

论无所不在的时空智能

李德仁¹, 王密^{1,2}, 肖晶³, 李明^{1,4,5}, 邸凯昌⁶, 李熙¹, 罗斌¹

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430072;

2. 湖北珞珈实验室, 武汉 430079;

3. 武汉大学 人工智能学院, 武汉 430072;

4. 苏黎世联邦理工学院 理论物理研究所, 苏黎世 8039;

5. 苏黎世联邦理工学院 大地测量与摄影测量研究所, 苏黎世 8039;

6. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

摘要: 世界是物质的, 物质是运动的, 时间和空间维度的特征共同揭示了运动的物质世界的本质。随着人工智能技术和数据获取手段的迅猛发展, 大规模时空数据的智能建模与解析已成为可能, 这也推动了更深层次的技术突破与科学创新, 新兴学科——时空智能学STI (Spatio-Temporal Intelligence) 应运而生。作为一个多学科交叉领域, STI致力于将时空数据与智能计算方法融合, 从而开辟空天、空地、空海、深空、社会经济和智慧医疗等多领域多场景的全新应用, 并推动从数据采集、分析到决策的全链路智能化, 助力提升关键领域的决策效率与资源管理水平。本文首先回顾了地球科学研究的历史演进, 从以测绘与制图为核心的大地测量学, 到以空间信息服务为重点的地理信息学, 再到当前新兴的时空智能学, 充分展现了人类在测绘、测量及理解物理世界能力上的不断突破与发展。随着人工智能的广泛应用, 我们正从静态空间数据分析逐步迈向动态时空数据的智能化处理与实时决策, 这一转变映射了社会的深刻变迁: 从以机械与物流效率为核心的工业时代, 到以数字化与互联为特征的信息时代, 再迈向以数据驱动洞察与自主决策为标志的智能时代。在此背景下, 本文系统探讨了时空智能的核心概念、研究目标与范围, 分析其与相关学科的交叉融合, 阐述了典型应用场景, 并从科学研究与实践应用两个维度剖析其潜在价值与意义。在当今复杂多变的世界中, 时空智能不仅为更精准的知识发现开辟了新路径, 也在弥合科学认知与生产实践之间的鸿沟方面展现出巨大潜力。

关键词: 时空智能学, 人工智能, 摄影测量与遥感, 学科交叉

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 李德仁, 王密, 肖晶, 李明, 邸凯昌, 李熙, 罗斌. 2025. 论无所不在的时空智能. 遥感学报, 29(6): 1388-1398

Li D R, Wang M, Xiao J, Li M, Di K C, Li X and Luo B. 2025. On ubiquitous spatio-temporal intelligence. National Remote Sensing Bulletin, 29(6): 1388-1398 [DOI: 10.11834/jrs.20255016]

1 引言

世界是物质的, 物质是运动的 (Tyson等, 2000), 运动着的物质世界需要通过时空信息来描述。在当今万物互联和人工智能时代, 时空数据的获取、处理、信息提取与知识挖掘需要走向智能, 时空智能学应运而生。

2021年9月16日, 习近平总书记在致首届北斗规模应用国际峰会的贺信中指出, 当前, 全球数字化发展日益加快, 时空信息、定位导航服务

成为重要的新型基础设施。时空智能学作为新型基础设施转化为新质生产力的核心要素, 是万物互联与数字孪生时代测绘遥感地理信息学的数字化、信息化、网络化、智能化与实时化, 能自动和实时地感知、认知自然活动和人类活动, 不仅是传统测绘遥感科学的发展, 也是人工智能的重要组成部分。

回顾测绘遥感科学的发展, 其历程贯穿了人类社会的每一次深刻变革, 不仅体现了变革带来的技术进步, 也紧密回应着社会变革的需求。工

收稿日期: 2025-01-09; 预印本: 2025-03-28

基金项目: 国家杰出青年科学基金延续项目(编号:62425102)

第一作者简介: 李德仁, 研究方向为摄影测量与遥感、地理信息系统理论和应用。E-mail: drli@whu.edu.cn

通信作者简介: 王密, 研究方向为摄影测量与遥感、遥感卫星影像高精度处理。E-mail: wangmi@whu.edu.cn

工业化时代奠定了测绘遥感学的基础，聚焦于地球表面信息的精准测量与获取，推动了航空摄影测量、卫星遥感、地理信息系统等领域的技术起源。信息化时代催生了地球空间信息学，该阶段以地理信息系统为核心，整合遥感、全球导航卫星系统、地理建模和数据分析等技术，实现了地球空间数据从采集、管理到分析和可视化的全面信息化（Burke等，2021），同时推动了地理信息在环境监测（Himeur等，2022）、城市规划（Shi等，2023）、防灾减灾（Sui等，2020）等领域的广泛应用。在智能化时代，人类社会正在经历以先进技术和智能系统获取大数据为核心的范式转型，人工智能、机器学习和数据挖掘的广泛应用显著提升了决策与运行效率，物联网实现了全球范围的实时数据交换与互操作，数字孪生技术进一步增强了对复杂系统的动态建模与场景理解能力。在智能化时代，时空智能学应运而生（图1），致力于通过人工智能和大数据挖掘实现动态感知与智能决策，构建具有预测能力和自适应特征的智能化系统，广泛拓展了时空信息研究的尺度（Li等，2017）。这一“三步曲”体现了人类从精确测量到智慧应用的跨越式发展。



图1 地学技术与社会发展的演进

Fig. 1 Evolution of geoscience technology and social development

针对时空智能学这一新兴学科，本文将系统阐明其核心概念、与其他学科的关系及其目标与范围，并通过分析时空智能学在各领域的典型应用展示时空智能的最新发展动态，进一步深入探讨其在推动自然与人类社会可持续发展方面的潜在价值与广阔应用前景。

2 时空智能学

2.1 时空智能学的定义

时空智能学 STI (Spatio-Temporal Intelligence) 利用通导遥智能传感器、云计算和人工智能方法对自然活动和人类活动进行感知、认知，是当代和未来的测绘遥感地理信息学，是人工智能的

重要组成部分，能自动回答何时 (When)、何地 (Where)、何种目标 (What Object)、有何种变化 (What Change) 及其机理 (Why) -5W，以实现强军、富国、利民，推进人和自然的协同可持续发展；同时，时空智能学又是服务科学的重要组成部分，目标实现在规定的时间 (Right Time) 和需要的地点 (Right Place) 将正确的数据信息和知识 (Right Data/Information/Knowledge) 传达给正确的人 (Right Person) -4R。

时空智能学不仅突破了传统测绘和地理信息技术的局限，还融合了测绘、遥感、地图制图与人工智能、大数据分析等多学科优势，形成了自然科学、社会科学、工程科学、医学科学与信息科学深度交叉的综合学科框架。

