J]. *灾害学*, 2012, 27(3): 139-144)
- [29] Sui H G, Zhou Q M, Gong J Y, et al. Processing of Multitemporal Data and Change Detection[C]. 2008 ISPRS Congress, Beijing, China, 2008
- [30] Li Deren. Change Detection from Remote Sensing Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(S1): 7-12 (李德仁. 利用遥感影像进行变化检测[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2003, 28(S1): 7-12)
- [31] Perry J, Mohamed A, El-Rahman A, et al. Precision Directly Geo-referenced Unmanned Aerial Remote Sensing System Performance Evaluation[C]. The Institute of Navigation National Technical Meeting, San Diego, CA, USA, 2008
- [32] Wilkinson B, Dewitt B, Watts A, et al. A New Approach for Passpoint Generation from Aerial Video Imagery[J]. *Remote Sensing*, 2009(75): 1 415-1 424
- [33] Lin Yi, Hyypää J, Jaakkola A. Mini-UAV-Borne LiDAR for Fine-Scale Mapping[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(3): 426-430
- [34] Kim J H, Lee D W, Cho K, et al. Development of an Electro-Optical System for Small UAV[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2010, 14: 505-511
- [35] Zhang Lei, Qiao Zhijun, Xing Mengdao, et al. A Robust Motion Compensation Approach for UAV SAR Imagery[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(8): 3 202-3 218
- [36] Saurabh A. Domestic Use of Unmanned Aircraft Systems: An Evaluation of Policy Constraints and the Role of Industry Consensus Standards [M]. USA: American Society for Testing and Materials, 2007
- [37] Anttoni J, Juha H, Antero K, et al. A Low-Cost Multi-sensorial Mobile Mapping System and Its Feasibility for Tree Measurements [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010(65): 514-522
- [38] Li Deren, Wang Changwei, Hu Yueming, et al. General Review on Remote Sensing-Based Biomass Estimation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(6): 631-635 (李德仁, 王长委, 胡月明, 等. 遥感技术估算森林生物量的研究进展[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2012, 37(6): 631-635)
- [39] Li Yun, Xu Wei, Wu Wei. Application Research on Aviation Remote Sensing UAV for Disaster Monitoring [J]. *Journal of Catastrophology*, 2011, 26(1): 138-142 (李云, 徐伟, 吴玮. 灾害监测无人机技术应用与研究[J]. *灾害学*, 2011, 26(1): 138-142)
- [40] Li Deren, Chen Xiaoling, Cai Xiaobin. Spatial Information Techniques in Rapid Response to Wenchuan Earthquake[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(6): 841-851 (李德仁, 陈晓玲, 蔡晓斌. 空间信息技术用于汶川地震救灾[J]. *遥感学报*, 2008, 12(6): 841-851)
- [41] Maza I, Caballero F, Capitan J, et al. Experimental Results in Multi-UAV Coordination for Disaster Management and Civil Security Applications [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 2011, 61(1-4): 563-585

## Research Advance and Application Prospect of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing System

LI Deren<sup>1,2</sup> LI Ming<sup>1,2</sup>

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** First, we expound the background of rise of UAVRSS in this paper. Then, we discuss the foundation, problem, research progress and trends for development of UAVRSS from unmanned aerial platform, flight control and navigation, data transmission and storage, data processing, sensor

(下转第 540 页)

ta of up to meter resolution became available. However, severe layover problems occur especially in complicated scenarios like dense urban areas, which make high-resolution data interpretation more difficult. SAR tomography(TomoSAR) aims at retrieving distribution of scatterers in the elevation direction and retrieving the corresponding reflectivity inside one resolution cell. In this way, TomoSAR can achieve real and unambiguous 3D reconstruction. First the basic principles of SAR tomography are illustrated. Then, a Butterworth filter based singular value decomposition method is proposed for TomoSAR processing. Third, experimental results about Berlin Debis Tower are analyzed in detail by comparing them with real building heights, the estimation precision reaches the meter level.

**Key words:** high-resolution; SAR tomography; singular value decomposition; Butterworth filter; model selection

**First author:** WEI Lianhuan, PhD candidate, specializes in radar remote sensing. E-mail: lianhuan@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41174120, 61331016; Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, No. 20110141110057; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 201161902020006.

.....  
(上接第 513 页)

technology, airspace usage policy, and so on. Third, we set forth the necessity and significance of development of UAVRSS through UAVRSS applications and practices in many related industry domain. At last, we make recommendations on development of UAVRSS from science and technology policy, industry policy, financial policy and so on, respectively.

**Key words:** unmanned aerial vehicle(UAV); UAV remote sensing; UAV remote sensing system

**First author:** LI Deren, professor, PhD supervisor, Academician of the Chinese Academy of Sciences, Academician of the Chinese Academy of Engineering, Academician of Euro-Asia International Academy of Sciences. He is concentrated on the research, education and industrial application in spatial information science, communication and technology represented by RS, GNSS and GIS. E-mail: drli@whu.edu.cn

**Corresponding author:** LI Ming, PhD candidate. E-mail: lisouming@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National 973 Program of China, No. 2012CB719905; the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Wuhan University, No. 2012213020206.