

引文格式:张永军,张祖勋,龚健雅.天空地多源遥感数据的广义摄影测量学[J].测绘学报,2021,50(1):1-11. DOI:10.11947/j. AGCS. 2021.20200245.  
ZHANG Yongjun,ZHANG Zuxun,GONG Jianya.Generalized photogrammetry of spaceborne, airborne and terrestrial multi-source remote sensing datasets[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50 (1): 1-11. DOI: 10. 11947/j. AGCS. 2021.20200245.

## 天空地多源遥感数据的广义摄影测量学

张永军,张祖勋,龚健雅

武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉 430079

## Generalized photogrammetry of spaceborne, airborne and terrestrial multi-source remote sensing datasets

ZHANG Yongjun,ZHANG Zuxun,GONG Jianya

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

**Abstract:** Since the 21st century, with the rapid development of cloud computing, big data, internet of things, machine learning and other information technology fields, human beings have entered a new era of artificial intelligence. The subject of photogrammetry has also followed the tide of the new round of scientific and technological revolution and developed rapidly into the brand-new generalized photogrammetry and entered the era of integrated intelligent photogrammetry. Its carrier platform, instruments and data processing theories as well as application fields have also changed significantly. The multi-sensor and multi-level integrated stereo observation technologies from spaceborne, airborne and terrestrial platforms have been greatly developed. In this paper, the novel concept of generalized photogrammetry is first put forward, and its subject connotation, development characteristics and some key technologies and applications are discussed in details. Under the brand-new generalized photogrammetry framework, data acquisition presents the characteristics of multi-angle imaging, multi-modal collaboration, multi-time integration, multi-scale linkage, while data processing presents the trends of multi-feature coupling, multi-control constraints, multi architecture processing, and multi-disciplinary intersection. The all-round development and intelligent service of the general photogrammetry still need to make greater breakthroughs in the aspects of spaceborne, airborne and terrestrial multi perspective or multi-modal image processing, intelligent information extraction and monitoring, combined 3D modeling with point cloud and image, autonomous control of unmanned system, visual inspection of intelligent manufacturing system, etc. Finally, new theories and technologies from real-time or quasi real-time intelligent geometric processing of multi-source remote sensing datasets to information extraction and intelligent service need to be established, which will make a well foundation to meet the new era of intelligent surveying and mapping.

**Key words:** generalized photogrammetry; integrated spaceborne, airborne and terrestrial observation; multi-sensor integration; multi-source remote sensing data; intelligent photogrammetry

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 42030102; 41871368); The Consulting Research Project of Chinese Academy of Engineering (No. 2019-ZD-16-04); The Fund for Innovative Research Groups of the Hubei Natural Science Foundation (No. 2020CFA003)

**摘 要:**21 世纪以来,随着云计算、大数据、物联网、机器学习等信息技术领域的飞速发展,人类已进入人工智能新时代。摄影测量学科也顺应新一轮科技革命的浪潮,快速发展为全新的广义摄影测量学,其载体平台、仪器设备、数据处理理论技术及应用领域都已发生显著变化,天空地一体化的多传感器多层

次综合立体观测技术得到极大发展,全面进入综合智能摄影测量时代。本文提出广义摄影测量学的科学概念,并详细论述其学科内涵、发展特点、研究方向与应用领域。在全新的广义摄影测量框架下,数据获取呈现多视角成像、多模态协同、多时相融合、多尺度联动等特点,数据处理则呈现多特征耦合、多控制约束、多架构处理、多学科交叉等趋势。天空地一体化广义摄影测量学的全面发展和智能服务,尚需在天空地多视角/多模态影像处理、智能信息提取与监测、点云与影像联合建模、无人系统自主导航、智能制造系统视觉检测等方面取得更大突破,形成从天空地多源遥感数据实时/准实时智能几何处理到信息提取服务的完整理论和技术体系,迎接智能化测绘新时代的到来。

**关键词:**广义摄影测量学;天空地一体化综合观测;多传感器集成;多源遥感数据;智能摄影测量

**中图分类号:**P23

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-1595(2021)01-0001-11

**基金项目:**国家自然科学基金(42030102; 41871368);中国工程院咨询研究项目(2019-ZD-16-04);湖北省自然科学基金创新群体项目(2020CFA003)

## 1 广义摄影测量学的发展背景

摄影测量学是通过影像研究信息的获取、处理、提取和成果表达的一门信息科学,通常利用摄影或遥感的手段获取被测物体的影像,研究和确定被测物体的形状、大小、位置、性质和相互关系,起始于19世纪中叶摄影机的发明和立体视觉的发现<sup>[1]</sup>。

传统的摄影测量学科,按照影像获取平台载体类别,可分为航天(卫星)摄影测量、航空摄影测量、近景摄影测量等。近20年来,随着相关理论的进步及应用领域的泛化,其中的界限已不再像过去一样明显,例如航天摄影测量的地面分辨率已达到分米级,完全满足1:5000比例尺成图的需求<sup>[2]</sup>,而这是传统航空摄影测量的服务范畴;随着无人飞行器技术的快速发展和消费级数码相机的进步,脱胎于航空摄影测量的低空摄影测量蓬勃发展,分辨率跃升到厘米级甚至毫米级<sup>[3-4]</sup>;而近景摄影测量则由于传感器和平台的进步以及应用范围的扩大,拓展为地面摄影测量、贴近摄影测量、工程摄影测量、工业摄影测量、医学摄影测量等等<sup>[5-7]</sup>。

在摄影测量数据获取仪器方面,则由传统的光学摄影机发展为多镜头倾斜相机、全景相机、视频相机、线阵推扫式相机、多光谱和高光谱相机、激光雷达、微波雷达等多模态传感器,并在定位定姿系统的辅助下,采用多种传感器实现多尺度多角度综合遥感数据获取<sup>[8-13]</sup>。针对不同的应用需求,这些观测设备能够源源不断地提供不同空间分辨率、时间分辨率和波谱分辨率的遥感图像。可以说,对兴趣区域或目标的天空地一体化的多传感器多层次综合立体观测技术已得到极大

发展。

在数据处理理论和方法方面,由经典的点摄影测量(共线方程)和线摄影测量(共面方程)模型,发展为点线混合摄影测量<sup>[14]</sup>和广义点摄影测量<sup>[15-16]</sup>,为采用多种同名特征和摄影测量网格技术(DPGrid)进行航空航天遥感影像的快速空中三角测量处理奠定了基础<sup>[17-18]</sup>。随着大数据时代的到来,多源地理空间信息的不断累积尤其是公众地理信息的开放获取,云控制摄影测量的概念应运而生<sup>[19]</sup>,以带有地理空间信息的数据作为几何控制替代传统的外业控制点,通过自动匹配(或配准)获取大量密集控制信息,实现影像参数全自动解算,进一步加速了摄影测量数据处理的全自动化和智能化步伐<sup>[20-22]</sup>。