2.2 时空智能学的目标与范围

时空智能学将传统地球科学技术的应用拓展至时空技术的多个维度，包括建模、分析、识别、预测、评估、预警与可视化（Pan等，2017；Yang等，2024；Wu等，2017；Li等，2023），以应对现代社会日益复杂的需求。例如，时空智能学不仅在传统的气候监测（Han等，2018）、自然资源管理（Gao等，2020）和城市管理（Zhao等，2020）中表现出超越性的技术优势，还通过整合陆地、空中、水下甚至深空环境（Zhang等，2022）中的多模态传感器数据，实现高频次的多维观测，使得人类能够以前所未有的深度与清晰度揭示复杂时空模式及其演化过程（Li等，2024）。此外，时空智能学的应用领域不仅限于环境科学，还广泛覆盖社会经济、公共卫生和城市系统等多个方面。通过时空数据分析，时空智能学能够揭示社会发展的深层动态，为增强经济韧性、优化公共卫生策略以及提升生活质量提供重要支持。时空智能学的核心理念在于开发高效处理时空信息并实时适应动态情境的智能系统（Saad等，2024）。这些系统能够在复杂且快速变化的环境中进行实时感知、分析并提出解决方案，显著提升了决策效率和精准度。作为一个综合性框架，时空智能学不仅在解析自然与人类系统中的时空现象方面具有独特优势，还展现出应对新兴挑战的卓越能力（Han等，2023），支撑实现强军、富国、利民，助推新质生产力的发展，推进人与自然协同可持续发展下新质生产力的发展。

3 时空智能学应用

时空智能的技术已经被广泛应用于人类生活的各个方面。本文将通过介绍时空智能学在4个核心领域（空天、空地、空海和深空）及两个扩展领域（社会经济和智慧医疗）的典型应用，展示其作为时空信息新质生产力在支撑时空智能决策、解决复杂现实问题中的巨大潜力。

3.1 空天时空智能

空天时空智能是指依托航天飞行器、空基平台以及星座集群网络的多层次、多维度的信息感知与处理体系，通过融合定位、导航、授时、遥感和通信等功能，利用人工智能和大数据技术（Luo等，2022；Jan等，2021），构建一个全球全时空覆盖、高效协同、实时响应的智能化时空服务网络，支持环境监测、防灾减灾、资源管理、城市规划和国家安全等多领域的应用（Hong等，2021；Casagli等，2023；Irrgang等，2021）。下面以“东方慧眼”智能遥感星座技术应用为例介绍

当前空天时空智能的技术发展与应用。

“东方慧眼”智能遥感星座计划到2030年将建成由252颗卫星构成的全球服务系统，包括144颗高分辨率光学智能遥感卫星，4颗5 m分辨率专业高光谱卫星、4颗专业红外卫星以及100颗高分辨率SAR卫星（图2（a））。其中，144颗高光谱卫星的空间分辨率为0.3—0.5 m，4颗专业高光谱卫星两两分组，分别在上午10:30和下午1:30通过赤道面，针对陆地和海洋观测的需求进行了不同适应。通过以上灵活的观测布局，5天即可覆盖全球，体现了观测体系的高效性。此外，4颗专业热红外卫星具备更高的时效性，每天可对地球进行4次全面扫描，该技术实现对森林火灾等突发事件的快速响应和及时监测，进一步满足了实时观测的要求。结合已经在珞珈三号01星上验证的智能在轨处理技术（Wang等，2024），构建空天信息全球实时智能监测网，把天上的大数据经过人工智能处理，变成小数据送到用户的终端上，实现对目标的看的快、看得清、看的准、看的全、看得懂和送到位（B2C）。

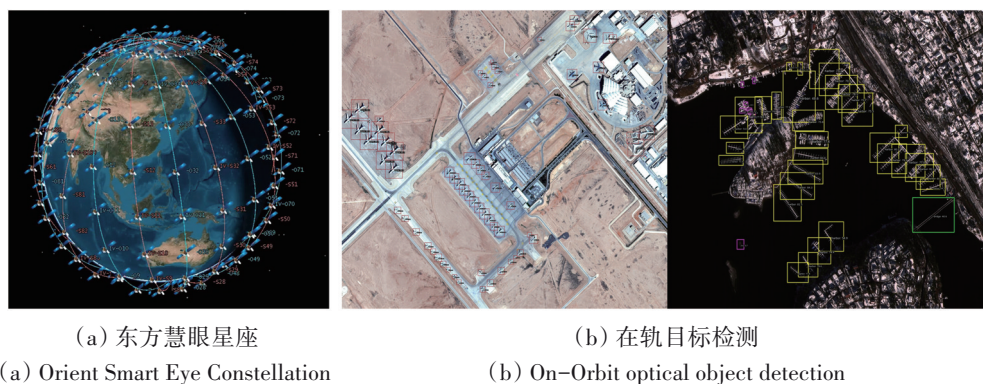


图2 “东方慧眼”星座及其在轨智能分析结果

Fig. 2 Oriental Smart Eye and Its On-Orbit Intelligent Analysis Results

如上所述的智能空天信息服务系统可为地球多维动态监测提供强有力的支撑。在实际应用中，“东方慧眼”已在智慧农业和防洪减灾领域取得了重要突破。通过在星上提取动态目标（飞机、舰船等）的实时信息，可实现对机场、港口等区域的动态信息的实时获取（如图2（b）所示）。同时，在河南、湖北等地区，“东方慧眼”依托高分辨率遥感技术实现了水稻和小麦种植的智能化管理，通过实时监测农作物的生长状况、病虫害分布及需肥情况，提供精准的农业生产指导，可极大提升农业效率。这两个领域的成功典型应用体现了

基于“东方慧眼”智能遥感星座的在空天智能方面的广泛适用性与高效性，其高效观测能力和智能化分析为更多领域带来了深远影响，标志着中国遥感技术向多功能化和智能化迈出了重要一步。

3.2 空地时空智能

空地时空智能是在空天时空智能支持下由无人机、地面机器人等组成的单个或集群智能系统，利用各种智能传感器，在人工智能、大数据驱动下，实现厘米级分辨率对地表、树林上下、室内外、水面等自然环境、地物变化、人类活动等的全面时

空感知和认知。尽管单个空地系统已经可以发挥重要作用，但构成空地协同群系统是智能化发展的必然趋势。空地时空智能典型的状态是模拟自然界蜂群（Li等，2023）、蚁群（Qizilbash等，2020）、鸟群（Paranjape等，2018）等行为，利用群智能将多种空地平台进行集群组网形成自主协同系统，实现自主定位导航、全域动态感知、组网分工协作、智能认知决策等（Zhu等，2024；Cleland-Huang等，2024），具有规模优势、成本优势、自主优势、决策优势等多方面核心优势。空地时空智能应用极其广泛，涵盖了国家安全、自然资源调查、灾害应急、公共安全、自动驾驶、交通监控、野生动物调查、生态环境监测等数十个领域。本文以“天空地”一体化林草感知检测系统为例进行介绍。

