

引文格式:张恒才,蔚保国,秘金钟,等.综合PNT场景增强系统研究进展及发展趋势[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(4):491-505.DOI:10.13203/j.whugis20220320



Citation: ZHANG Hengcai, YU Baoguo, BI Jinzhong, et al. A Survey of Scene-Based Augmentation Systems for Comprehensive PNT[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(4):491-505. DOI:10.13203/j.whugis20220320

## 综合PNT场景增强系统研究进展及发展趋势

张恒才<sup>1,2</sup> 蔚保国<sup>3</sup> 秘金钟<sup>4</sup> 潘树国<sup>5</sup> 陆锋<sup>1,2</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室,北京,100101

2 中国科学院大学资源与环境学院,北京,100049

3 卫星导航系统与装备技术国家重点实验室,河北 石家庄,050081

4 中国测绘科学研究院,北京,100049

5 东南大学仪器科学与工程学院,江苏 南京,210096

**摘要:**定位导航授时(positioning navigation and timing, PNT)是国家重要战略基础设施,目前中国已经建立了完善的北斗地基增强系统、地基增强系统、低轨增强系统,室内外定位技术蓬勃发展,但声光电磁等多种定位技术手段在全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)拒止环境受到诸多限制,在深空、深地、深海三深空间综合PNT依然面临许多困难。近年来,数字孪生、实景三维等战略逐渐落地,三维场景为提高综合PNT的完好性、连续性、可用性提供了新的机遇。对综合PNT场景增强国内外技术现状进行了系统梳理,总结了综合PNT场景增强系统面临的挑战,阐述了综合PNT场景增强系统建设主体、服务层次、系统架构等基本框架,展望未来中国的综合PNT体系是以北斗PNT为核心,地基增强、地基增强、低轨增强、场景增强多源信息集成的服务于全空间的综合PNT智能服务体系。

**关键词:**综合PNT;场景增强;智能服务;智能融合;室内定位;位置服务;数字孪生

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2022-05-26

DOI:10.13203/j.whugis20220320

文章编号:1671-8860(2023)04-0491-15

### A Survey of Scene-Based Augmentation Systems for Comprehensive PNT

ZHANG Hengcai<sup>1,2</sup> YU Baoguo<sup>3</sup> BI Jinzhong<sup>4</sup> PAN Shuguo<sup>5</sup> LU Feng<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, Shijiazhuang 050081, China

4 Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100049, China

5 School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

**Abstract:** Positioning navigation and timing (PNT) is the nation's critical infrastructure. At present, China has established the relatively complete ground-based augmentation systems, satellite-based augmentation systems and low earth orbit(LEO) satellite-based augmentation system for comprehensive PNT. Although indoor positioning on a contemporary smartphone is booming, including Wi-Fi, bluetooth, magnetic field fingerprinting, and so on, these existing methods still cannot provide high quality PNT services for the whole area, such as underground, indoor space, and underwater. Recently, the key technologies of real three-dimensional model and digital twin model received more and more attention. The information of geographic scene presents unrecalled opportunities to improve the robust availability, continuity, high accuracy and reliability of comprehensive PNT system. First, we introduce the state-of-the-art of related studies of scene-based augmentation systems, including scene-based PNT systems augmentation. Second, we summarize the challenges and present the definition and basic concept of the scene-based augmentation systems

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3900803)。

第一作者:张恒才,博士,副研究员,研究方向为立体时空计算。zhanghc@reis.ac.cn

通讯作者:陆锋,博士,研究员。luf@reis.ac.cn

for comprehensive PNT. Next, the system architecture, construction units and hierarchical service mechanism of scene-based augmentation systems is proposed. Finally, we forecast the development trend of scene-based augmentation systems for comprehensive PNT. The China comprehensive PNT system should be BeiDou-centered and include ground-based augmentation systems, satellite-based augmentation systems (SBAS), LEO SBAS and scene-based augmentation systems for comprehensive PNT as auxiliary augmentation systems. It has the ability to provide intelligent PNT services in whole area.