近年来,随着云计算、大数据、物联网、人工智能等信息技术领域的飞速发展,人类已进入人工智能新时代,美国已于2018年成立人工智能专门委员会。21世纪以来,数字摄影测量自身的理论和技术已取得长足进步,并正在积极拥抱大数据和人工智能浪潮的到来<sup>[23]</sup>。摄影测量的发展阶段也从模拟摄影测量、解析摄影测量和数字摄影测量<sup>[24,1]</sup>,发展到智能摄影测量的新阶段。例如基于人工智能机制的地形地物识别与信息提取、语义专题图制作、变化信息自动监测等应用是数字摄影测量时代多年来可望而不可即的目标,这些成功范例预示着一个全新的时代——智能摄影测量时代的到来<sup>[25]</sup>。摄影测量应用领域也由影像制图和地形图测绘发展到影像理解与分类<sup>[26]</sup>、遥感信息提取与目标识别<sup>[23]</sup>、变化监测<sup>[27]</sup>、室内外三维建模<sup>[28-29]</sup>、无人系统智能驾驶<sup>[30-31]</sup>、深空探测<sup>[32-33]</sup>、精密工业测量<sup>[6,34]</sup>、突发灾害应急响应等众多领域<sup>[35-36]</sup>。

美国摄影测量学家、俄亥俄州立大学 Toni Schenk 教授在他的著作《数字摄影测量》中提到,“摄影测量和猫都有一个共同的也是最重要的特点——都有多条命,摄影测量的终结已经被预测过多次,但是仍然非常具有活力,数字摄影测量更具有使当前的许多问题得到更有效解决的潜力,许多新的问题也可以得到解决”<sup>[37]</sup>。笔者认为,正如传统测绘学发展为地球空间信息学<sup>[38-39]</sup>,传统测绘手段发展为泛在测绘<sup>[40]</sup>,传统地理信息系统发展为空间信息智能服务科学<sup>[41]</sup>,摄影测量学科也顺应新一轮科技革命的浪潮,快速发展为全新的广义摄影测量学,或称为遥感影像信息学,进入天空地一体化综合智能摄影测量时代。

## 2 广义摄影测量学的内涵与特点

广义摄影测量学,或称为遥感影像信息学,是利用天空地一体化的多传感器综合观测技术,获取多视角、多模态、多时相、多尺度遥感影像数据,并结合数字摄影测量及计算机视觉等多学科前沿技术,在多源控制资料的辅助下自动化智能化地研究和确定被摄物体的形状、位置、大小、性质及其时序变化关系的一门多学科交叉科学和技术。

当前世界科技发展已进入大数据及人工智能新时代,地球空间信息领域也面临新的发展机遇与挑战,数据全球化、处理实时化、服务智能化是国际前沿和热点。在全新的广义摄影测量框架下,天空地多源遥感数据的获取手段及数据处理的理论方法,具有与传统摄影测量显著不同的全新模式和发展趋势,笔者认为总体呈现“八多”态势,且演化趋势十分迅捷。例如天空地多源遥感数据获取方面,呈现多视角成像、多模态协同、多时相融合、多尺度联动等态势,观测手段越来越灵活,数据获取成本大幅下降,更多用户可以使用不同来源、不同视角、不同分辨率、不同时相、甚至不同模态的影像联合完成观测任务。天空地多源遥感数据处理方面,则呈现多特征耦合、多控制约束、多架构处理、多学科交叉等趋势,可以充分发挥多源多重覆盖观测数据的互补性和冗余性优势,并交叉融合多个学科的最新研究成果,构建实时/准实时智能处理技术体系,为天空地多源遥感数据的各领域应用奠定基础。

### 2.1 天空地多源遥感数据智能获取

#### 2.1.1 由单视角向多视角成像发展

传统航空摄影测量的主要成像方式为下视成

像,即相机主光轴垂直对地,相邻影像间具有一定重叠,从而构成立体影像和区域网。1957年,苏联制造的第一颗人造卫星成功发射到外太空,摄影测量由航空摄影测量迈向了航天摄影测量新阶段,为多视角全球遥感提供了新的途径<sup>[1]</sup>。各类高分辨率星载相机在对地观测成像时,由于卫星轨道高、相机成像视场角小,相邻轨道的下视影像间无法构成有效的立体观测,因此采用同轨/异轨侧摆机动成像模式,并进一步发展为同轨双阵和三线阵立体成像,如 SPOT-5、ALOS、天绘一号、资源三号、高分七号等,大幅提升了立体观测效率<sup>[20,42-43]</sup>。为了进一步提升航空影像获取效率,满足智慧城市等应用对于建筑物侧面高清纹理的需求,国内外摄影测量仪器厂商研发了机载多面阵拼接大视场相机、多镜头倾斜摄影测量相机和全景相机等,并在进一步集成化和小型化后,可搭载于低空无人机和地面移动平台<sup>[12-13,44]</sup>。在观测机制方面,也由传统的单平台获取演进为天空地协同、多平台组网,甚至基于互联网的众包方式获取数据,从而构建多成像视角的天空地多平台综合立体观测模式<sup>[38,45]</sup>。

#### 2.1.2 由单传感器向多模态协同发展

随着成像传感器技术的发展,星载、机载、车载平台所能够搭载的传感器越来越丰富,从全色相机到多光谱和高光谱相机,从可见光到红外、微波成像和激光测距,从面阵相机到多子线阵拼接相机,从普通静态成像相机到连续动态视频相机,并在 GNSS/IMU/星敏感器等导航定位技术的辅助下,实现对被摄物体的多传感器多模态协同观测。与单传感器观测数据相比,多源多模态遥感影像数据所提供的信息具有冗余性、互补性和合作性,多模态遥感数据融合可以将同一环境或对象进行综合,以获得满足各种应用的高质量信息,进而通过多模态数据联合处理生成比单传感器更精确、更完全、更可靠的综合观测结果<sup>[46-47]</sup>。目前,几乎所有天空地遥感平台均配备 GNSS/IMU 等多传感器集成定位定姿系统<sup>[48]</sup>,且大部分平台会同时搭载多种传感器进行数据获取,例如资源三号、高分七号等卫星既有三线阵或双线阵立体观测相机及多光谱相机,也安装有激光测高传感器提供精确高度控制信息<sup>[49]</sup>;航空飞行平台往往集成激光扫描系统和多视角倾斜摄影相机或全景相机,以便同时获取地表三维信息和高质量纹理色彩<sup>[13,50]</sup>;而车载移动测量系统和无人自动驾驶