“天空地”一体化林草感知检测系统采用天空地一体化技术，开展国家公园生态保护感知监测体系的建设工作。天空地一体化生态保护感知监测体系，从天基（卫星）、空基（有/无人机）和地基（地面监测设备）等3个层次，实现对国家公园全方位、全天候、全时相的监测。通过时空大数据的获取、汇聚与管理建立数字孪生森林公园，满足森林、草原、冰川、水源、湿地、自然遗迹和旗舰动植物等的保护需要。天基监测是通过高通量通信卫星、遥感卫星、北斗定位卫星等构建

专用“通导遥”卫星物联网，实现大范围的国家公园监测。空基监测通过有/无人机等飞行平台，搭载各类感知设备，采集国家公园近地、高分辨率影像数据，来日常监测林草资源变化、动物种群的数量和结构等（图3）。地基监测则是通过集装箱式监测站、多功能移动方舱、便携式监测设备等实现对地面重点监测目标的连续动态监测。天基、空基和地基系统构建了一张“天空地”智能监测网络，前端监控系统采集的数据通过高通量卫星、700 M、4 G/5 G等网络实时传输至“保护站—县市—省级—国家林草局”四级信息系统。“四级信息系统”通过数字孪生时空大数据平台整合这些数据，平台支持森林资源、野生动物以及其他生态要素的数据融合、处理、建模、人工智能分析和变化监测。这一技术体系已在中国多地成功应用。在三江源国家公园格拉丹东地区，首次实现了通过中国高通量卫星将珍稀物种、冰川及无人区高清图像的实时传输至国家林草局指挥中心；在西藏那曲市，该系统用于野生动物种群、冰川水源及生态环境变化的实时监控；在江苏盐城，则应用于候鸟迁徙的动态监测。将伪装成树木、石头的移动机器人跟随野外动物和飞鸟多角度摄像，组合成VR/AR实景三维动态图像供游客欣赏和专家分析。



图3 “天空地”一体化智能检测平台界面

Fig. 3 Spaceborne-airborne-terrestrial integrated intelligent detection platform interface

未来，随着深度学习、大数据和5 G/6 G通信等技术的协同发展，空地时空智能将构建一个更高效、更动态的智能网络生态系统。这将帮助社会更加明智、灵活地应对复杂的挑战，推动人类社会和生态环境的可持续发展。

3.3 空海时空智能

空海时空智能技术旨在弥补航天遥感和航空

遥感在水下探测中的局限性。这些传统遥感技术在水下探测方面深度受限，仅能观测到数十米以内的水体，且其观测精度和覆盖范围有限。同时，尽管传统的水下声学传感技术在深水作业和大范围探测中相对成熟，但其在近海作业、海床测绘以及浅水区域的应用表现仍存在不足。新兴的空海时空智能技术融合了水下光学成像（如主动激

光和被动光学摄影)与声学传感等多模态探测方法。通过针对不同应用场景研发专用传感器,并优化探测算法和系统架构,这些技术显著提升了水下近距离高精度测量能力,为高分辨率海底地形测绘、水下珊瑚礁生态系统监测等提供了强有力的技术支持。此外,空海时空智能在水下无人系统中具有重要应用价值。通过整合空间信息与时间数据,并结合实时和历史水下环境的多源数据分析,该技术能够显著提升水下无人系统的环境感知能力,从而支持更全面、精准的路径规划和决策制定。本文以水下珊瑚礁栖息地环境的三维建模为研究案例,展示了空海时空智能技术在水下环境探测和动态变化分析中的重要作用,突出其在提升水下探测精度与效率、支持生态监测与保护等领域的潜在价值。

以水下光学成像与遥感技术为例,通过获取多视角图像并结合先进的摄影测量和计算机视觉算法,以及最新的神经网络图像理解技术,可以

实现高效的水下三维重建(Zhong等, 2024, 2023)。这些技术有效地克服了水中光散射和吸收造成的干扰,显著提升了三维模型的清晰度和精度,从而为水下遥感数据的解析提供了可靠保障。在此基础上,结合时空建模技术,可以进一步对不同时间点的地形变化进行动态分析,生成高分辨率的动态三维模型,从而揭示如海床侵蚀和沉积等关键地貌过程的时空分布特征。图4展示了连续3年水下光学遥感观测生成的珊瑚礁栖息地数据,包括纹理模型、语义分割结果以及同一地点的三维重建模型剖面的可视化对比。这些数据采集自法属波利尼西亚莫雷阿岛沿岸的固定观测点,垂直高度的变化清晰反映了珊瑚礁区域地形随生长与破坏的时间演变过程。由此可见,基于STI技术生成的高分辨率水下三维地形图及其跨时间域的动态可视化成果,不仅为珊瑚礁生态的长期监测提供了关键支持,也具有广泛的应用潜力,为海洋环境保护和生态管理提供了科学依据。

