

引文格式:张广运,张荣庭,戴琼海,等.测绘地理信息与人工智能 2.0 融合发展的方向[J].测绘学报,2021,50(8):1096-1108. DOI:10.11947/j.AGCS.2021.20210200.
ZHANG Guangyun,ZHANG Rongting,DAI Qionghai,et al.The direction of integration surveying and mapping geographic information and artificial intelligence 2.0[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2021,50(8):1096-1108. DOI:10.11947/j.AGCS.2021.20210200.

测绘地理信息与人工智能 2.0 融合发展的方向

张广运^{1,3},张荣庭³,戴琼海⁴,陈 军⁵,潘云鹤^{1,2}

1. 中国工程院,北京 100088; 2. 浙江大学,浙江 杭州 310058; 3. 南京工业大学,江苏 南京 211816;
4. 清华大学,北京 100084; 5. 自然资源部国家基础地理信息中心,北京 100830

The direction of integration surveying and mapping geographic information and artificial intelligence 2.0

ZHANG Guangyun^{1,3},ZHANG Rongting³,DAI Qionghai⁴,CHEN Jun⁵,PAN Yunhe^{1,2}

1. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China; 2. Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
3. Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 4. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. National Geomatics Center of China, Ministry of National Resource of the People’s Republic of China, Beijing 100830, China

Abstract: In the artificial intelligence (AI) 2.0 era, based on the analysis of the development status of surveying and mapping geographic information, the driving force of promoting surveying and mapping geographic information to the era of intelligence 2.0 is studied, and the key tasks of building the surveying and mapping geographic information 2.0 era are proposed. In terms of basic theories, it is proposed that the breakthroughs of theories should be made in the twin environment of spatiotemporal big data, the knowledge graph of spatiotemporal information, the true three-dimensional deep neural network, the dynamic prediction and reasoning of spatiotemporal big data, etc. In terms of key technologies, the methods are emphasized, integrating the five intelligent technologies containing big data intelligence, cross-media intelligence, crowd intelligence, hybrid-augmented intelligence and autonomous unmanned system with surveying and mapping geographic information. In terms of platform, the important role and construction method of software and hardware platform of intelligent surveying and mapping geographic information are emphasized. At the end, taking the intelligent monitoring of natural resources and indoor-outdoor integrated intelligent navigation as a typical case, the practical application of related theories, technologies and platforms in surveying and mapping geographic information industry is analyzed. Through the discussion of this paper, the connotation, key content and path of the surveying and mapping geographic information enabled by AI are clarified, providing a kind of thinking for surveying and mapping geographic information industry to move towards the new era of intelligence 2.0.

Key words: surveying and mapping geographic information; new generation artificial intelligence; intelligent natural resource management; indoor and outdoor integrated intelligent navigation

Foundation support: The Major Consulting Research of Chinese Academy of Engineering (No. 2019-ZD-30)

摘 要:面向人工智能 2.0 时代,在分析测绘地理信息发展现状的基础上,研究推动测绘地理信息迈向智能 2.0 时代的驱动力,并提出了建设测绘地理信息 2.0 时代的重点任务。在基础理论方面,提出需在时空大数据孪生环境、时空信息知识图谱、真三维深度神经网络、时空大数据动态预测推理等理论方面展开攻关;在关键技术方面,强调大数据智能、跨媒体智能、群体智能、混合增强智能和自主无人系统五大智能技术与测绘地理信息进行融合的方法;在平台方面,强调了智能测绘地理信息软硬件平台的重要作用 and 构建方式;最后以自然资源智能监测和室内外一体化智能导航为典型案例,分析了相关的理论、

技术和平台在测绘地理信息行业的实际应用。通过本文的论述,理清了人工智能赋能测绘地理信息的内涵、重点内容和路径,为测绘地理信息迈向智能化2.0新时代提供了一种思考。

关键词: 测绘地理信息;新一代人工智能;智能自然资源管理;室内外一体化智能导航

中图分类号: P208

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2021)08-1096-13

基金项目: 中国工程院重大咨询研究(2019-ZD-30)

地理信息指的是人对地理现象的感知,是与地理环境要素有关的物质的数量、质量、性质、分布特征和相互联系,以及规律的数字、文字、图像和图形的总称^[1]。地理信息除了具备信息的一般特性外,还具有区域性、多维性和动态性等独特的特性。地理信息是国家基础性、战略性信息资源,涉及经济社会发展、生态文明建设、国家安全与人民生活便利化,因此自然资源部高度重视促进地理信息产业向高质量发展^[2]。

测绘地理信息属于信息服务产业,主要以全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)、地理信息系统(Geographic Information System, GIS)、遥感(Remote Sensing, RS),以及计算机通信网络技术为支撑,以地理信息“获取(传感网)→处理(生产)→应用(服务)”为产业链的信息产业^[3]。测绘地理信息,即测绘地理信息服务是信息服务产业的基础和重要组成部分。中国地理信息产业协会在《2019中国地理信息产业发展状况报告》中指出,我国测绘地理信息产业规模正在持续扩大,市场活跃度保持在较高的水平,正在由高速发展向高质量发展转变。

测绘地理信息于1963年首次由加拿大学者R.F.Tomlinson提出。20世纪90年代,得益于计算机技术的不断突破,地理信息系统(GIS)在全球得到了快速发展和广泛应用,推动了纸质地图、专题图等传统地理信息向数字地理信息的转变,并在数据存储、表达、显示等方面取得了显著成果^[4]。随着计算机技术、互联网技术、信息技术等快速发展,测绘地理信息已由数字化阶段发展到信息化阶段(智能1.0)。信息化测绘地理信息的核心是实现(近)实时、有效的地理信息综合服务,强调数据采集内容的多元化和专业化,特别是对地理信息的综合分析和深层次应用^[5],并表现出测绘地理信息获取实时化、测绘地理信息处理自动化、测绘地理信息服务网络化、测绘地理信息应用社会化等特征。

人工智能技术已经成为第四次工业革命的核

心突破口。随着世界上主要大国将人工智能技术上升为国家战略,人工智能已经开始与各行各业交叉融合。中国新一代人工智能发展战略详细地阐述了新一代人工智能在基础理论、关键技术、应用方向等方面可能突破的方向。如何将这些新一代人工智能理论与技术用于测绘地理信息相结合,不仅是一个精彩的挑战,而且是一个重大的机遇。时空信息是一切信息的基准。完整地描述一个三维、动态的世界必须要有精准的时空信息作为基础框架,所有对真实世界的探测、运行规律的描述以及未来的预测,均需要建立在这个时空框架之上。

随着与对地观测技术、卫星导航定位技术、云计算技术、大数据技术、互联网技术、物联网技术和人工智能技术等其他高新技术的深度融合,地理信息服务水平也得到了大幅度的提升。对地观测技术的发展拓展了地理信息获取对象的范围;卫星导航定位技术的发展增强了导航定位终端的功能^[6];云计算技术和大数据技术的出现使得海量地理数据的存储、处理、开发利用的效率得到了提升;互联网技术、物联网技术和人工智能技术的蓬勃发展使得基于位置的应用逐步向智能化、个性化、娱乐化方向发展。通过与高新技术的深度融合,地理信息获取的自动化和应用的智能化水平都得到了极大的提升^[7]。地理信息企业的业务模式也从简单的提供数据到数据挖掘、应用、服务等全流程地理信息解决方案的提供。当前,世界测绘地理信息产业主流化已经成为新常态,地理信息的价值在经济社会的发展中得到了充分体现。在数据驱动的时代,受到测绘地理信息、大数据、虚拟现实、增强现实、人工智能、物联网等高新技术的影响,传统的商业模式正在发生着巨大的改变。通过数据可视化、数字分析能力,新一代测绘地理信息为终端客户提供实时分析决策,在城市治理和规划、国防安全等领域以及电信、建筑、工程、智慧交通等领域提供了核心空间支持。随着北斗三号全球导航卫星系统的正式开通,需要加快推动测绘地理信息迈向新的2.0时代,这2.0