系统则集成立体视频相机/全景相机、激光雷达或毫米波雷达测距系统等多模态传感器,获取车辆周围的精确三维动态信息<sup>[30-31]</sup>。

### 2.1.3 由单时相向多时相融合发展

天空地综合观测体系的建立和各类成像传感器的极大丰富和发展,对地观测成像的时间分辨率越来越高,完全颠覆了以往需要数月甚至更久才能重复获取大范围数据的现状,遥感信息的处理应用也已从单一资料分析向多时相多数据源复合分析过渡、从静态分布研究向动态监测过渡,对各种现象的表面描述向周期性规律挖掘和决策分析过渡<sup>[24,39]</sup>。时间有序、空间对齐、辐射一致的高质量多时相遥感影像序列,在地物信息自动提取、自然资源监测评估、生态红线监测、违法用地变化监测、目标识别与动态监控等领域有着非常广泛的应用前景<sup>[27,51]</sup>。多时相遥感信息获取与处理更具有实时性和实用性,例如高分一号和高分六号卫星的宽覆盖相机,理想情况下每天可获取至少一次全国范围的16 m分辨率遥感数据,在大范围准实时动态监测和灾害应急响应方面具有独特优势;而在目标识别与动态监控跟踪、无人平台自主导航等高动态应用场景,则需要通过视频摄影机、全景摄影机或3D LiDAR等方式获取实时序列观测数据,在多架构实时处理等技术的辅助下实现实时在线数据处理与分析,并为科学可靠决策提供支持<sup>[13,30]</sup>。

### 2.1.4 由单尺度向多尺度联动发展

1972年,世界上第1颗遥感卫星Landsat-1发射成功,地面分辨率约80 m,开启了遥感卫星发展的序幕,1999年发射的IKONOS卫星地面分辨率为1 m,2014年Worldview-3卫星更是将分辨率提高到前所未有的0.31 m,在世界商业遥感卫星领域独占鳌头;我国于2016年发射的高景一号,也将国产商业遥感卫星的分辨率提升至0.5 m。目前,国际上已经形成各种高、中、低轨道相结合,大、中、小卫星相协同,高、中、低分辨率相弥补的全球对地观测体系<sup>[48,52]</sup>,国际合作和开放共享趋势也越来越明显,例如Sentinel系列、Landsat系列、高分一号/六号宽覆盖等5~15 m分辨率的多模态遥感数据均可全球免费使用,大大促进了摄影测量与遥感信息提取技术的全球广泛普及应用。在航空和低空摄影测量领域,也建立了米级、分米级乃至厘米级地面分辨率的多尺度联动观测体系<sup>[3,53]</sup>,为准实时联合观测提供了

非常有效的技术支撑。各类空天平台的协同观测能够针对全球、国家级、区域级、目标级等不同地面范围提供强大的多尺度联动观测手段,为动态监测、智慧地球、实景中国、智慧城市多层次建模等不同应用提供充足的综合观测数据<sup>[38,51]</sup>。

## 2.2 天空地多源遥感数据智能处理

### 2.2.1 由单匹配特征向多特征耦合发展

影像中同名特征的自动匹配,是摄影测量自动化的核心问题之一。传统数字摄影测量的影像匹配大多首先在影像中提取明显的特征点,然后采用相关系数、最小二乘等基于局部灰度的算法进行相邻影像同名点匹配。但是,多视角多尺度影像间存在明显的几何变形,基于特征点的灰度匹配方法不再有效,因此基于线特征和以SIFT为代表的具有尺度、旋转、仿射不变特征匹配方法得到快速发展<sup>[18,54]</sup>,已广泛应用于影像匹配/配准、目标检测识别等领域。特征匹配方法的计算复杂度较高,为了保证计算效率,研究者通常基于线特征或SIFT特征进行粗匹配,获得重叠影像间的初始对应关系,然后采用灰度匹配方式获得更多同名特征<sup>[3]</sup>。对于存在显著非线性辐射差异的异源影像尤其是多模态影像,例如光学影像与SAR影像、LiDAR强度影像、影像地图间进行匹配时,上述方法均无法获得稳定同名特征,需要采用更加稳健的多模态影像匹配测度,例如基于相位相关扩展算法的频率域匹配和基于方向梯度直方图的匹配方法<sup>[55-56]</sup>。而LiDAR点云和多视影像间,由于数据特性差异太大,需要挖掘更高层次的特征,例如通过点特征、线特征、角特征甚至面特征等多种特征的耦合实现两类数据的高精度自动配准<sup>[9,50]</sup>。

### 2.2.2 由单源控制向多源广义控制发展

传统摄影测量的主要处理过程是在人工外业控制点的约束下,将原始天空地影像数据加工为数字正射影像(DOM)、数字高程模型(DEM)、数字线划地图(DLG)和数字表面模型(DSM)等基础地理空间信息产品<sup>[3]</sup>。在大数据时代,多源遥感数据的智能化处理是现阶段摄影测量迫切需要解决的问题,全自动获取天空地影像的精确内外方位元素是首要任务,其中的核心之一就是控制信息的全自动提取<sup>[19]</sup>,但传统的人工外业测量控制点作业方式显然无法满足需求。幸运的是,经过测绘部门几十年的生产实践,我国已经积累了海量基础地理空间信息产品,这些已有地理信息

产品完全可以作为多源广义控制信息,用于进行各类新获取遥感影像的全自动处理。另外,处于统一地理空间信息框架内的 Google Earth、天地图、SRTM、OpenStreetMap(OSM)等各类公众地理信息,根据控制点坐标及影像裁切的控制点影像库、LiDAR 点云、ICESat/高分七号等星载激光测高数据、已知定向参数的各类立体影像等,以及影像获取过程中同步采集的 GNSS/IMU/星敏感器等高精度定位定姿数据,都可以作为天空地影像自动化精确处理的多源广义控制资料<sup>[20-21,42-43]</sup>。