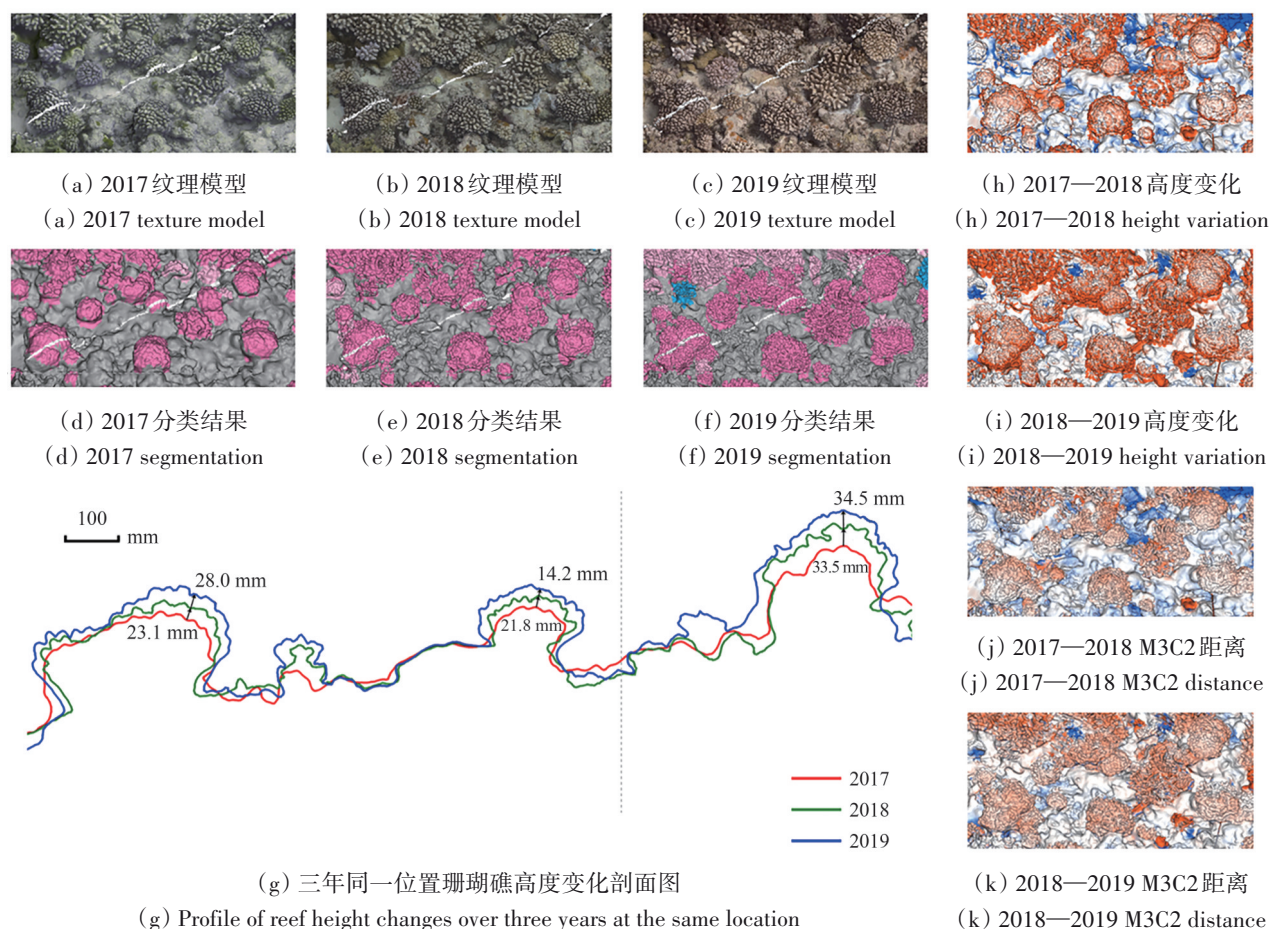


图4 水下珊瑚礁栖息地环境的三维时空变化检测

Fig. 4 3D spatio-temporal monitoring of underwater coral reef habitats

综上所述,空海时空智能通过高分辨率水下地形三维建模、精细化珊瑚礁生态系统评估以及高自主性水下导航等技术,显著提升了海洋生态保护、资源开发及科学研究的效率与精准度。具体来说,在生态保护方面,该技术能够用于珊瑚礁、海草等水下生态系统的健康监测、生物栖息地评估以及污染溯源,为制定科学的生态保护与修复策略提供有力的数据支持和理论依据。在资源开发领域,空海时空智能是开展海底矿产与能源勘探、渔业资源精细化管理等可持续发展实践的重要工具。此外,在科学研究层面,该技术将助力人类深入探索海洋地质化学过程、深海生态系统及气候变化对海洋的影响,为水下科学研究提供精准的数据资源和技术保障,从而推动海洋科学的进一步发展。

3.4 深空时空智能

深空时空智能是时空智能学从地球观测向深空探测领域的延伸,是深空探测中的重要技术手段。以月球和火星探测任务为代表的深空探测任务是庞大的系统工程,涉及众多的领域和学科。在这些重大工程任务中,行星摄影测量与遥感技术及时提供时空信息智能服务,为确保任务的圆满成功发挥了至关重要的作用。由于深空探测定轨姿态低、缺少控制点、不具备全球导航卫星系统(GNSS)设施、表面环境荒芜、数据采集和传输受限等不利条件,与地球摄影测量与遥感相比,行星摄影测量与遥感面临着独特困难和挑战。相关研究团队研究开发了一系列关键技术以解决这些困难,成功实现了中国的嫦娥四号、嫦娥五号、嫦娥六号月球探测任务以及中国首个自主火星探测任务“天问一号”。本文以嫦娥四号为主,展示中国近期的月球探测任务中的深空时空智能的应用。

月球探测任务嫦娥四号于2018年12月8日发射,2019年1月3日在月球背面冯·卡门撞击坑内着陆,实现了人类探测器首次在月球背面软着陆(Wu等,2019; Di等,2019)。截止到2023年1月3日(着陆4周年),玉兔二号月球车行驶了1455 m,获取了月球表面大量的高分辨率图像和光谱数据。摄影测量与遥感技术为月球车的运行提供了多方面的支持,包括地形感知、障碍检测、路径规划和导航定位等(Di等,2020; Liu等,2020; Wang等,2020; Yu等,2019),同时也支持了对着陆点

的地形地貌和月表矿物的科学研究。通过100幅LROC NAC图像生成了一张0.9 m/像素的数字正射影像图(DOM),覆盖了52 km×30 km的区域(Liu等,2019),在通过图像特征匹配进行着陆器定位时作为底图发挥了重要作用。月球车在月面运行期间,月球车的定位是通过相邻站点间Navcam立体图像匹配和光束法平差定位完成的,同时也生成了厘米级分辨率的数字高程模型(DEM)以支持地形分析(Liu等,2015; Wan等,2014),这些定位制图成果直接支持了路径规划、目标选择以及巡视探测区域的科学研究。图5展示了截至2022年3月9日玉兔二号月球车的行驶路线图。在此之后,嫦娥五号任务于2020年完成中国首个无人月球采样返回,通过精确定位和高分辨率影像智能分析,为样品的科学研究和地质年代学提供了重要数据。嫦娥六号任务于2024年从月球背面南极-艾特肯盆地采样返回,通过自动化定位与深度学习技术生成的高分辨率数据,支持了着陆点及样品来源的精细分析。

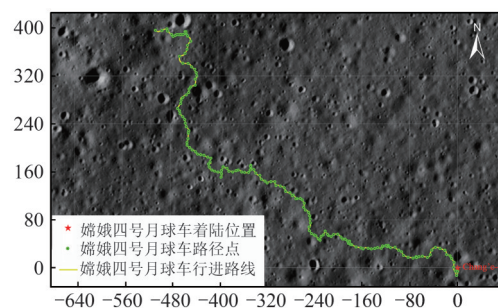


图5 截至2022年3月9日的嫦娥四号月球车(玉兔二号)的行驶路线图(单位:m)

Fig. 5 Driving route of the Chang'e-4 rover (Yutu-2) as of March 9, 2022 (Unit: m)