时代就是智能的测绘地理信息时代^[8]。

本文将从基础理论、关键技术、核心应用、开源开放平台等方面详细阐述新一代人工智能赋能测绘地理信息的路径,分析时空大数据智能处理理论、技术上的特点,为测绘地理信息迈向智能化 2.0 时代提供一种思考。

1 测绘地理信息迈向智能 2.0 时代的驱动力分析

数字化→网络化→智能化是信息化产业的一般发展规律。测绘地理信息属于信息化产业,因此,该规律同样适用于测绘地理信息。由此可见,测绘地理信息的高级阶段即为智能化阶段。

(1) 计算机技术催生了地理信息系统技术的产生。在计算机软件和硬件的支持下, GIS 能够按照空间分布和属性对各种地理信息以数字化的形式进行输入、存储、显示、更新、检索、制图以及综合分析。换句话说,没有计算机技术的发展,就没有 GIS 的出现。随着计算机能力的显著提高和网络通信技术的快速发展, GIS 技术已能够实现网络化运行,使得 GIS 管理地理信息数据的能力由 TB 级提升到了 PB 级,分析和应用地理信息数据的水平也得到了迅速的提高。

(2) “互联网+”促进了测绘地理信息与各领域的深度融合。“互联网+”是互联网、云计算、大数据等高新技术在各领域“全工作流程”“全产业链”“全价值链”中的深度融合和集成创新应用,已成为信息行业发展的新动力^[9]。“地理信息+”与“互联网+”在本质上是一致的,都是进行跨界融合。地理信息与新一代信息技术的跨界融合催生了新的融合集成技术,例如地理信息与大数据、人工智能等技术进行跨界融合后催生了自动驾驶、增强现实等新技术;地理信息与移动互联网技术等跨界融合后催生了移动互联网地图等新应用。当前要抓牢北斗三号全球导航卫星系统开通的有利机遇,深化“地理信息+人工智能+北斗”发展。只有全力推动“地理信息+”在经济、社会、民生等各领域的深度融合,才能加快推动测绘地理信息迈向新的 2.0 时代。

(3) 大数据技术和云计算为快速处理海量的地理信息数据提供了支撑。当前,随着遥感技术、通信技术等的快速发展,地理信息数据正在以 TB、PB 级的速度爆炸式增长。利用大数据技术,

可以解决当前地理信息数据“高吞吐量”的问题,并能够快速完成各种类型数据的密集型计算^[10-11]。虽然互联网为地理信息的共享提供了基础性的设施,基于互联网的 WebGIS 在某种程度上实现了在线处理分析、共享互操作,但是随着地理信息数据量爆炸式的增长、空间分析手段变得更加多元化,单个计算机的处理能力、分析能力、存储能力都难以实现对海量地理信息数据的快速处理。而利用云计算技术则可以解决海量地理信息数据的共享、存储、处理等方面的问题。云计算技术通过网络“云”将处理海量地理信息数据的程序分解为成千上万的小程序,然后分发给由多部服务器组成的系统进行处理和分析,最后对计算结果进行合并后反馈给用户。大数据技术和云计算计算支撑着海量地理信息数据处理的分布化、协同化和智能化。

(4) 在信息技术中,新一代人工智能技术是加快推动测绘地理信息迈向新的 2.0 时代的核心驱动力。人工智能是计算机应用学科的一个分支,经过 60 多年的演进,特别是在移动互联网、大数据、超级计算、脑科学等新环境新技术以及经济社会发展新需求的共同驱动下,人工智能技术如今已进入了新的发展阶段。新一代人工智能技术已经由研究如何利用计算机模拟人类的思维、意识以及行为过程,转变为如何智能化模拟和管理复杂巨系统,例如智能交通、智能经济等。人工智能技术能够大幅度提高计算、识别和判断等方面的能力,并且能够避免人为因素产生的误差、过失等。人工智能的核心技术,如机器学习和深度神经网络要求为自动连续地学习,而云计算、大数据、物联网等技术又是机器学习和深度神经网络进行学习的环境支撑。新一代人工智能技术包括大数据智能、跨媒体智能、群体智能、混合增强智能和自主无人系统五大方向。如何融合新一代人工智能五大技术方向于地理信息服务的全过程,提高地理信息服务的精确化、智能化水平,是新时代地理信息服务的重大命题。

在分析新一代人工智能技术发展方向和测绘地理信息现状的基础上,本文提出构建智能测绘地理信息架构,包括智能测绘地理信息的基础时空数据框架、基础理论、关键技术、软硬件开源开放平台及其典型应用。整体框架设计如图 1 所示。