### 2.2.3 由单机处理向多架构实时处理发展

传统的数字摄影测量系统,受限于计算机硬件发展水平,几乎都采用单机单核处理方式,且处理过程需要大量人机交互操作<sup>[17]</sup>。天空地遥感影像数据量的增长和分辨率的提高,对数据存储和计算机系统提出了巨大挑战<sup>[39]</sup>。在 2005 年 Intel 和 AMD 相继发布双核 CPU 后,高性能并行计算技术迅速兴起,处理器由单核向多核、众核与异构架构发展,计算机由单机向集群系统和云计算中心发展。2007 年,我国自主研发的数字摄影测量网格 DPGrid 系统在采用最新的数字摄影测量处理理论和技术研究成果的同时,全面兼容单机多核及多机多核高性能集群并行计算能力,极大地提升了航空航天遥感影像的处理效率<sup>[17,35]</sup>。云计算的本质是基于服务的分布式计算技术,是解决海量遥感大数据高效处理问题的新途径,已经商业化主要有 Google 云处理平台、NASA 的 Nebula、华为云、阿里云等,例如中国四维联合华为云推出的四维地球遥感云服务平台,汇聚了海陆空天海量多源遥感数据,可为用户提供高质的遥感影像数据在线应用能力。各种高精度实时在线处理需求的爆发性增长,也促进了高速星地通信、5G 传输以及 CPU/GPU/FPGA 等多架构联合实时处理技术的发展,例如基于线激光和立体相机的实时 3D 建模系统,采用 CPU/GPU 联合处理架构,可以实现工业薄板零件的实时(每秒 60 帧以上)三维重建,且重建精度优于 0.02 mm<sup>[34]</sup>。

### 2.2.4 由单学科向多学科交叉融合发展

摄影测量学是测绘学科的一个分支,其主要特点是在光学摄影成像的像片上进行量测和解译,无须接触物体本身。光学成像的物理法则是小孔成像,因而透视变换的几何原理是摄影测量学的理论基础。1959 年,德国 Schmid 教授提出

光束法区域网平差的概念,完美结合了小孔成像原理与最小二乘法,促进了摄影测量完整学科体系的建立,并从此走向大规模数据处理和各领域广泛应用<sup>[1]</sup>。随着数字技术的发展和计算机的广泛应用,尤其是计算机视觉的出现,摄影测量也迎来了新的发展机遇,快速吸收其他学科的最新研究成果,并向多学科交叉融合迈进<sup>[17]</sup>。例如摄影测量和计算机视觉虽然在解决思路和应用领域方面有所差异,但几何层面的理论基础都是小孔成像和双目视觉,尤其是近年来基于视觉的 SfM 及 Visual SLAM 等计算机视觉领域的主流热点问题,都与实时摄影测量在匹配、平差、定位等方面具有共通之处<sup>[57]</sup>。此外,天空地多传感器融合的实时摄影测量,离不开与计算机视觉、数字信号处理、自动控制、人工智能等多个相关学科的交叉融合发展,是摄影测量与遥感学科向更深的理论基础、更广泛的应用前景和更实际的自动化解题能力前进的必然之路<sup>[1]</sup>。

## 3 广义摄影测量学的若干研究方向

相对于非常强大的天空地多源遥感数据获取能力,当前的摄影测量数据处理理论和方法还存在种种制约,遥感信息产品的快速生产和服务能力显著滞后,海量数据堆积与有限信息孤岛并存的矛盾仍然突出。在大数据及人工智能新时代,实景三维中国、信息提取监测、智慧城市建模、自动驾驶、智能制造等应用领域必将取得飞速发展,广义摄影测量学的发展尚需交叉融合多个学科的最新研究成果,在天空地一体化多源数据智能处理的理论技术和应用领域取得更大突破,例如天空地多视角/多模态影像几何处理、多时相影像智能信息提取与动态监测、激光点云与多视角影像联合精细建模、多传感器集成的无人系统自主导航、智能制造系统视觉检测等等,以便充分发挥每个平台、每个传感器、每个谱段、每个有效像元的作用,形成从天空地多源遥感数据几何处理到信息提取和智能决策服务的完整理论和技术体系。

### 3.1 天空地多源遥感影像多特征自动匹配

影像匹配是摄影测量与遥感产品自动化生产中至关重要的环节,直接影响区域网平差、影像镶嵌拼接、三维重建等后续环节的精度。在天空地多视角/多模态影像获取过程中,由于平台飞行高度不同、传感器成像模式不同、成像视角显著差异等因素,导致影像间存在很大的透视几何变形和

非线性辐射畸变等现象,基于灰度的传统特征点影像匹配方法在多视角影像连接点自动匹配方面已不再适用<sup>[55]</sup>。因此,深入研究天空地多源遥感影像的稳健可靠自动匹配方法,对推动多源遥感影像高精度自动化空中三角测量,提高地形地物三维重建效率及贴近摄影测量变形监测等均有重要意义。以 SIFT、SURF、A-SIFT 等为代表的经典特征匹配方法,已被广泛应用于影像匹配/配准、目标检测识别等领域<sup>[3,54]</sup>。但是,经典特征匹配方法对非线性辐射差异和透视几何形变较为敏感,对于多视角/多模态影像无法获得稳定可靠的同名特征,因此需要研究具有多重不变特性的多模态影像高可靠性特征匹配方法,构建尺度、旋转及非线性辐射差异不变的稳健特征描述符<sup>[56]</sup>。而激光点云和天空地多视角影像间,由于数据特性差异太大,多重不变特征描述符也无法实现有效匹配,还需要挖掘更高层次的稳定特征,例如从两类数据中提取稳定的线特征、角特征及交叉点特征(属于面特征),并在初始定位定姿参数的辅助下缩小同名特征搜索范围,进行多种特征耦合的高精度自动匹配<sup>[9,50]</sup>。

### 3.2 天空地多源遥感影像联合区域网平差

摄影测量领域的区域网平差,是以共线方程或有理函数等成像模型为基础,将测区内所有观测值纳入统一的平差系统,建立误差方程并采用最小二乘原则求解未知数,从而获得模型中各类未知参数的最佳估值,实现影像空间和物方空间的严密坐标转换,并进行精度评定。天空地多源遥感影像联合平差,涉及卫星、航空、低空、地面等不同观测视角,线阵、面阵等不同成像模式,光学、微波、激光等不同观测模态,数据种类繁多,观测机制复杂,需要研究建立各类影像的误差模型,解决不同原始观测资料间的相关性及方差分量估计问题,以及同名特征中粗差观测值的稳健探测剔除问题<sup>[58]</sup>。传统航空和航天摄影测量的成像中心规则排列及法方程带宽优化方法不再适用,需要研究突破天空地多源立体观测超大规模方程组的压缩存储和快速解算方法,如超大规模病态法方程几何结构优化、超大规模方程组压缩存储、CPU/GPU 联合并行解算、甚至无须存储大规模法方程的共轭梯度快速解算方法等,获取各影像的全局最优精确对地定位参数<sup>[44-45,59]</sup>。在保证全球地理信息资源建设等超大规模区域网平差成果绝对定位精度方面,则需要充分发挥各类已有地