行星摄影测量与遥感技术赋能的时空智能,为月球和火星探测任务提供了关键技术和信息产品支撑。未来,摄影测量、遥感和人工智能的更深层次融合将是发展更先进的自主和智能方法的关键,这些进展对于应对深空探测中的独特挑战、提升探测能力和效率,以及助力更多的科学发现将具有至关重要的作用。

3.5 社会经济时空智能

社会经济时空智能通过结合时空大数据和人工智能技术来研究和预测各种社会经济活动的时空模式及其影响。其核心在于揭示社会经济行为

的时空依赖性,即这些行为如何随时间和空间变化而演变。借助遥感数据、社交媒体数据、地理数据以及统计数据等多源信息,结合人工智能技术,不仅有效提升了时空模式识别和预测的精度,还为社会经济行为的动态监测与决策提供了更为智能和高效的工具。本文以加沙地带的战争损毁评估展示时空智能分析对社会经济的影响。

2023年10月7日,加沙地带爆发武装冲突,引发了该地区50年来最严重的军事升级。这场冲突的影响层面广泛而深远,不仅对当地居民的生活造成了巨大影响,而且对建筑物和基础设施造成了灾难性的破坏。为了评估战争对加沙地带的影响,Holail等(2024)利用珞珈三号01星和“东方慧眼”高分01星卫星影像,基于遥感技术进行

高精度时间序列变化检测,对城市战损情况进行了动态监测分析和评估。该方法能够近乎实时地检测巴以冲突期间加沙地带的导弹弹坑(位置、大小、数量等)和受损建筑物(位置、建筑类型、日期和损坏严重程度等)。它还对加沙地带5个省份的建筑物损毁情况进行了高精度的动态监测(如图6所示),揭示了5个省份建筑物损毁情况的趋势。这项研究系统地揭示了从2023年10月17日至2024年3月2日加沙地带战争损害持续升级的情况,为对城市战争损害进行多维度综合定量评估提供了一种高效、经济、智能、可扩展的方法,实现了基于遥感对冲突地区客观公正的动态监测,对于理解战争对加沙地带的影响、评估人道主义需求以及制定救援和重建策略具有重要意义。

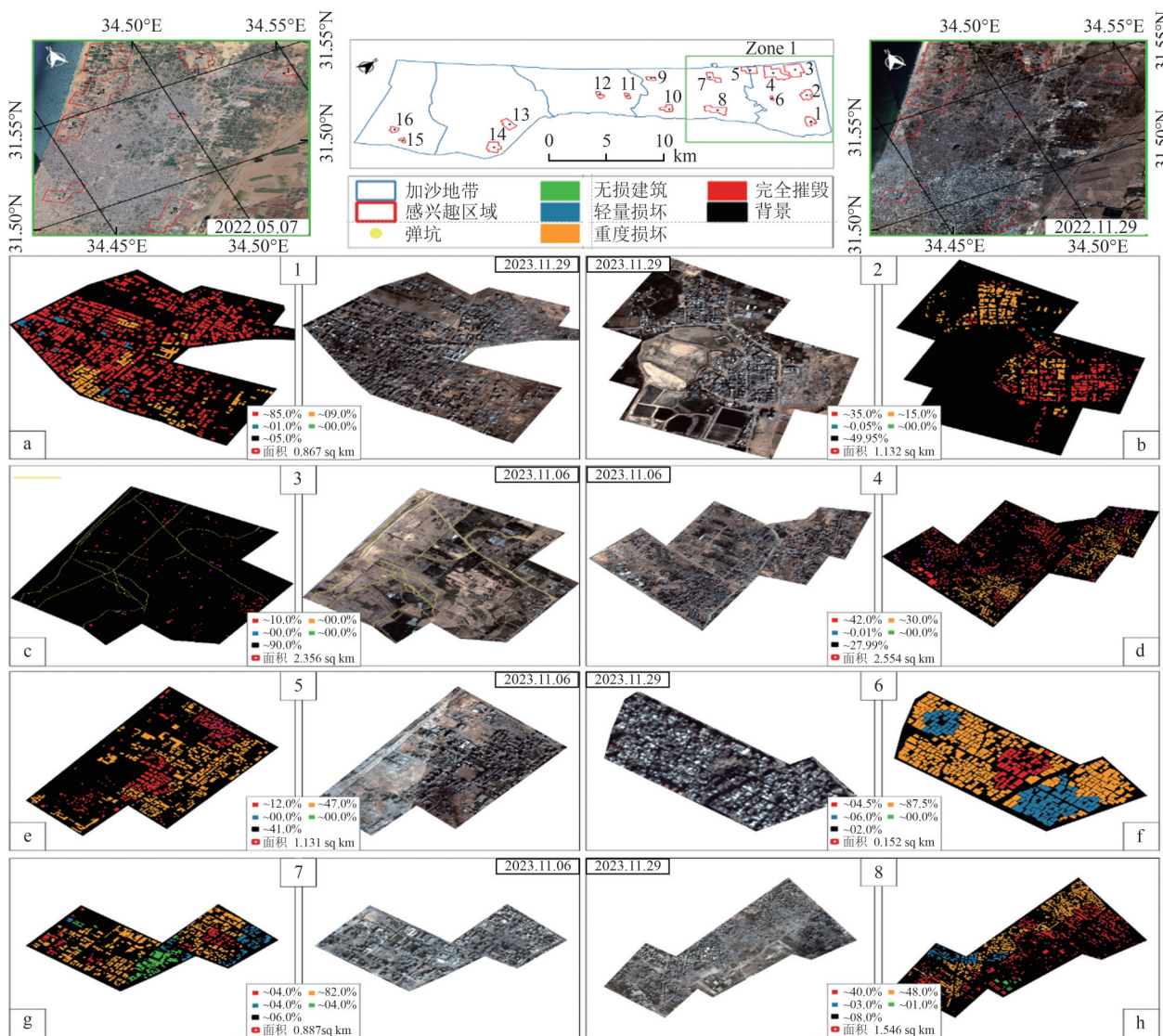


图6 加沙地带的建筑物损毁情况评估结果(Holail, 2024)

Fig. 6 Assessment results of building damage in the Gaza Strip

时空智能学在社会经济领域具有重要潜力，其核心价值在于通过时空数据的整合、分析与数据挖掘，提升决策效率和资源配置的科学性。具体而言，时空智能能够优化城市规划与管理，如交通流量预测和应急调度，提升公共服务效率；并在灾害预警与风险管理中提供关键支持，降低社会经济损失。通过时空智能的赋能，不同行业能够更好地实现智能化、精准化发展，促进社会经济的全面进步。以夜光遥感为例，通过对夜光遥感数据挖掘，可以研究城镇比、GDP空间分布、人口分布等社会经济要素。经济增长、城市自然灾害和人道主义灾难均可通过夜光时空变化得以量化研究。武汉大学为联合国相关机构提供服务已超过十年。