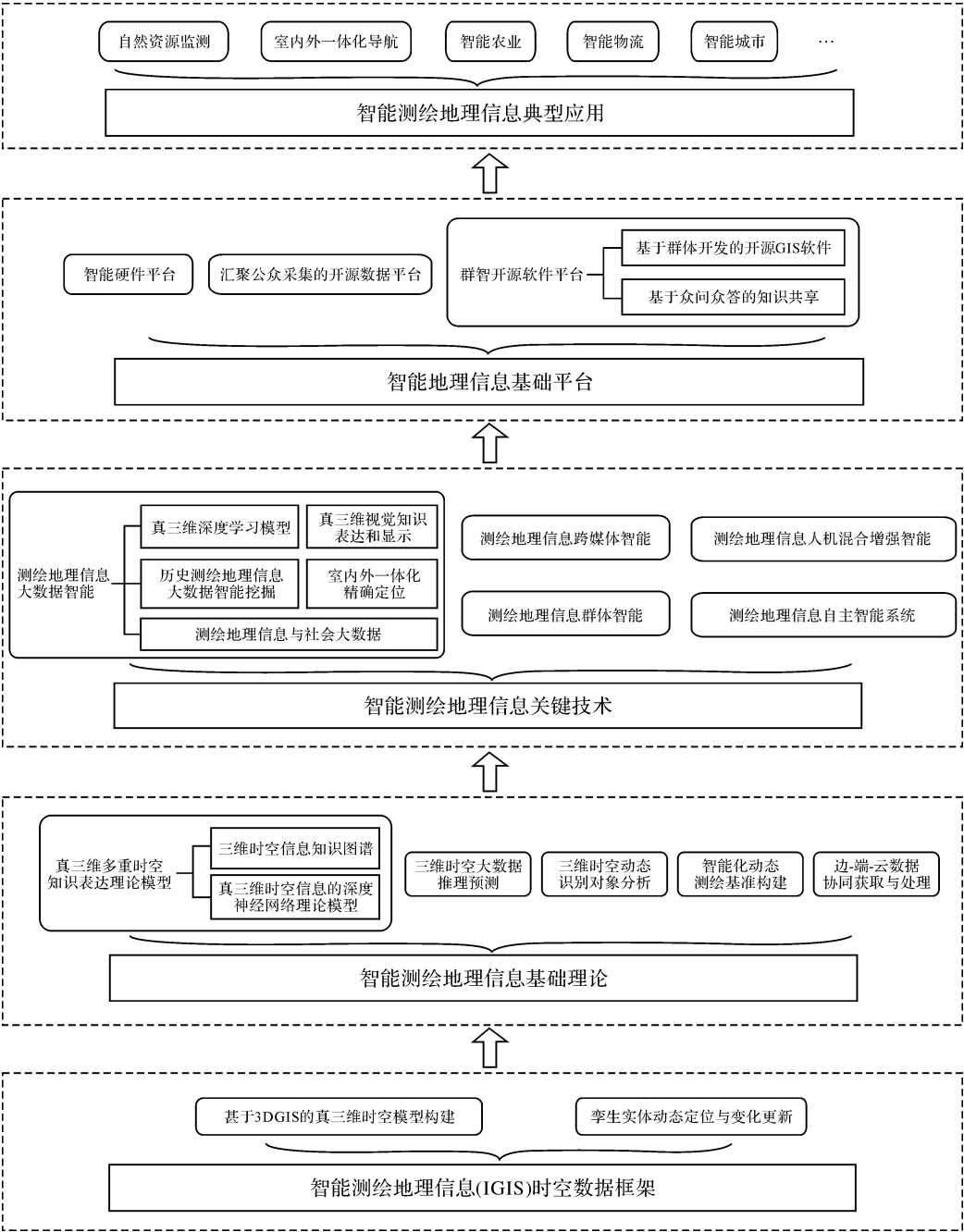


Fig.1 The framework of intelligent surveying and mapping geographic information 2.0

2 智能测绘地理信息 (IGIS) 时空数据框架

传统的测绘地理信息三维产品仅表达了地球的三维表层。真实三维世界是充满空间的、动态的,未来的测绘地理信息产品需要是真三维动态的时空大数据环境^[12],而与之结合的人工智能技术必须能够描述、表达和预测真三维动态的世界。因此,建立室内外一体化真三维世界孪生模型是

新一代人工智能技术赋能测绘地理信息的基础设施。这里有两个方面的内容需要考虑:一是真三维时空大数据模型的构建,二是孪生环境中实体的动态定位与变化信息更新。

2.1 基于 3D GIS 的真三维时空模型构建

GIS 在空间数据的表达与交互方面具有独特的优势,计算机图像学在三维实体表达方面具有独特的优势。真实世界的三维表达模型需要将两者的优势结合起来。近年来,建筑信息模型

(building information model, BIM)已广泛应用于建筑工程领域。BIM 能够为建筑工程建立虚拟的三维模型,通过数字化技术,为这个模型提供完整的、与实际情况一致的建筑工程信息库。该信息库不仅包含描述建筑物构件的几何信息、专业属性及状态信息,还包含了非构件对象(如空间、运动行为)的状态信息^[13]。通过融合 GIS 和 BIM, GIS 将从户外走入房间内,从宏观走入微观,从而实现真 3D 的 GIS。通过实体测绘,建立 BIM 实体,通过摄影测量为每个实体建立立体纹理,通过 GIS 来管理三维实体的属性信息,并表达实体间的相关空间拓扑关系。

真三维时空模型是应用人工智能技术描述现实世界的基础,但新一代人工智能技术仍然能够帮助更好地构建这一模型。例如,虽然 GIS+BIM 模型能够对现实对象进行逼真的表达,也能够提供较好的交互界面,但是这种交互一般局限于计算机显示器。在 GIS+BIM 模型的基础上融入人机混合增强智能技术,例如虚拟现实技术(virtual reality, VR)、增强现实技术(augmented reality, AR),建立基于 GIS+BIM 的智能三维可视化模型,可进一步提高人机交互性。VR 是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真系统,通过产生的电子信号将其与各种输出设备结合使其转化为能够让人们感受到的现象,并使用户沉浸到该环境中^[7,14]。VR 具有沉浸性、交互性、多感知性、自主性、构想性等特征。AR 是一种实时人机交互技术,是对虚拟信息和现实世界的融合^[15]。AR 主要包含虚拟现实融合、实时交互、三维注册三大特征。其中三维注册最为重要。三维注册强调虚拟对象和现实世界的对应关系,也叫三维匹配,是对现实环境空间的跟踪与定位^[16]。

基于 GIS+BIM 的智能三维可视化模型,可利用 AR 的实时跟踪和三维注册技术将虚拟的 BIM 模型与真实世界“混合叠加”,实现同一画面的实时交互查询。同时结合北斗卫星导航系统与 GIS 技术,引入空间信息,将 BIM 模型与现实世界的真实坐标匹配,保证 AR 跟踪与定位准确性与精确性,从而可在辅助施工作业、军事训练、飞行训练、城市管理等方面。

2.2 孪生实体动态定位与变化更新

真三维时空模型中孪生实体的动态定位和变化更新是应用人工智能技术赋能测绘地理信息的另一个基础。只有精确地定位每个实体在真三维

时空环境的位置和变化,才能建立描述、抽象、预测现实世界的人工智能模型。人类对于时间与空间位置的需求,正逐渐从粗略走向精准、从事后走向实时、从静态走向动态、从区域走向全球,智能时代需要高精定位基础设施支持。未来工业智能运行和控制对时间精度的要求是纳秒级的,对定位的要求可能达毫米级或更高。在这样的一个智能时代,精准定位技术必然要成为一个基础设施,赋予现实世界中每个实体统一、实时、精确的定位信息是人工智能技术赋能测绘地理信息的关键。

3 智能测绘地理信息基础理论问题

3.1 真三维多重时空知识表达理论模型

笔者提出的多重知识表达理论概括了人类大脑认识世界的 3 种方式^[17],包括言语表达,形象表达和深度神经网络表达,前两者描述了人类大脑的长期记忆模式,可以用知识图谱和视觉知识来表示,后者描述了人类大脑的短期记忆,可以用深度学习模型来表示。人们认识客观世界的三维时空信息也可以用上述 3 种理论来描述。

3.1.1 三维时空信息知识图谱

测绘地理信息知识图谱描述真三维时空中实体属性信息以及不同实体属性之间的相关关系。相较于一般的知识图谱的概念,测绘地理信息知识图谱中往往知识是附着在时空坐标信息上面的,通过时空坐标信息来挖掘不同实体属性之间的相互作用和相互影响。例如,一个人在道路上突然生病,他用手机向相关热线发送了一条急救信息,急救中心可以通过患者的手机定位信息快速地锁定其空间坐标和时间基准,并查找所有的急救车辆中的空闲和最近的车辆,并确定最佳救援路线。在这个救援过程中,所有的属性信息(生病的人、空闲的车辆、道路拥堵情况)均通过位置信息来发生关联,形成基于位置信息的信息。时空信息知识图谱理论是智能化测绘地理信息系统的核心功能,超越了传统 GIS 简单的空间分析,建立依托于精确时空信息的信息体系,挖掘出现实世界中地理实体之间的关系,为智能化管理打下基础。