理信息的控制作用,如公开 DEM/DOM、Open Street Map 矢量图等中等精度公众地理信息,高精度控制点影像库、星载激光测高数据、机载/车载 LiDAR 点云、高精度 GIS 矢量、空三后原始立体影像、高精度定位定姿观测值等高精度控制资料,实现全自动化的云控制联合区域网平差<sup>[19]</sup>。

### 3.3 多时相影像智能信息提取与变化监测

多时相遥感影像中地形地物信息的自动提取与动态变化监测,是广义摄影测量走向智能信息服务的必由之路和经典难题<sup>[39]</sup>。通过智能数据处理手段,进行精确配准、无效像元检测消除、辐射校正及影像合成,生成时间有序、空间对齐、辐射一致的高质量多时相遥感影像序列,是地物信息自动提取、自然资源监测评估、土地利用动态监测、目标识别与动态监控等应用的前提<sup>[52,60]</sup>。传统的遥感影像处理方法及近年来流行的深度学习在多时相遥感影像地物智能提取及变化监测方面尚面临巨大挑战,例如深度学习得到的像素级分类结果距离规则化矢量成果仍然有相当差距;而且国际上目前尚无遥感领域专用的深度神经网络,只能通过数据裁剪等手段使遥感影像适应已有的通用图像处理深度学习框架。因此需要针对遥感影像数据的特殊性及时智能处理需求,研究创建面向遥感数据智能目标识别与信息提取的自主产权深度学习框架,并研究空-谱信息联合和多技术融合的多时相遥感影像目标识别提取与动态监测方法。基于深度学习的方法尚缺乏同时提取道路路面和拓扑网络的能力;让深度学习模型高效融合时空特征,像人类一样理解农作物长势并区分不同作物,仍任重道远。需要充分结合深度学习机制和传统优化方法各自的优势,例如基于全卷积网络和边缘规则优化进行建筑物提取,利用分割结果和中心线矢量追踪相融合进行路面及路网提取,利用 3D 卷积神经网络学习高维时空特征实现农作物提取分类等等<sup>[61]</sup>。另外,地物目标提取结果,也可以反向融入多源影像几何处理过程,形成全新的几何语义一体化处理机制,进一步提高处理精度和稳定性。

### 3.4 激光点云与多视影像联合精细建模

2016 年 4 月,习近平总书记提出新型智慧城市的概念。建筑物是智慧城市中最重要的核心元素,三维建筑物模型可为城市基础设施规划和新型智慧城市提供良好支撑,其准确几何结构及拓扑属性信息是促进智慧城市建设的决定性因



素之一。三维重建技术主要有基于主动视觉的激光扫描法、结构光法、雷达技术、Kinect 技术和基于被动视觉的单目视觉、双目视觉、多目视觉、SLAM 技术等<sup>[62]</sup>,其中激光扫描与多目立体视觉是获取地物三维空间几何信息与纹理信息的主要手段。点云与影像的有机结合可以显著提升建筑物等典型地物目标精细三维重建的效率和效果<sup>[28,51]</sup>,二者的高精度配准是必须解决的首要问题。基于 LiDAR 强度图和 ICP 的配准方法容易受到点云密度的影响且对参数初始值较为敏感,而基于线特征、角特征和交叉点面特征的配准方法直接建立点云与影像特征间的对应关系,并据此计算两者间的几何变换参数<sup>[19,63]</sup>,避免了点云和影像间的转换误差,可充分利用激光测距精度较高的优势,从点云中提取平面结构对影像区域网进行绝对定向约束。在精细建模过程中,可充分发挥两类数据的优势,通过多视影像密集匹配和深度学习等先进手段对 LiDAR 点云进行加密优化,提取显著线面特征约束三维点云表面重建,基于纹理识别和深度学习进行建筑物立面遮挡修复,并解决高保真纹理映射优化、建筑物矢量模型提取、结合 Visual SLAM 和激光扫描等技术的 LOD 4 室内外一体化建模等核心问题。

### 3.5 多传感器集成的无人系统自主导航

无人系统常指无人机、无人车、无人船、智能机器人等可移动无人驾驶系统,涉及多传感器集成、人工智能、高速通信、机器人技术、自动控制等关键技术,本文特指各类低空无人机和地面无人驾驶汽车。智能化是无人系统发展的重要方向,在智能数据采集、长距离货物运送、智能物流配送等众多领域具有广泛的应用前景。智能化无人系统的核心技术主要包括环境感知、信息交互、知识学习、规划决策、行为执行等 5 个方面<sup>[64]</sup>。环境感知的智能化,需要解决无人机/车在未知受限环境中的实时自主定位和目标识别等问题,是实现自动驾驶的前提条件。传统的无人机/车常采用 GNSS/IMU 组合导航定位系统进行定位,但是实时定位精度较低,误差较大,而且在复杂环境中往往存在噪声干扰和信号遮挡等问题。多传感器集成的环境智能感知和目标识别技术是解决上述问题的可行途径,包括 GNSS/IMU、激光雷达、立体相机、超声波测距、嵌入式处理器和智能识别系统等,多传感器数据的实时处理和深度融合可显著提高实时定位的精度和可靠性<sup>[40]</sup>,并结合人工智

能等技术确定周围环境中各类目标的距离、属性及其动态变化信息<sup>[30-31]</sup>。智能无人机的自主能力体现在自主航线规划、自动避障、信息采集和飞行控制的智能程度,智能无人驾驶汽车的自主操控主要表现为自动驾驶等级提升,即由已知环境的部分自动驾驶进化到动态未知环境的全自动驾驶,二者都涉及多传感器动态感知、多架构实时计算、智能认知推理、规划决策执行等核心技术。