3.6 智慧医疗时空智能

卫星遥感技术通过科学方法分析地球表面特征，而医学成像技术则利用类似原理诊断人体器官及体表特征，两者在技术原理和应用上存在深刻关联。将遥感技术与先进计算机信息系统结合，可以突破人眼视觉分辨率的限制，实现类似“X射线视觉”和“望远镜视觉”的能力。在此基础上，医学时空智能进一步整合遥感智能解译技术与医学影像分析，尤其在医疗机器人领域展现了巨大潜力。例如，医疗机器人通过结合基于遥感的三维定位与动态建模技术，不仅能够精确导航复杂

的体内环境，还可实现高精度的病灶识别与靶向干预，大幅提升诊断和手术的效率与安全性。本文以体内微空间三维建模与病灶识别技术为例展示时空智能学如何赋能智慧医疗。

体内微空间三维建模与病灶识别技术是实现精准医疗目标的关键所在。然而，由于人体的动态特性，实现这一目标的过程面临以下挑战：一方面，人体内部结构会随着呼吸和运动等生理活动而发生形变，这种形变会导致内部坐标系统的变化。因此需要开发一种能够适应这些变化的可变形微空间坐标系统，实时捕捉和响应人体内部结构的变化，以确保三维模型的准确性和可靠性。另一方面，传统的多视三维重建方法依赖静态或刚性运动假设，适用于场景具有几何结构不变性的刚性场景。而人体消化道的蠕动会导致肠壁的变形，这种没有几何结构不变性的场景称为消化道的非刚性场景，传统的多视三维重建方法不适合对动态变化器官进行三维建模。针对这些挑战和需求，Xu等（2024）提出了一种结合医学专业知识与先进医学图像解译技术的新方法（如图7所示），通过探索新的非刚性三维子图构建与拼接方法实现体内微空间三维模型，再通过多模态医学影像的智能解译与人机交互的医学诊断方案，结合医学专家的知识经验，有效提高了病灶的精确识别与定位。

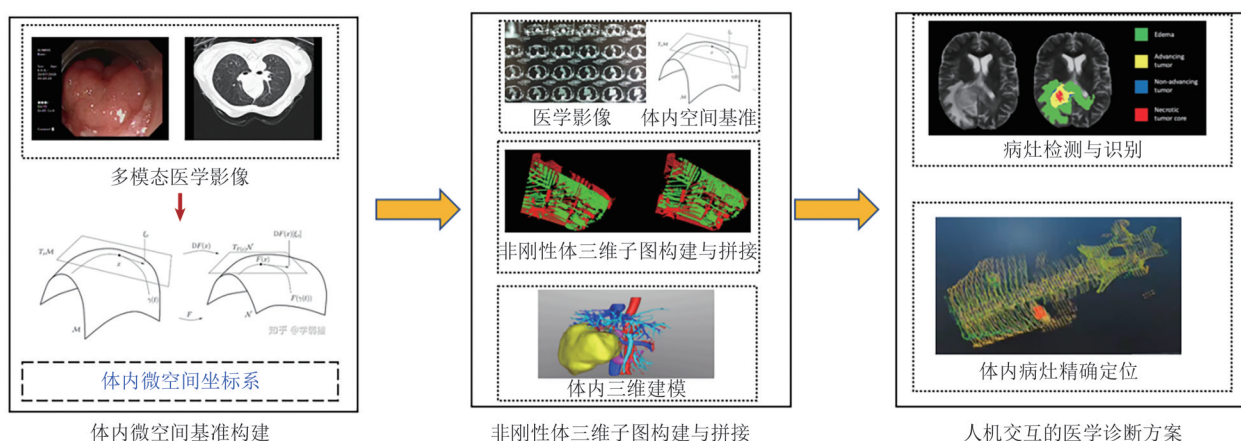


图7 体内微空间三维建模与病灶识别流程图

Fig. 7 Workflow of in vivo microspace 3D modeling and lesion identification

医学时空智能基于医学地理信息系统（GIS）的支持，在流行病学和流行病预防方面的应用前景广阔。该领域关注理论、方法和应用的突破，包括开发数字孪生智能医院、利用时空大数据和

GIS研究流行病学机制、分析环境遥感和健康GIS数据集、通过基于位置的大数据支持流行病防控，以及开发基于GIS的疾病信息服务和决策工具。这些进步凸显了医学时空智能在公共卫生领域的变

革潜力，为应对流行病学和医疗管理方面的紧迫挑战提供了新方法。

4 结 语

时空智能学是对传统测绘、卫星导航、遥感、地图制图与地理信息科学的创新与拓展，其核心任务是回答“何时（When）、何地（Where）、何物（What Object）、何种变化（What Change）及其原因（Why）”等问题，以满足智能时代日益增长的需求。作为一项开创性的科学与技术体系，STI整合了智能传感器、云计算和人工智能等先进技术，对自然环境和人类活动进行全面的感知、分析与解读，从而为复杂决策提供精准支持。本文总结了六个跨领域的典型案例，涵盖航空航天、深空与水下探测、社会经济、智能医疗等多个领域。这些案例展现了STI在促进自然环境保护、社会系统可持续发展中的关键作用，并为实现联合国提出的17项可持续发展目标（SDG）提供了强有力的技术支持。STI不仅突破了传统地理空间技术的局限，还融合了测绘、遥感、地图制图与人工智能的多学科优势，形成了自然科学、工程科学与信息科学深度交叉的综合学科框架。展望未来，STI将在多个万亿级产业中扮演重要角色，尤其是在航空、海洋、导航与通信等关键领域的技术整合中，其将成为驱动智能时代发展的核心工具。凭借这种跨学科的整合能力，STI将助力提升人类健康水平、推动经济与社会的全面进步，并促进人与自然的和谐共存。通过提供创新性解决方案，STI将为应对全球性挑战注入强大动力，为可持续发展的未来奠定坚实基础。

抓住时机、大力建设时空智能学理论、技术体系，推动它在多学科中的应用，是我们义不容辞的责任和使命！

参考文献 (References)

Burke M, Driscoll A, Lobell D B and Ermon S. 2021. Using satellite imagery to understand and promote sustainable development. *Science*, 371(6535): eabe8628 [DOI: 10.1126/science.abe8628]

Casagli N, Intrieri E, Tofani V, Gigli G and Raspini F. 2023. Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1): 51-64 [DOI: 10.1038/s43017-022-00373-x]

Cleland-Huang J, Chambers T, Zudaire S, Chowdhury M T, Agrawal A and Vierhauser M. 2024. Human-machine Teaming with Small

Unmanned Aerial Systems in a MAPE-K Environment. *ACM Trans. Auton. Adapt. Syst.*, 19(1): 3:1-3:35 [DOI: 10.1145/3618001]