3.1.2 真三维时空信息的深度神经网络理论模型

真三维深度神经网络理论集合视觉知识理论的一部分和经典的深度学习理论。视觉知识按照笔者的描述是心象的表征,适用于时空信息的推

演与显式。而经典的深度神经网络理论,适合于挖掘二维图像的高层次抽象特征。所以结合视觉知识理论,将视觉知识中的三维显示与深度神经网络的高层次特征挖掘相结合,建立适合描述和表示真三维时空信息的深度神经网络理论是智能测绘地理信息的关键。当然,测绘地理信息描述的内容超越人类视觉知识认识的范畴,不仅包括人眼能够感知的光谱区域,还包括人眼不能感知的红外、微波等信息。但这些信息都可以表示为三维实体的多维属性信息,用统一的真三维深度神经网络模型来挖掘和处理。

3.2 三维时空大数据推理预测

智能测绘地理信息不仅需要能实时感知三维环境,更重要的是能够对于处理对象进行动态推理预测。时空大数据动态推理预测的特点在于预测未来事件的精确位置及附着在位置上的属性信息的变化。相较于传统的模型驱动因果推理,时空信息推理预测需要以数据为驱动,通过机器学习挖掘数据中内在的规律,来指导未来的预测推理。例如,城市交通拥堵情况预测,需要模型精确推理每个交通实体在三维空间的时间序列位置变化,挖掘位置变化的速度、加速度等高层次知识,还要将天气、交通事故、红绿灯等信息融合到整个模型中,从而准确预测未来的交通状况和实现智能化交通管理。

3.3 三维时空动态识别对象分析

三维时空动态识别对象按照处理的数据类型的不同可以分为三维空间几何变化分析和属性数据变化分析。三维空间几何变化分析侧重于目标或系统位置、几何结构变化的动态提取、监测和预测,属性数据变化分析侧重于目标或系统物理属性的动态提取、监测和预测。由于识别对象内涵的不同,采用的观测设备、分析模型、软件平台等都需要有针对性地选择和设计。例如,地物目标三维空间几何的结构特征提取,需要选择多角度全景相机等相关设备,设计合适的三维深度卷积神经网络,利用视觉知识框架来提取目标结构化特征。而地物目标的特定成分,则需要选择精细光谱仪来获取目标光谱曲线,设计合适的高维数据特征挖掘算法来表达目标属性。

3.4 智能化动态测绘基准构建

测绘基准是测绘地理信息空间基础设施^[18]。在统一的测绘基准框架下,不同部门、不同区域、不同时间获取的测绘地理信息才能共享互用,避

免重复测绘和资金浪费。随着全球卫星导航系统(GNSS)技术的不断发展,测绘基准框架的建立正由传统模式向现代模式转变。通过GNSS快速、准确地获取地面点的大地经度、大地纬度和大地高,然后利用高精度数字高程水准面将GNSS获取的大地高转换为正常高,并结合连续运行卫星定位基准站网(CORS)确定的平面位置,向用户提供真正意义上的三维定位服务。

智能化动态测绘基准理论可以从以下几个方面进行展开。首先,大地水准面智能拟合理论。在建立数字高程水准面时,需要数以百万计的地球重力观测数据,同时需要真实的地形数据进行模型改正。利用大数据智能理论抽象重力数据的高阶特征,将经典拟合理论与深度学习模型进行融合,并在融合模型中兼顾数据误差和地形的影响,是大地水准面智能拟合的关键。其次,GNSS智能定位。由于受到大气层影响、多路径效应等相关因素的干扰,利用GNSS在进行定位时会引入噪声^[19],而这些干扰因素是极度非线性的,造成建模的困难。利用深度学习等对包含噪声的定位信息进行建模,消除这些干扰因素,是GNSS智能化高精度定位的未来研究方向。最后,测绘基准动态更新。由于地壳运动、地震或地面沉降等原因的影响,导致测绘基准框架在不断地变化,如何通过大数据智能地将局部变化更新到基准模型中是实现测绘基准更新的关键。

3.5 边-端-云数据协同获取与处理

随着传感器技术、移动互联网等技术的成熟,可通过卫星智能探测、智能移动设备(如手机、智能摄像头)等获取海量的时空数据。为了能够高效处理所获取的海量时空数据,需根据云-边-端协同处理理论,将时空数据处理合理的分布在云-边-端上,以构建高效的时空大数据智能处理架构。通过云端提供高性能的计算、共享个体终端的信息和知识、存储通用知识;通过边缘端提供算力支持,可以更有效地进行时空大数据的实时处理,以满足军事和应急抢险等方面对实时性的需求;个体终端则完成个性化的操作和处理。通过结合云端和边缘端,可以突破个体终端的存储和计算力的限制,提高智能算法的训练和推理能力。

4 智能测绘地理信息关键技术

4.1 测绘地理信息与大数据智能融合

以深度学习为代表的大数据智能正在逐渐应

用到测绘地理信息的方方面面,如遥感图像分类、地图导航等。然而,主流的深度学习框架以二维信息的处理为出发点。如在深度卷积神经网络中,卷积核为二维卷积核,池化、非线性变化等都是以二维信息为基础。这就造成了应用大数据智能技术于测绘地理信息领域的一系列问题。因此,迫切需要开发基于三维时空数据的大数据智能模型。这里有5个关键的技术方面需要突破。

(1) 真三维深度学习模型。设计适合三维信息的深度神经网络架构,需要建立三维卷积核,三维池化和三维非线性函数等基本结构。目前的三维深度神经网络模型面向的主要是数据的三维表面,且模型在计算效率、模型表达、精度等方面都存在比较大的缺陷。因此,整个三维深度神经网络的训练方法需要重新设计,训练过程的复杂度,模型的透明度和可解释性都是待解决的关键技术点。另外,三维深度神经网络模型无样本或小样本学习的关键技术。目前的无监督或自监督深度神经网络学习主要是针对二维图像或视频图像,还没有三维的无监督或自监督深度神经网络模型。

(2) 真三维视觉知识表达和显示技术。计算机图形学一般处理三维对象的形状、结构等信息,但在真三维孪生环境下基于计算机图形学视觉知识表达和显示技术是一个需要探索的关键。它不仅关系到三维实体表示的问题,更涉及空间信息与属性信息的关联、抽象等高级知识生成。

(3) 历史测绘地理信息大数据智能挖掘技术。测绘地理信息数据相较于其他大数据有一个优势就是历史积累的海量大数据。这些历史数据花费了大量的人力物力来实际调查完成,包括影像数据、地图数据、专题数据和其他社会数据。如何建立基于历史测绘地理信息大数据的智能挖掘技术,是测绘地理信息行业一个重大命题。测绘地理信息历史数据不仅可以为深度卷积神经网络等提供训练样本,而且是发现地物实体变化规律的主要信息源。例如,通过对城市的历史地图和影像大数据进行挖掘、分析,并利用深度学习建立模型,城市管理者可以掌握城市的运行规律和规划发展,甚至可以预测城市未来的发展趋势。地图移动端实时产生的大数据和历史数据可作为人工智能训练的样本,以帮助地图导航产品提高预判出行环境变化和趋势的能力。

(4) 室内外一体化精确定位技术。室内外一

体化精确定位是时空大数据动态预测推理的基础,只有获取了动态高精度的孪生环境实体的精确空间位置,才能挖掘出模式和规律。反过来,通过融合大数据智能技术也可以改进和提高目前的GNSS和室内定位的精度,如定位信号干扰源的智能识别分析,融合移动手机图像的定位分析等。