### 3.6 多传感器集成的智能制造视觉检测

2013 年,德国政府首次提出“工业 4.0”战略,其目的是将传统制造业向智能化转型,并在以智能制造为主导的第四次工业革命中占领先机。我国也已制定相应的发展规划,力争通过新一代信息技术与制造业深度融合,从制造业大国向制造业强国转变。智能制造装备是具有感知、决策、控制、执行功能的各类制造装备的统称,包括新一代信息技术、高端数控机床、成套自动化生产线、工业机器人、重大精密制造装备、3D 打印等<sup>[65-67]</sup>。当前高端智能制造装备属于复杂的光机电系统,应用环境特殊,而且对检测准确率、实时性、重复性等要求极高,实时在线检测、无人干预全自动检测、智能化分析是必备条件。精密工业摄影测量作为非接触技术手段,可采用实时立体视觉或多传感器融合视觉系统代替人眼和人手进行各种工业部件的在线检测分析、判断决策及质量控制,具有智能化程度高和环境适应性强等特点,是智能制造系统不可或缺的核心组成部分<sup>[14,34]</sup>。多传感器集成的视觉检测系统,一般主要由光源、高速光学相机、激光扫描仪、图像处理器等构成<sup>[67]</sup>,需要解决成像系统检校、高速数据获取、图像处理分析、缺陷部件智能识别检测等核心问题,尤其是针对常见的尺寸、划痕、腐蚀、褶皱、突起、凹陷、孔洞、色彩等不同制造缺陷,需要研究相应的智能化识别检测方法<sup>[68]</sup>。随着人工智能浪潮的快速兴起,有望借助深度学习机制强大的学习能力和泛化能力,通过大量已有样本的训练构建通用的制造缺陷智能识别检测技术。

## 4 总结与展望

随着天空地多源遥感数据获取和摄影测量处理理论方法的进步,以及云计算、大数据、物联网、人工智能等新一轮科技革命浪潮的到来,摄影测量也与计算机视觉、人工智能等多个相关学科交叉融合,发展成为广义摄影测量学,进入天空地一

体化综合智能摄影测量新阶段。在广义摄影测量学框架下,天空地多源遥感数据的获取手段及数据处理的理论方法都具有全新的模式和发展趋势,例如天空地多源遥感数据获取方面呈现多视角成像、多模态协同、多时相融合、多尺度联动等态势;而多源遥感数据处理方面则呈现多特征耦合、多控制约束、多架构处理、多学科交叉等趋势。

在大数据及人工智能新时代,天空地一体化广义摄影测量学的全面发展和智能服务,尚需尽快开展多学科交叉的创新型高端人才培养,并融合多个学科的最新研究成果,在天空地多视角/多模态影像几何处理、多时相影像智能信息提取与动态监测、激光点云与多视角影像联合精细建模、多传感器集成的无人系统自主导航、智能制造系统视觉检测等领域的理论和技术方面取得更大突破,形成从天空地多源遥感数据实时/准实时智能几何处理到信息提取服务的完整理论和技术体系,为智能化测绘时代天空地多源遥感数据的各领域应用奠定基础。

## 参考文献:

- [1] 龚健雅,季顺平.从摄影测量到计算机视觉[J].武汉大学学报(信息科学版),2017,42(11):1518-1522,1615.  
GONG Jianya, JI Shunping. From photogrammetry to computer vision[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(11): 1518-1522, 1615.
- [2] SEFERCIK U G, ALKAN M, BUYUKSALIH G, et al. Generation and validation of high-resolution DEMs from Worldview-2 stereo data [J]. The Photogrammetric Record, 2013, 28(144): 362-374.
- [3] ZHANG Yongjun, XIONG Jinxin, HAO Lijuan. Photogrammetric processing of low-altitude images acquired by unpiloted aerial vehicles [J]. The Photogrammetric Record, 2011, 26(134): 190-211.
- [4] COLOMINA I, MOLINA P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 92: 79-97.
- [5] ZHANG Yongjun, ZHANG Zuxun, ZHANG Jianqing. Automatic measurement of industrial sheetmetal parts with CAD data and non-metric image sequence[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2006, 102(1): 52-59.
- [6] LUHMANN T. Close range photogrammetry for industrial applications[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(6): 558-569.
- [7] FRASER C. Automatic camera calibration in close range photogrammetry [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2013, 79(4): 381-388.

- [8] REINARTZ P, MÜLLER R, SCHWIND P, et al. Orthorectification of VHR optical satellite data exploiting the geometric accuracy of TerraSAR-X data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(1): 124-132.
- [9] ZHANG Yongjun, XIONG Xiaodong, ZHENG Maoteng, et al. LiDAR strip adjustment using multifeatures matched with aerial images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(2): 976-987.
- [10] CHEN Gang, METZ M R, RIZZO D M, et al. Object-based assessment of burn severity in diseased forests using high-spatial and high-spectral resolution MASTER airborne imagery[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 102: 38-47.
- [11] RIZZOLI P, MARTONE M, GONZALEZ C, et al. Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 132: 119-139.
- [12] WARRICK J A, RITCHIE A C, ADELMAN G, et al. New techniques to measure cliff change from historical oblique aerial photographs and structure-from-motion photogrammetry[J]. Journal of Coastal Research, 2017, 33(1): 39-55.
- [13] ZHANG Xujie, ZHAO Pengcheng, HU Qingwu, et al. A UAV-based panoramic oblique photogrammetry (POP) approach using spherical projection[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 159: 198-219.
- [14] 张永军,刘经南,张祖勋,等.基于非量测 CCD 摄像机的钣金件误差检测[J].测绘学报,2004,33(2):132-137. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2004.02.008.  
ZHANG Yongjun, LIU Jingnan, ZHANG Zuxun, et al. Imprecision inspection of sheetmetal parts with non-metric CCD camera[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 33(2): 132-137. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2004.02.008.
- [15] 张祖勋,张剑清.广义点摄影测量及其应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2005,30(1):1-5.  
ZHANG Zuxun, ZHANG Jianqing. Generalized point photogrammetry and its application[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(1): 1-5.
- [16] ZHANG Zuxun, ZHANG Yongjun, ZHANG Jianqing, et al. Photogrammetric modeling of linear features with generalized point photogrammetry [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2008, 74(9): 1119-1127.
- [17] 张祖勋.从数字摄影测量工作站(DPW)到数字摄影测量网格(DPGrid)[J].武汉大学学报(信息科学版),2007,32(7):565-571.  
ZHANG Zuxun. From digital photogrammetry workstation (DPW) to digital photogrammetry grid (DPGrid) [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(7): 565-571.