Di K, Liu S, Liu B, Wan W, Peng M, Wang Y, Gou S, Yue Z, Xin X, Jia M and Niu S. 2019. Chang'e-4 lander localization based on multi-source data. *National Remote Sensing Bulletin*, 23(1): 181-184 [DOI: 10.11834/jrs.20199015]

Di K, Liu Z, Wan W, Peng M, Liu B, Wang Y, Gou S and Yue Z. 2020. Geospatial technologies for Chang'e-3 and Chang'e-4 lunar rover missions. *Geo-spatial Information Science*, 23(1): 87-97 [DOI: 10.1080/10095020.2020.1718002]

Gao L, Wang X, Johnson B A, Tian Q, Wang Y, Verrelst J, Mu X and Gu X. 2020. Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159: 364-377 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.11.018]

Han W, Feng R, Wang L and Cheng Y. 2018. A semi-supervised generative framework with deep learning features for high-resolution remote sensing image scene classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 145: 23-43 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.11.004]

Han W, Zhang X, Wang Y, Wang L, Huang X, Li J, Wang S, Chen W, Li X, Feng R, Fan R, Zhang X and Wang Y. 2023. A survey of machine learning and deep learning in remote sensing of geological environment: Challenges, advances, and opportunities. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 202: 87-113 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.05.032]

Himeur Y, Rimal B, Tiwary A and Amira A. 2022. Using artificial intelligence and data fusion for environmental monitoring: A review and future perspectives. *Information Fusion*, 86-87: 44-75 [DOI: 10.1016/j.inffus.2022.06.003]

Holail S, Saleh T, Xiao X, Xiao J, Xia G S, Shao Z, Wang M, Gong J and Li D. 2024. Time-series satellite remote sensing reveals gradually increasing war damage in the Gaza Strip. *National Science Review*, 11(9): nwae304 [DOI: 10.1093/nsr/nwae304]

Hong D, He W, Yokoya N, Yao J, Gao L, Zhang L, Chanussot J and Zhu X. 2021. Interpretable Hyperspectral Artificial Intelligence: When nonconvex modeling meets hyperspectral remote sensing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 9(2): 52-87 [DOI: 10.1109/MGRS.2021.3064051]

Irrgang C, Boers N, Sonnewald M, Barnes E A, Kadow C, Staneva J and Saynisch-Wagner J. 2021. Towards neural Earth system modelling by integrating artificial intelligence in Earth system science. *Nature Machine Intelligence*, 3(8): 667-674 [DOI: 10.1038/s42256-021-00374-3]

Jan M A, Zakarya M, Khan M, Mastorakis S, Menon V G, Balasubramanian V and Rehman A U. 2021. An AI-enabled lightweight data fusion and load optimization approach for Internet of Things. *Future Generation Computer Systems*, 122: 40-51 [DOI: 10.1016/j.future.2021.03.020]

Li D, Shen X, Li D and Li S. 2017. On Civil-Military Integrated Space-Based Real-Time Information Service System. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(11): 1501-1505 [DOI: 10.13203/j.whugis.20170227]

- Li D, Wang M, Guo H and Jin W. 2024. On China's earth observation system: mission, vision and application. *Geo-spatial Information Science*, 0(0): 1-19 [DOI: 10.1080/10095020.2024.2328100]
- Li Y, Gao Y, Yang S and Quan Q. 2023. Swarm Robotics Search and Rescue: A Bee-Inspired Swarm Cooperation Approach without Information Exchange//2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 1127-1133[2025-01-02] <https://ieeexplore.ieee.org/document/10161039>. [DOI: 10.1109/ICRA48891.2023.10161039]
- Li Z, Chen X, Qi J, Xu C, An J and Chen J. 2023. Accuracy assessment of land cover products in China from 2000 to 2020. *Scientific Reports*, 13(1): 12936 [DOI: 10.1038/s41598-023-39963-0]
- Liu B, Niu S, Xin X, Jia M, Di K, Liu Z, Peng M and Yue Z. 2019. High precision DTM and DOM generating using multi-source orbital data on Chang'E-4 landing site. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W13: 1413-1417 [DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1413-2019]
- Liu Z, Di K, Li J, Xie J, Cui X, Xi L, Wan W, Peng M, Liu B, Wang Y, Gou S, Yue Z, Yu T, Li L, Wang J, Liu C, Xin X, Jia M, Bo Z, Liu J, Wang R, Niu S, Zhang K, You Y, Liu B and Liu J. 2020. Landing site topographic mapping and rover localization for Chang'e-4 mission. *Science China Information Sciences*, 63(4): 140901 [DOI: 10.1007/s11432-019-2796-1]
- Liu Z, Di K, Peng M, Wan W, Liu B, Li L, Yu T, Wang B, Zhou J and Chen H. 2015. High precision landing site mapping and rover localization for Chang'e-3 mission. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 58(1): 1-11 [DOI: 10.1007/s11433-014-5612-0]
- Luo C, Feng S, Yang X, Ye Y, Li X, Zhang B, Chen Z and Quan Y. 2022. LWCDnet: A Lightweight Network for Efficient Cloud Detection in Remote Sensing Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 1-16 [DOI: 10.1109/TGRS.2022.3173661]
- Pan Z, Hu Y and Cao B. 2017. Construction of smooth daily remote sensing time series data: a higher spatiotemporal resolution perspective. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2(1): 25 [DOI: 10.1186/s40965-017-0038-z]
- Paranjape A A, Chung S J, Kim K and Shim D H. 2018. Robotic Herding of a Flock of Birds Using an Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Transactions on Robotics*, 34(4): 901-915 [DOI: 10.1109/TRO.2018.2853610]
- Qizilbash A A H, Henkel C and Mostaghim S. 2020. Ant Colony Optimization based Multi-Robot Planner for Combined Task Allocation and Path Finding//2020 17th International Conference on Ubiquitous Robots (UR). 487-493[2025-01-02] <https://ieeexplore.ieee.org/document/9144944>. [DOI: 10.1109/UR49135.2020.9144944]
- Saad F, Burnim J, Carroll C, Patton B, Köster U, Saurous R A and Hoffman M. 2024. Scalable Spatiotemporal Prediction with Bayesian Neural Fields. *Nature Communications*, 15(1): 7942 [DOI: 10.1038/s41467-024-51477-5]
- Shi K, Wu Y, Liu S, Chen Z, Huang C and Cui Y. 2023. Mapping and evaluating global urban entities (2000—2020): A novel perspective to delineate urban entities based on consistent nighttime light data. *GIScience & Remote Sensing*, 60(1): 2161199 [DOI: 10.1080/15481603.2022.2161199]
- Sui H, Liu C, Liu J, Zheng X, Li H, Yu S and Li Q. 2020. Reflection and exploration of rapid remote sensing emergency response for typical natural disasters. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 45(8): 1137-1145
- Tyson N deGrasse, Liu C and Irion R. 2000. *One Universe: At Home in the Cosmos*. Washington, D.C
- Wan W, Liu Z, Di K, Wang B and Zhou J. 2014. A Cross-Site Visual Localization Method for Yutu Rover. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-4: 279-284 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-4-279-2014]
- Wang J, Li J, Wang S, Yu T, Rong Z, He X, You Y, Zou Q, Wan W, Wang Y, Gou S, Liu B, Peng M, Di K, Liu Z, Jia M, Xin X, Chen Y, Cheng X, Feng X, Liu C, Han S and Liu X. 2020. COMPUTER VISION IN THE TELEOPERATION OF THE YUTU-2 ROVER. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-3-2020: 595-602 [DOI: 10.5194/isprs-annals-V-3-2020-595-2020]
- Wang M, Guo B, Pi Y, Zhang Z, Xiao J and Dai R. 2024. On-orbit processing technology and verification of Luojia-3 01 satellite. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 53(4): 599 [DOI: 10.11947/j. AGCS.2024.20230357]
- Wu S, Yan Y, Du Z, Zhang F and Liu R. 2017. Spatiotemporal Visualization Of Time-Series Satellite-Derived Co2 Flux Data Using Volume Rendering And Gpu-Based Interpolation On A Cloud-Driven Digital Earth. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-4-W2: 77-85 [DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-4-W2-77-2017]
- Wu W, Li C, Zuo W, Zhang H, Liu J, Wen W, Su Y, Ren X, Yan J, Yu D, Dong G, Wang C, Sun Z, Liu E, Yang J and Ouyang Z. 2019. Lunar farside to be explored by Chang'e-4. *Nature Geoscience*, 12(4): 222-223 [DOI: 10.1038/s41561-019-0341-7]
- Xu Y, Zhang P, Wang L, Li Y, Luo B, Yu Y and Chen R. 2024. Performance evaluation and future prospects of capsule robot localization technology. *Geo-spatial Information Science*, 0(0): 1-31 [DOI: 10.1080/10095020.2024.2354239]
- Yang J, Chen G, Huang J, Ma D, Liu J and Zhu H. 2024. GLE-net: global-local information enhancement for semantic segmentation of remote sensing images. *Scientific Reports*, 14(1): 25282 [DOI: 10.1038/s41598-024-76622-4]
- Yu T, Fei J, Li L and Cheng X. 2019. Study on Path Planning Method of Lunar Rover. *Journal of Deep Space Exploration*, 6(4): 384-390 [DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2019.04.011]
- Zhang X, Jiang Y, Wang L, Han W, Feng R, Fan R and Wang S. 2022. Complex Mountain Road Extraction in High-Resolution Remote Sensing Images via a Light Roadformer and a New Benchmark. *Remote Sensing*, 14(19): 4729 [DOI: 10.3390/rs14194729]
- Zhao J, Zhong Y, Hu X, Wei L and Zhang L. 2020. A robust spectral-spatial approach to identifying heterogeneous crops using remote sensing imagery with high spectral and spatial resolutions. *Remote Sensing of Environment*, 239: 111605 [DOI: 10.1016/j.rse.