(5) 测绘地理信息与社会大数据融合。城市管理资源配置的决策依赖于人类社会中群体行为与社会结构、信息空间中事件和主题、物理世界中空间位置信息之间的关联。人类社会、信息空间以及物理空间的大数据具有关联复杂性的特点,其关联复杂性体现在多维演化、多元异构以及多尺度关联等方面。面对如此复杂的关联关系,需要对人类社会、信息空间以及物理空间的大数据进行深层表征的建模,即将人类社会、信息空间和物理世界的三元数据作为输入,从已知关联中通过深层表征建模的方法,学习三元空间的统一表征空间。在此基础上建立“人-事-地”大规模图深度网络,可实现城市管理的精细化、科学化和智能化。例如,在流感爆发之际,建立个体体征属性和其他属性的映射,如某种流感与年龄、身体体征等之间的关系;其次,基于社交网络可知道个体之间的交往程度及其个体活动的地理位置信息;通过“人-事-地”大规模图深度网络,可以准确预测流感疫情的趋势。如某个人的兴趣爱好这一属性为“球迷”,“工人体育场”这一地点发生的事件是足球比赛,则这个人就工体与足球比赛建立起了关联。在打通了人事地关联关系之后,则这个人所住小区就与工人体育场发生了关联。基于“人-事-地”大规模图深度网络,可以预测城市中交通走向等。

4.2 测绘地理信息与跨媒体智能融合

时空大数据中承载的信息源种类繁多,如城市声音污染源是音频信号,城市大气污染源是嗅觉信号,城市概貌是图像信号,城市热岛效应是触觉信号,城市大楼的名称为文本信号。在孪生测绘地理信息的大框架下,这些多媒体信号的公共点是时空坐标基准是相同的。人类智能的重要特点之一,是综合利用视觉、语言、听觉等各种感知所记忆的信息,从而完成识别、推理、设计、创作、预测等功能^[20]。测绘地理信息与跨媒体融合的关键是多媒体信息与时空数据的关联之道,建立多模态的智能数据存储、处理、分析、预测框架。例如,在地图生产内业中,利用机器视觉可从卫星

影像、无人机影像中识别和标注道路,从街拍实景影像、视频中识别和标注道路两旁的店名等,从而实现图像、图形和文本信息的融合应用,提高地图生产效率。

4.3 测绘地理信息与群体智能融合

群体智能计算由易到难可分为 3 种类型^[20]: ①实现任务分配的众包模式;②较复杂、支持工作流模式的群体智能;③协同求解问题的生态系统模式。通过互联网参与和交互,大规模个体可以表现出超乎寻常的智慧能力。对于测绘地理信息领域,比较直接的技术融合方向是群智时空大数据采集,主要是应用第一层次群智计算,可以概括为“众包测绘”的模式。在该模式中,可以将专业测绘手段、监控设备测绘、车载设备测绘、个人移动设备信息测绘集合于一体,彻底改变目前时空大数据采集的过程,将每个领域,每个对象的通用设备信息采集纳入到专业化测绘成果中。也只有采用群智的模式,才能完成对时空大数据的动态更新。当然,各种设备采集的信息如何从完成从数据到信息到模型再到知识的转化,需要很多多源数据融合和处理工作。另一个比较高阶的技术融合方向是群智开源测绘地理信息软件平台。需要建立统一的开源生态,建立数据、模型和算法的共享机制。

4.4 测绘地理信息与人机混合增强智能融合

人的智能是自然生物的智能,与人工智能相比各有优势。通过人机协同工作、取长补短,以形成一种“1+1>2”的增强性智能系统。测绘地理信息与人机混合增强智能融合的一个典型方向是三维地图与自动驾驶的交互融合。三维地图导航与人机混合增强智能系统相结合,一方面在驾驶场景中以智能自主驾驶提高驾驶效率;另一方面,以人机交互保障驾驶的安全。人机混合增强智能可以让依靠移动端导航的司机、骑手完全解放双手,通过言语来使用地图上的各种功能,使得注意力更集中于驾驶,从而保障出行安全。在经过多次对话后,可构建一个可持续沟通的人机交互环境。

4.5 测绘地理信息与自主智能系统融合

相比于类人机器人,自主智能系统(无人飞机、无人汽车等)往往更加高效。测绘地理信息既是自主无人系统的受益者也是自主无人系统的促进者。一方面,未来绝大部分的测绘地理信息将依赖于自主无人系统来获取,其不仅能够获取初

始的测绘地理信息数据,而且能够完成大部分数据处理边缘实时计算,直接得到测绘地理信息产品。另一方面,高精度测绘地理信息时空大数据是自主无人系统智能化的第一步。例如,高精度地图是实现无人驾驶不可或缺的重要组成部分。高精度地图可以提高自主智能系统的定位精度,而且在自主智能系统的传感器失效时,能够弥补环境感知设备的不足。自主智能系统能够在所给的地图中通过增强学习的方式去自动需求位置、规划路线,反过来,自主智能系统在适用过程中能不断向地图提供细节与改善,使得地图更加好用。相比以前,地图不再是辅助性的,而是在自主智能系统(如无人飞机、无人汽车等)的决策过程中,直接参与控制、决策与学习。

5 构建智能地理信息基础平台问题

国务院于 2017 年 7 月 8 日印发并实施的《新一代人工智能发展规划》中强调,要构建基础人工智能开源开放平台^[21]。平台具有引导性、公共性等先决属性。在公众所接触的所有信息中,绝大部分都具备地理属性。因此,智慧城市^[22]、智能交通、智能农业等的“智慧”和“智能”必然具有空间地理信息的内涵。为了更好地建设智慧城市、智能交通、智能农业等,智能地理信息基础平台(主要包括智能硬件平台、汇聚公众采集的开源数据平台、群智开源软件平台等)的构建势在必行。

5.1 智能硬件平台

充分利用现代工业制造中的新工艺、新材料以及新一代人工智能技术(包括大数据智能、跨媒体智能、群体智能、人机混合增强智能、自主智能系统),不断提升地理信息数据采集、处理、应用硬件的智能化水平。基于大数据智能技术,在硬件(如 FPGA、DSP 等)上固化大数据智能挖掘、分析等智能算法,实现机载、星上实时智能处理与传输。基于跨媒体智能技术,构造模拟和超越生物感知的智能芯片和系统,以极低功耗来高效地表达外部世界复杂的地理信息。基于群体智能技术,加快平台智能编队的步伐,例如智能编队卫星、智能编队无人机等,集所有编队平台的智慧更好地服务于城市管理、防灾减灾、国防建设等场景。基于人机混合增强智能技术,研制人机混合增强智能系统,将人类的智慧、经验实时主动输入机器,机器智能结果也交会与人,从而连接起人类智能和机器智能。基于自主智能系统技术,大力

发展海洋、地面、航空、航天等自主智能观测硬件系统,如水下自主无人智能系统、智能无人测绘汽车、智能无人机、自主智能卫星等,大幅度提升采集三维地理信息数据的智能化水平。