- [18] ZHANG Yongjun, HU Binghua, ZHANG Jianqing. Relative orientation based on multi-features[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(5): 700-707.
- [19] 张祖勋, 陶鹏杰. 谈大数据时代的“云控制”摄影测量[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1238-1248. DOI: 10.11947/j. AGCS.2017.20170337.
- ZHANG Zuxun, TAO Pengjie. An overview on “cloud control” photogrammetry in big data era[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1238-1248. DOI: 10.11947/j. AGCS.2017.20170337.
- [20] ZHANG Yongjun, WANG Bo, ZHANG Zuxun, et al. Fully automatic generation of geoinformation products with Chinese ZY-3 satellite imagery[J]. *The Photogrammetric Record*, 2014, 29(148): 383-401.
- [21] ZHANG Yongjun, WAN Yi, HUANG Xinhui, et al. DEM-assisted RFM block adjustment of pushbroom nadir viewing HRS imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(2): 1025-1034.
- [22] VASSILAKI D I, STAMOS A A. TanDEM-X DEM: comparative performance review employing LiDAR data and DSMs[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 160: 33-50.
- [23] CHEN Jun, DOWMAN I, LI Songnian, et al. Information from imagery: ISPRS scientific vision and research agenda [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 115: 3-21.
- [24] 张祖勋. 由数字摄影测量的发展谈信息化测绘[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2008, 33(2): 111-115.
- ZHANG Zuxun. On informatization of surveying and mapping from the development of digital photogrammetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(2): 111-115.
- [25] 季顺平. 智能摄影测量学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 172.
- JI Shunping. An introduction to intelligent photogrammetry [M]. Beijing: Science Press, 2018: 172.
- [26] LI Yansheng, ZHANG Yongjun, HUANG Xin, et al. Deep networks under scene-level supervision for multi-class geospatial object detection from remote sensing images[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 146: 182-196.
- [27] PENG Daifeng, ZHANG Yongjun, GUAN Haiyan. End-to-end change detection for high resolution satellite images using improved UNet++[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 1382. DOI: 10.3390/rs11111382.
- [28] LIU Xinyi, ZHANG Yongjun, LING Xiao, et al. TopoLAP: topology recovery for building reconstruction by deducing the relationships between linear and planar primitives[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1372. DOI: 10.3390/rs11111372.
- [29] STATHAM N. Use of photogrammetry in video games: a historical overview[J]. *Games and Culture*, 2020, 15(3): 289-307.
- [30] WANG Meng, DONG Han, ZAHNG Wei, et al. An end-to-end auto-driving method based on 3D LiDAR [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1288: 012061.
- [31] LIU Dongjie, ZHAO Jin, XI Axin, et al. Data augmentation technology driven by image style transfer in self-driving car based on end-to-end Learning[J]. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2020, 122(2): 593-617.
- [32] LI Rongxing, HWANGBO J, CHEN Yunhang, et al. Rigorous photogrammetric processing of HiRISE stereo imagery for mars topographic mapping[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(7): 2558-2572.
- [33] 邱凯昌, 刘斌, 辛鑫, 等. 月球轨道器影像摄影测量制图进展及应用[J]. *测绘学报*, 2019, 48(12): 1562-1574. DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20190462.
- DI Kaichang, LIU Bin, XIN Xin, et al. Advances and applications of lunar photogrammetric mapping using orbital images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(12): 1562-1574. DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20190462.
- [34] HE Yuan, ZHENG Shunyi, ZHU Fengbo, et al. Real-time 3D reconstruction of thin surface based on laser line scanner[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 534. DOI: 10.3390/s20020534.
- [35] ZHANG Zuxun, ZHANG Yongjun, KE Tao, et al. Photogrammetry for first response in Wenchuan earthquake [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2009, 75(5): 510-513.
- [36] SCHUMANN G J P, BRAKENRIDGE G R, KETTNER A J, et al. Assisting flood disaster response with earth observation data and products: a critical assessment[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1230. DOI: 10.3390/rs10081230.
- [37] SCHENK T. Digital photogrammetry[M]. Laurelville: Terra-Science, 1999.
- [38] 李德仁. 展望大数据时代的地球空间信息学[J]. *测绘学报*, 2016, 45(4): 379-384. DOI:10.11947/j. AGCS.2016.20160057.
- LI Deren. Towards geo-spatial information science in big data era[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(4): 379-384. DOI:10.11947/j. AGCS.2016.20160057.
- [39] 李德仁. 从测绘学到地球空间信息智能服务科学[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1207-1212. DOI: 10.11947/j. AGCS.2017.20170263.
- LI Deren. From geomatics to geospatial intelligent service science [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1207-1212. DOI: 10.11947/j. AGCS.2017.20170263.
- [40] 刘经南, 郭文飞, 郭迟, 等. 智能时代泛在测绘的再思考[J]. *测绘学报*, 2020, 49(4): 403-414. DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20190539.
- LIU Jingnan, GUO Wenfei, GUO Chi, et al. Rethinking