- 2019.111605]
- Zhong J, Li M, Chen Y, Wei Z, Yang F and Shen H. 2023. A Safer Vision-based Autonomous Planning System for Quadrotor UAVs with Dynamic Obstacle Trajectory Prediction and Its Application with LLMs. arXiv[2025-01-02] <http://arxiv.org/abs/2311.12893>. [DOI: 10.48550/arXiv.2311.12893]
- Zhong J, Li M, Gruen A, Gong J, Li D, Li M and Qin J. 2024. Application of Photogrammetric Computer Vision and Deep Learning in High-Resolution Underwater Mapping: A Case Study of Shallow-Water Coral Reefs. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, X-2-2024: 247-254 [DOI: 10.5194/isprs-annals-X-2-2024-247-2024]
- Zhu W, Oğuz S, Heinrich M K, Allwright M, Wahby M, Christensen A L, Garone E and Dorigo M. 2024. Self-organizing nervous systems for robot swarms. Science Robotics, 9(96): ead15161 [DOI: 10.1126/scirobotics.adl5161]

On ubiquitous spatio-temporal intelligence

LI Deren¹, WANG Mi^{1,2}, XIAO Jing³, LI Ming^{1,4,5}, DI Kaichang⁶, LI Xi¹, LUO Bin¹

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hubei LuoJia Laboratory, Wuhan 430079, China;

3. School of Artificial Intelligence, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

4. Institute for Theoretical Physics, ETH Zurich, Zurich 8039, Switzerland;

5. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Zurich 8039, Switzerland;

6. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: The world is material, matter is in motion, and the characteristics of time and space dimensions together reveal the essence of a dynamic material world. With the rapid advancement of artificial intelligence and data acquisition technologies, the intelligent modeling and analysis of large-scale spatiotemporal data have become feasible. This progress drives deeper technological breakthroughs and scientific innovations, giving rise to a new interdisciplinary field: Spatio-Temporal Intelligence (STI). As a multidisciplinary domain, STI integrates spatiotemporal data with intelligent computational methods, opening new avenues for applications across aerospace, terrestrial, maritime, deep space, socio-economic systems, and smart healthcare. It promotes end-to-end intelligence from data collection and analysis to decision-making, thereby enhancing decision-making efficiency and resource management in critical areas. This paper first reviews the historical evolution of geoscience research, tracing its progression from geodesy, which centers on mapping and cartography, to geographic information science, emphasizing spatial information services, and finally to the emerging field of spatio-temporal intelligence. This journey highlights humanity's continuous advancements in mapping, measuring, and understanding the physical world. With the widespread adoption of artificial intelligence, we are transitioning from static spatial data analysis to intelligent processing and real-time decision-making with dynamic spatiotemporal data. This shift reflects profound societal changes: from the industrial era focused on mechanical and logistical efficiency, to the information age characterized by digitization and connectivity, and now to the intelligence era, defined by data-driven insights and autonomous decision-making. Against this backdrop, this paper systematically explores the core concepts, research objectives, and scope of spatio-temporal intelligence. It analyzes its interdisciplinary integration with related fields, illustrates typical application scenarios, and evaluates its potential value and significance from both scientific and practical perspectives. In today's complex and dynamic world, STI not only provides new pathways for precise knowledge discovery but also demonstrates immense potential in bridging the gap between scientific understanding and practical implementation.

Key words: STI, AI, photogrammetry and remote sensing, interdisciplinary field

Supported by National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (No. 62425102)