5.2 汇聚公众采集的开源数据平台

当前,地理信息数据的采集与使用常处于矛盾的境地。一方面,人们在进行与地理相关的研究和业务时,常常遭遇无地理信息数据可用的窘境;另一方面,相关部门在采集地理信息数据后,由于缺乏地理信息数据分析的专业知识,使得大量的地理数据处于闲置状态。为打破“数据孤岛”,使各部门的数据互通,开源的地理信息数据平台不可或缺。

通过开源的地理信息多媒体数据平台,可汇集历史与现状的基础地理信息数据(包括矢量数据、影像数据、高程模型数据、地理实体、新型测绘产品数据等)、历史与现状的公共专题数据、智能感知的即时数据、空间规划数据等。实名注册用户可随时随地查看所需数据集,并在统一平台上分析、管理数据。为保证安全性,对于涉密的地理信息数据,须进行脱密处理后方可共享于开源数据平台上,或按权限等级进行访问。通过汇聚公众采集的开源数据平台,可实现多源异构地理信息大数据的共享、互操作和无缝流转,实现不同类型数据的有效集成,并提供应用层面的统一访问接口、统一查询方式和统一操作行为。

5.3 群智开源软件平台

群体智能通过集合群体的智慧来应对各种挑战,提供了一种解决问题的新范式^[23-24]。以物联网、移动互联网为纽带,建立地理信息领域的群智开源平台,不仅可以推动地理信息领域的理论技术创新,还能对整个测绘地理信息的应用创新、管理创新和商业创新提供核心驱动力,使得跨时空地汇集群体智能、高效地重组群体智能、更广泛而精确地释放群体智能成为可能。群智开源平台可通过吸引、汇聚和管理大规模参与者,以竞争和合作等多种自主协同方式来共同应对挑战性任务,特别是开放环境下的复杂系统决策任务,涌现出超越个体智力的智能形态。

地理信息群智开源平台是一个综合性平台,可提供基于群体开发的开源 GIS 软件、基于众问众答的知识共享等。

5.3.1 基于群体开发的开源 GIS 软件

软件开发是一种智力活动,涉及群体的创造

性和制造能力^[25]。开放源码和软件众包是基于群体开发开源 GIS 软件的两种主要方式。开放源码项目托管服务,例如 GitHub、Google Code、SourceForge,可以让任何人在任何时间创建和管理开放源码软件(open source software, OSS)项目。世界各地的开发人员都可以轻松地访问这些 OSS 项目的源代码、文档和测试用例,并参与整个开发过程。这种精英制度促使专业人士和业余人士积极地在 OSS 社区中分享他们的想法、经验和源代码,并协同创建新的软件产品。软件众包是对参与软件开发任务的一种公开选拔,包括文档编制、设计、编码和测试。软件众包通常采用明确的激励措施,特别是竞赛奖品等金钱奖励,来刺激社区成员的参与。

5.3.2 基于众问众答的知识共享

在进行与地理相关的研究或作业时,由于单一个人或团体的知识储备或经验不足的原因,不可避免地会遇到难以解决的问题。个人或团体可以将所遇到的问题在群智开源平台上进行详细、清晰地描述,供所有用户对该问题进行分析,然后提出解决问题的办法和建议,并做成本规划和可行性分析。集所有用户的智慧提出的解决方案可以快速有效地解决所提出的问题。另一方面,用户可以将自己的经验和知识分享到群智开源平台上,以形成与地理信息相关的知识库。

6 智能测绘地理信息典型应用

6.1 智能自然资源监测

自然资源是每个国家发展所能依赖的最重要资源和基础,《深化党和国家机构改革方案》要求将包括“山、水、林、田、湖、草”生命共同体在内的自然资源进行统一管理。新时代的自然资源统一管理需要对传统的管理方式从自然资源现状调查、过程监测、状态修复到未来规划进行全面的精确化、智能化改造与升级。

人工智能技术是一种像“水”和“电”一样的使能技术。如何融合新一代人工智能五大技术(即大数据智能、跨媒体智能、群体智能、混合增强智能和自主智能系统)于自然资源管理的全过程,提高自然资源管理的精确化、智能化水平,是新时代自然资源管理的重大命题。

自然资源监测是自然资源管理的基础。建立自然资源智能监测系统,可解决传统自然资源监测系统在数据采集、数据存储、数据分析、数据展

示等方面存在的问题。

(1) 在数据采集方面,目前的自然资源监测系统主要以特定需求或问题为导向进行数据采集。例如,农田监测系统的采集体系是面向特定的农田资源进行设计的,采集系统任务单一、不具备环境适应性,无法适应作业环境的变化,不能理解所采集的数据内容。利用深度学习等人工智能技术,自然资源智能监测系统可在采集时就能识别采集对象,并且当采集的对象发生变化时,也会触发采集行为,从而提高实时解决问题的能力,做到数据采集的省时省力省资源,快采快传快识别^[26]。

(2) 在数据存储方面,当前由于大多自然资源监测数据是涉密或者敏感的,通常采取集中存储,从而导致数据的知识产权难以确定、数据得不到共享。利用基于区块链的人工智能移动加密技术,自然资源智能监测系统可以有效地解决自然资源数据保密和传输的问题。区块链去中心化的加密手段可从源头上对各类自然资源涉密涉隐数据进行封装,使得涉密涉隐信息在存储和传输中无法被窃取^[27]。

(3) 在数据分析方面,自然资源监测和管理工作的核心在于制定标准并实施有效监督管理,实现资源配置效益最大化和效率最优化。人工智能基于关系模式数学能够发现数据和行为之间的内在联系,分析宏观及微观的趋势,进而使系统具有挖掘、分析及预测能力。

(4) 在数据展示方面,目前自然资源数据的展示通常是基于固定模板或者由专家按照特定规则定制形成,其形式是事先确定的,不能够真正实现数据的智能化个性化展示。随着新一代人工智能技术的发展,虚拟现实、增强现实等丰富了自然资源数据的展示形式,从而为自然资源智能监测的应用提供了更多的可能性。

6.1.1 大数据智能在自然资源监测中的应用

目前的自然资源调查监测存在自动化程度低,结果准确性不高等相关的问题。其原因主要在于没有建立适合自然资源本身特点的智能化调查监测手段。首先,建立自然资源真三维时空大数据环境,其次,设计真三维自然资源多重知识表达模型,包括三维自然资源深度学习表达,自然资源三维图形知识表达等。还要针对小样本问题构建无监督或自监督三维深度神经网络模型。最后,是历史自然资源调查监测数据智能挖掘。测

绘地理信息历史数据不仅可以为深度卷积神经网络等提供训练样本,而且是发现地物实体变化规律的主要信息源。

6.1.2 群体智能在自然资源监测中的应用

自然资源监管存在着监管对象复杂、任务重以及范围广阔等特点。传统的自然资源数据主要依靠卫星图像、专职人员现场数据采集核对和在固定地点安装专业设备采集数据 3 种方式获取。然而,卫星的图斑图形所能获得数据的粒度过粗。利用专职人员或安装专业设备进行数据采集需要大量的人力和物力成本,难以完全覆盖所有需要监管的对象,更不用说对所监管对象的全程实时数据采集和监控。通过群智技术,可以建立相关的群智自然资源监测平台,基于群智感知的自然资源信息收集系统,即可实现低成本、大规模的实时监管与高效配置自然资源。手机或其他智能终端的用户通过在平台上接受任务后即可开始自然资源数据的收集,系统则筛选出高质量的数据用于后续的分析处理。