- ubiquitous mapping in the intelligent age[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(4): 403-414. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20190539.
- [41] 王艳东, 龚健雅. 空间信息智能服务理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- WANG Yandong, GONG Jianya. Theory and method of spatial information intelligent service[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [42] 龚健雅, 王密, 杨博. 高分辨率光学卫星遥感影像高精度无地面控制精确处理的理论与方法[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1255-1261. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170307.
- GONG Jianya, WANG Mi, YANG Bo. High-precision geometric processing theory and method of high-resolution optical remote sensing satellite imagery without GCP[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1255-1261. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170307.
- [43] 王晋, 张勇, 张祖勋, 等. ICESat 激光高程点辅助的天绘一号卫星影像立体区域网平差[J]. *测绘学报*, 2018, 47(3): 359-369. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170425.
- WANG Jin, ZHANG Yong, ZHANG Zuxun, et al. ICESat laser points assisted block adjustment for mapping satellite-1 stereo imagery[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(3): 359-369. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170425.
- [44] SUN Yanbiao, SUN Huabo, YAN Lei, et al. RBA: reduced bundle adjustment for oblique aerial photogrammetry[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 121: 128-142.
- [45] ZHANG Yongjun, LIN Liwen, ZHENG Maoteng, et al. Combined bundle block adjustment with spaceborne linear array and airborne frame array imagery[J]. *The Photogrammetric Record*, 2013, 28(142): 162-177.
- [46] 陈锐志, 王磊, 李德仁, 等. 导航与遥感技术融合综述[J]. *测绘学报*, 2019, 48(12): 1507-1522. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190446.
- CHEN Ruizhi, WANG Lei, LI Deren, et al. A survey on the fusion of the navigation and the remote sensing techniques[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(12): 1507-1522. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190446.
- [47] 李德仁. 展望 5G/6G 时代的地球空间信息技术[J]. *测绘学报*, 2019, 48(12): 1475-1481. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190437.
- LI Deren. Towards geospatial information technology in 5G/6G era[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(12): 1475-1481. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190437.
- [48] 杨元喜. 弹性 PNT 基本框架[J]. *测绘学报*, 2018, 47(7): 893-898. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20180149.
- YANG Yuanxi. Resilient PNT concept frame[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(7): 893-898. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20180149.
- [49] 唐新明, 陈继溢, 李国元, 等. 资源三号 02 星激光测高误差分析与指向角粗标定[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(11): 1611-1619.
- TANG Xinming, CHEN Jiyi, LI Guoyuan, et al. Error analysis and preliminary pointing angle calibration of laser altimeter on Ziyuan-3 02 satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(11): 1611-1619.
- [50] KWONG I H Y, FUNG T. Tree height mapping and crown delineation using LiDAR, large format aerial photographs, and unmanned aerial vehicle photogrammetry in subtropical urban forest [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(14): 5228-5256.
- [51] 冯文卿, 张永军. 利用多尺度融合进行面向对象的遥感影像变化检测[J]. *测绘学报*, 2015, 44(10): 1142-1151. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140260.
- FENG Wenqing, ZHANG Yongjun. Object-oriented change detection for remote sensing images based on multi-scale fusion[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(10): 1142-1151. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140260.
- [52] LI Hongliang, LI Dong, LI Yunhua. A multi-index assessment method for evaluating coverage effectiveness of remote sensing satellite [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(10): 2023-2033.
- [53] ZHANG Yongjun, ZHANG Zuxun, ZHANG Jianqing, et al. 3D building modelling with digital map, LiDAR data and video image sequences[J]. *The Photogrammetric Record*, 2005, 20(111): 285-302.
- [54] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [55] XIE Xunwei, ZHANG Yongjun, LING Xiao, et al. A novel extended phase correlation algorithm based on log-Gabor filtering for multimodal remote sensing image registration [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(14): 5429-5453.
- [56] YAN Xiaohu, ZHANG Yongjun, ZHANG Dejun, et al. Multimodal image registration using histogram of oriented gradient distance and data-driven grey wolf optimizer[J]. *Neurocomputing*, 2020, 392: 108-120.
- [57] MUR-ARTAL R, TARDÓS J D. ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(5): 1255-1262.
- [58] 张永军, 王博, 黄旭, 等. 影像匹配粗差的局部矢量面元剔除方法[J]. *测绘学报*, 2014, 43(7): 717-723. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0092.
- ZHANG Yongjun, WANG Bo, HUANG Xu, et al. Eliminating of image matching gross errors based on local vector field[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(7): 717-723. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0092.

- [59] ZHENG Maoteng, ZHOU Shunping, XIONG Xiaodong, et al. A new GPU bundle adjustment method for large-scale data[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2017, 83(9): 633-641.
- [60] 龚健雅, 钟燕飞. 光学遥感影像智能化处理研究进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 733-747.  
GONG Jianya, ZHONG Yanfei. Survey of intelligent optical remote sensing image processing[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 733-747.
- [61] 龚健雅, 季顺平. 摄影测量与深度学习[J]. 测绘学报, 2018, 47(6): 693-704. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170640.  
GONG Jianya, JI Shunping. Photogrammetry and deep learning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(6): 693-704. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170640.
- [62] 郑太雄, 黄帅, 李永福, 等. 基于视觉的三维重建关键技术研究综述[J]. 自动化学报, 2020, 46(4): 631-652.  
ZHENG Taixiong, HUANG Shuai, LI Yongfu, et al. Key techniques for vision based 3D reconstruction: a review [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(4): 631-652.
- [63] 王广帅, 万一, 张永军. 交叉点结构特征约束的机载 LiDAR 点云与多视角航空影像配准[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(9): 1868-1877.  
WANG Guangshuai, WAN Yi, ZHANG Yongjun. Registration of airborne LiDAR data and multi-view aerial images constrained by junction structure features[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(9): 1868-1877.
- [64] 徐德民. 智能无人系统发展现状及趋势[R]. 西安:西北工业大学, 2019.  
XU Demin. Progresses and prospects of intelligent unmanned systems[R]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2019.
- [65] 王耀南, 陈铁健, 贺振东, 等. 智能制造装备视觉检测控制方法综述[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(3): 273-286.  
WANG Yaonan, CHEN Tiejian, HE Zhendong, et al. Review on the machine vision measurement and control technology for intelligent manufacturing equipment[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(3): 273-286.
- [66] CZIMMERMANN T, CIUTI G, MILAZZO M, et al. Visual-based defect detection and classification approaches for industrial applications: a survey[J]. Sensors, 2020, 20(5): 1459. DOI: 10.3390/s20051459.
- [67] NEOGI N, MOHANTA D K, DUTTA P K. Review of vision-based steel surface inspection systems [J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2014, 2014: 50. DOI: 10.1186/1687-5281-2014-50.
- [68] CHA Y J, CHOI W, SUH G, et al. Autonomous structural visual inspection using region-based deep learning for detecting multiple damage types[J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2018, 33(9): 731-747.

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期: 2020-06-15

修回日期: 2020-08-25

第一作者简介: 张永军(1975—),男,博士,教授,研究方向为摄影测量与遥感。

First author: ZHANG Yongjun (1975—), male, PhD, professor, majors in photogrammetry and remote sensing.

E-mail: zhangyj@whu.edu.cn

## 《测绘学报》入选 2020 年“第五届中国精品科技期刊”

2020 年 12 月 29 日,中国科学技术信息研究所召开的中国科技论文统计结果发布会上,发布了“第五届中国精品科技期刊”名单,《测绘学报》入选第五届中国精品科技期刊。

2000 年开始,为打造中国精品科技期刊,推动中国科技期刊评价体系的研究,提高中国科技水平,国家科技部开展了“中国精品科技期刊战略研究”和“中国精品科技期刊服务与保障系统”的研究工作。中国科学技术信息研究所承担国家科技部中国科技期刊战略相关研究任务,在国内首先提出了“中国精品科技期刊”的概念,并于 2008 年进行首次评选,之后每三年评选一次,2020 年第五届入选名单中包括 300 种以中文出版的中国精品科技期刊和 20 种以英文出版的中国国际化精品科技期刊。

《测绘学报》秉持着“尊重科学、弘扬学术、追求卓越、求实创新”的办刊理念,始终走在测绘地理信息科技发展的前沿,以传播测绘地理信息科研成果、讲好测绘地理信息故事为己任。《测绘学报》再次入选“中国精品科技期刊”,是对本刊学术质量、办刊理念、行业影响力的高度认可。所取得的进步离不开广大编委、专家、作者、读者的支持和帮助。《测绘学报》将继续立足于测绘地理信息专业学术领域,守正创新,与广大科研工作者携手前行,共同领跑中国测绘地理信息发展新时代!