6.1.3 跨媒体智能在自然资源监测中的应用

随着传感技术的发展,获取自然资源数据的手段日益丰富,数据表现形式多样,包括以图片、文字、声音、视频等形式融合表现的多元跨媒体信息,其具有复杂、海量、异质多元、大范围时空关联等特点。通过跨媒体智能,可以在短时间内对复杂多维的自然资源数据进行有效地检索、存储、分析处理与挖掘。

6.1.4 人机混合增强智能在自然资源监测中的应用

人机混合增强智能可以有效地实现人机交流和通信,增强自然资源监测系统的决策能力,提高系统对复杂情况的适应性以及处理复杂任务的能力,从而使得混合增强智能系统能够生成比单一自然资源智能监测系统更为精确可信的结果。

6.1.5 自主智能系统在自然资源监测中的应用

在进行自然资源调查监测过程中,不可避免地会遇到地形复杂、条件恶劣的环境,不宜再采用依靠人力的常规调查监测手段。此时的最佳选择是利用自主智能系统(例如自主无人车、自主无人机等)进行自然资源调查监测。自主智能系统能够在所给的地图中通过增强学习的方式去自动需求位置、规划路线,以完成调查监测的任务。

6.2 室内外一体化智能导航

全球导航卫星系统(GNSS)为人们提供了有效的室外定位手段,已经成为人们出行导航的必备工具。随着我国北斗三号全球导航卫星系统的正式开通,北斗系统的功能和性能将得到进一步提升,北斗应用的规模化、产业化和国际化将更进一步。当前,北斗全球导航卫星系统的定位精度为分米、厘米级别,测速精度 0.2 m/s,授时精度 10 ns。但当前的 GNSS 也存在着一些缺陷,例如当卫星的信号被干扰或者是被遮挡时,卫星导航系统将失去定位导航的能力,在高楼林立的城市区域或大型场馆的室内,卫星定位的精度会大幅度降低,甚至无法定位,然而大型公共场馆内部建筑结构复杂、人员密度高、场馆内设备数量大、对室内定位的需求十分迫切,定位与位置服务的“最后一公里”问题日益突出。

为了满足“智能时代”对定位、导航的无缝和连续可用的需求,需加快完善室内外一体化导航基础设施建设,保证各种场景下的定位精度和覆盖范围的平滑过渡和无缝连接。基于北斗的室内外一体化无缝定位和导航,一方面要大范围地发展“地基+星基”定位增强系统,地基增强可通过安装高精度卫星定位接收机的地面基准站网络解算出用户所接收到的卫星导航信号的误差修正信息,然后通过地面通信方式告知用户来提高其定位精度,星基增强是通过卫星播发上述修正信息让用户提高精度。高、中、低轨卫星与地基增强系统相结合才能构建起实时无缝理想的卫星高精定位导航系统。另一方面,在大型商场、展览馆、停车场、会展中心、车站、医院、码头、机场、学校、博物馆、景区景点等大型公共设施内部铺设基于 Wi-Fi 的室内定位系统、室内高精度定位系统(indoor navigation node net, INDOET)。此外,还需研制集成北斗卫星导航和 Wi-Fi 等模块的室内外无缝定位终端。

室内外一体化智能导航系统是综合应用人工智能、信息管理、认知心理学与行为学等多学科理论与技术而构造的智能信息系统,能自主识别用户需求,并引导用户实现高效率的信息检索与获取。其中,新一代人工智能理论和技术(包括大数据智能、跨媒体智能、人机混合增强智能、群体智能、自主智能系统)是实现室内外一体化智能导航系统的关键。

室内外智能导航系统终端是物联网感知前端

的时空位置传感器,其产生的带有精准时空位置标签的时空大数据,是对大数据赋予时空信息,以与其他各类大数据实现关联,直接发现事物本质的普世、快捷和可靠的智能方式。

(1) 大数据智能在室内外一体化智能导航中的应用。数以亿计的智能手机、监控视频摄像头、车载定位系统等每时每刻都在产生海量的时空数据。通过大数据智能,对时空大数据进行深度挖掘、分析,建立数据驱动、以自然语言理解为核心的认知计算模型,形成从大数据到知识、从知识到决策的能力。例如,在隧道应急救援时,根据被救援人员的智能手机或车辆定位系统等,获取其精确的地理位置信息,结合大数据智能、移动互联网和云计算等新一代信息技术,为抢险救援人员规划最佳救援路线,缩短救援时间,并向其他车辆发出道路拥堵预警,实时更新最优行车路线,减少拥堵。

(2) 群体智能在室内外一体化智能导航中的应用。室内外一体化智能导航的实现并非一己之力所能为之,而需通过群体智能,集合所有科研人员、工程人员的集体智慧,从数据源、数据质量、样本库、算法、系统到硬件,构建服务于室内外一体化智能导航的交互式群智涌现平台。例如,在建立样本库时,单个个体所能搜集到的样本十分有限,而通过所有科研人员、工程人员等搜集到的样本不仅数量庞大,而且种类也会相对齐全。所搜集到的样本则共享于交互式群智涌现平台,供用户使用。

(3) 跨媒体智能在室内外一体化智能导航中的应用。时空大数据承载的信息源种类繁多,通过跨媒体智能,可使室内外一体化智能导航系统具有类人甚至超人的智能感知和跨媒体的感知计算能力,包括类人和超人的主动视觉、自然声学场景的听知觉感知、自然交互环境的言语感知及计算、面向媒体感知的自主学习、大规模感知信息处理与学习引擎、城市全维度智能感知推理引擎。例如,用户可通过语音设置起点和终点,室内外一体化智能导航系统在接收到指令后即可提供检索、路线规划等服务,并通过文本、图像、语音等多种形式展现出丰富的指引信息。

(4) 人机混合增强智能在室内外一体化智能导航中的应用。基于人机混合增强智能,通过人机智能共生的行为增强与脑机协同、真实世界环境下的情境理解及人机群组协同等,提升室内外

一体化智能导航用户的体验。例如,通过 AR/VR 技术,并配合高精度地图,可在城市真三维时空大数据环境中进行模拟导航,验证道路的合理性。

(5) 自主智能系统在室内外一体化智能导航中的应用。基于自主智能系统理论与技术,室内外智能导航系统通过自身携带的各种传感器感知自身状态以及周围环境信息,据此来完成在未知环境中的自主运动。例如,自主无人机在新环境中执行任务时,利用各种传感器感知周边复杂环境信息,通过深度学习等算法规划最优路线,自主的运动,并对行进的路线进行记录,更新对新环境的认知。

7 结束语

本文分析了新一代人工智能技术对于测绘地理信息发展的影响智能测绘地理信息发展的驱动因素,构建了智能测绘地理信息基础理论、关键技术和软硬件平台整体框架,提出需在时空大数据孪生环境、时空信息知识图谱、真三维深度神经网络、时空大数据动态预测推理等理论方面展开突破,建立了大数据智能、跨媒体智能、群体智能、混合增强智能和自主无人系统五大智能技术与测绘地理信息进行融合方法,强调了智能测绘地理信息软硬件平台的重要作用 and 构建方式,最后以自然资源智能监测为典型案例,分析了相关的理论、技术和平台在测绘地理信息行业的实际应用。通过本文的论述,理清了人工智能赋能测绘地理信息的内涵、重点内容和路径,为测绘地理信息迈向智能化 2.0 新时代提供了一种思考。

致谢:感谢吴飞教授、朱强教授对本文的支持。

参考文献:

- [1] 辞海编辑委员会.辞海[M]. 6版(缩印本). 上海:上海辞书出版社, 2010.
- [2] Cihai Editorial Board. Cihai[M]. 6th ed(reduced). Shanghai: Shanghai Lexicographic Publishing House, 2010.
- [3] 中国地理信息产业协会. 2019 中国地理信息产业发展状况报告[EB/OL]. [2020-08-17]. <http://www.cagis.org.cn/Lists/content/id/3147.html>.
- [4] China Association for Geospatial Information Society. 2019 China geospatial information industry development report [EB/OL]. [2020-08-17]. <http://www.cagis.org.cn/Lists/content/id/3147.html>.
- [5] 王家耀,崔晓杰.创新驱动地理信息产业转型升级[M]//测绘地理信息蓝皮书:测绘地理信息转型升级研究报告. 北京:社会科学文献出版社,2014,201-217.
- [6] WANG Jiayao, CUI Xiaojie. Transformation and development of geoinformation industry driven by innovation[M]//Blue Book of China's Surveying & Mapping & Geoinformation: Report on the Transformation and Upgrading of Surveying, Mapping and Geoinformation. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2014: 201-217.
- [7] 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.
- [8] LI Deren. From geomatics to geospatial intelligent service science [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1207-1212.
- [9] 肖建华,彭清山,李海亭.“测绘 4.0”:互联网时代下的测绘地理信息[J]. 测绘通报, 2015 (7): 1-4.
- [10] XIAO Jianhua, PENG Qingshan, LI Haiting. “Geomatics 4.0”: surveying, mapping and geoinformation in the internet era[J]. Bulletin of Survey and Mapping, 2015 (7): 1-4.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] GONG Jianya, JI Shunping. Photogrammetry and deep learning [J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2018, 1(1): 1-15.
- [14] 潘云鹤. 地理信息 2.0 时代[EB/OL]. 浙江在线. [2020-08-05]. <http://gxxw.zjol.com.cn/gxxw/system/2020/08/05/032654608.shtml>.
- [15] PAN Yunhe. Geographic information 2.0 era[EB/OL]. Zhejiang Online. [2020-08-05]. <http://gxxw.zjol.com.cn/gxxw/system/2020/08/05/032654608.shtml>.
- [16] 王家耀,武芳. 地理信息产业转型升级的驱动力[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(1): 10-16.
- [17] WANG Jiayao, WU Fang. Driving forces for transformation and upgrading of geographic information industry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(1): 10-16.
- [18] 李德仁,张良培,夏桂松. 遥感大数据自动分析与数据挖掘[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1211-1216.
- [19] LI Deren, ZHANG Liangpei, XIA Guisong. Automatic analysis and mining of remote sensing big data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43 (12): 1211-1216.
- [20] 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.
- [21] LI Deren. Towards geo-spatial information science in big data era[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,

2016, 45(4): 379-384.

[12] 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.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 发展改革委, 科技部, 等. 关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见 [EB/OL]. [2020-07-03]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-07/28/content_5530762.htm.

Ministry of House and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, et al. Guidelines on Promoting the Synergetic Development of Intelligent Construction and Construction Industrialization. [EB/OL]. [2020-07-03]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-07/28/content_5530762.htm.

[14] 石宇航. 浅谈虚拟现实的发展现状及应用[J]. 中文信息, 2019(1):20.

SHI Yuhang. Discussion on the development status and application of virtual reality [J]. Chinese Information, 2019(1): 20.

[15] 郭栋.增强现实技术概念及分析[J]. 中国科技术语, 2014 (z1):139-140,143.

GUO Dong. Concept and prospect of augmented reality technology [J]. China Terminology, 2014, (z1): 139-140,143.

[16] 华陆韬. AR+BIM+GIS 技术的融合开发与应用[J]. 科技创新与应用, 2020(15): 19-21.

HUA Lutao. Integrated development and application of AR+BIM+GIS technology [J]. Technology Innovation and Application, 2020(15): 19-21.

[17] 潘云鹤. AI 的多重知识表达[J]. Engineering, 2020, 6 (3): 216-217.

PAN Yunhe. Multiple knowledge representation of AI [J]. Engineering, 2020, 6(3): 216-217.

[18] YANG Yuanxi, XU Tianhe, XUE Shuqiang. Progresses and prospects of marine geodetic datum and marine navigation in China [J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2018, 1(1): 16-24.

[19] 杨元喜. 卫星导航的不确定性、不确定度与精度若干注记[J]. 测绘学报, 2012, 41(5): 646-650.

YANG Yuanxi. Some notes on uncertainty, uncertainty measure and accuracy in satellite navigation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(5): 646-650.

[20] PAN Yunhe. Heading toward Artificial Intelligence 2.0 [J]. Engineering. 2016, 2(4): 409-413.

[21] 中华人民共和国国务院. 新一代人工智能发展规划[EB/OL]. [2017-07-20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm.

State Council of the People's Republic of China. New generation of artificial intelligence development plan [EB/OL]. [2017-07-20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm.

[22] 龚健雅, 张翔, 向隆刚, 等. 智慧城市综合感知与智能决策的进展及应用[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1482-1497. DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20190464.

GONG Jianya, ZHANG Xiang, XIANG Longgang, et al. Progress and applications for integrated sensing and intelligent decision in smart city[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48 (12): 1482-1497. DOI: 10. 11947/j. AGCS.2019.20190464.

[23] LI Wei, WU Wenjun, WANG Huaimin, et al. Crowd intelligence in AI 2.0 era[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. 2017 18(1):15-43.

[24] 赵健,张鑫昶,李佳明,等. 群体智能 2.0 研究综述[J]. 计算机工程, 2019. 45(12):1-7.

ZHAO Jian, ZHANG Xinti, LI Jiaming, et al. Research review of crowd intelligence 2. 0 [J]. Computer Engineering, 2019. 45(12):1-7.

[25] WANG H M, YIN G, LI X, et al. TRUSTIE: a software development platform for crowdsourcing[M] // LI W, HUHN S M N, TSAI W T, et al ed. Crowdsourcing. Berlin: Springer, 2015: 165-190.

[26] 胡林,陈俊茜. 数据科学视角下的自然资源监测关键问题[J]. 林业和草原机械, 2020, 1(2):31-35.

HU Lin, CHEN Junhan. Key problems of resource monitoring from the perspective of data science[J]. Forestry and Grassland Machinery, 2020, 1(2):31-35.

[27] 陈曦. 人工智能让自然资源信息管理更高效[N]. 中国国土资源报, 2018-05-07(5).

CHEN Xi. Artificial intelligence makes natural resource information management more efficient[N]. China Land and Resources News, 2018-05-07(5).

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2021-04-16

修回日期: 2021-05-06

第一作者简介: 张广运(1983—),男,教授,研究方向为遥感信息智能处理。

First author: ZHANG Guangyun(1983—), male, professor, majors in intelligent remote sensing information processing.

E-mail: gyzhang1234@163.com

通信作者: 潘云鹤

Corresponding author: PAN Yunhe

E-mail: panyh@cae.cn