**Key words:** comprehensive PNT; scene-based augmentation; intelligent services; intelligent fusion; indoor localization; location-based services; digital twin

定位导航授时(positioning navigation and timing, PNT)体系是国家战略基础设施,是保障国民经济和社会发展的核心要素,也是国防安全、金融系统、交通系统等稳定运行的“定海神针”<sup>[1-2]</sup>。PNT体系以全球卫星导航定位系统(global navigation satellite system, GNSS)为主,如中国的北斗卫星导航系统、美国的全球定位系统(global positioning system, GPS)、俄罗斯的GLONASS(global navigation satellite system)及欧盟的Galileo(Galileo system)等。由于GNSS信号微弱,易受干扰和欺骗,且自身可能发生故障,使得PNT服务难以惠及深空、深地、深海空间,地面运控系统一旦失效,GNSS服务无法保障。在此背景下,综合PNT应运而生。综合PNT是指综合利用多种信息源,经过多传感器高度集成和多源数据融合,生成时空基准统一的,且具有抗干扰、防欺骗功能,稳健、可用、连续、可靠的PNT服务<sup>[3-4]</sup>。

地基增强系统(ground-based augmentation systems, GBAS)<sup>[5]</sup>与星基增强系统(satellite-based augmentation systems, SBAS)是综合PNT的重要组成部分<sup>[6]</sup>。GBAS在一定区域布设若干个GNSS连续运行参考基站(continuously operational references system, CORS),对区域GNSS定位误差进行整体建模,通过无线数据通讯网络向用户播发定位增强信息,提高用户的定位精度,且定位精度分布均匀、实时性好、可靠性高。SBAS通过地球静止轨道卫星搭载卫星导航增强信号转发器,可以向用户播发星历误差、卫星钟差、电离层延迟等多种修正信息,实现对原有卫星导航系统定位精度的改进。近年来,低轨增强系统逐渐受到学者关注,将低轨卫星增强星座加入GNSS系统,利用其运动特性,提供增强服务。多种卫星增强系统虽然可以提高定位服务的普适性,但综合PNT进入三深空间依然面临许多困难。除GNSS外,其他定位技术手段也层出不穷,按照定位技术原理可以分为测距方式与非测距方

式。测距方式有基于到达时间(time of arrival, TOA)、基于到达角(angle of arrival, AOA)等,非测距方式有惯性导航、指纹定位技术等。定位技术按照信源的不同可以分为蜂窝信号<sup>[7]</sup>、BLE(bluetooth low energy)<sup>[8]</sup>、Wi-Fi<sup>[9]</sup>、音频信号<sup>[10]</sup>、图像<sup>[11]</sup>、伪卫星<sup>[12]</sup>、地磁<sup>[13]</sup>等。根据定位方式的不同也可以分为主动定位与被动定位方式。此外,业界也提出了基于多种定位技术手段混合的定位方式,如PDR(pedestrian dead reckoning)/音频混合<sup>[14]</sup>、PDR/Wi-Fi混合<sup>[15]</sup>、PDR/UWB(ultra wide band)混合<sup>[16]</sup>、GNSS/IMU(inertial measurement unit)/视觉混合<sup>[17]</sup>、地磁/PDR混合<sup>[18]</sup>、PDR/Wi-Fi/地磁混合<sup>[19]</sup>等。近年来,6G相关技术也被引入到室内定位中,例如Fan等<sup>[20]</sup>提出的三维太赫兹定位方式可重构智能表面辅助的室内定位方式<sup>[21]</sup>,也有学者尝试采用大规模多天线实现三维室内定位方案<sup>[22]</sup>。

综合PNT智能服务与场景密切相关,由于定位导航场景复杂多变,同时不同场景应用对定位精度、时延、成本与覆盖范围均有不同要求,单一定位系统手段无法成为通用解决方案。地理场景是一定地域、不同时空范围内的各种自然要素、人文要素相互联系、相互作用所构成的具有特定结构和功能的地域综合体<sup>[23]</sup>。不同类型场景深刻影响综合PNT信道传播模型,地理场景成为综合PNT智能服务的关键,场景智能也是未来通信和控制领域的关键,如5G微基站宏观调控优化离不开场景信息,《6G愿景与技术趋势白皮书》指出:场景依赖、场景智联是未来6G发展核心要素<sup>[2,24]</sup>。

基于此,笔者提出了综合PNT场景增强系统(scene-based augmentation systems for comprehensive PNT, SceneBAS)的概念,SceneBAS以三维场景信息作为综合PNT的信息源,能够提供不同层级的综合PNT支持,例如低层次的场景空间结构信息、纹理特征、拓扑路网等提高定位能力,高层的电磁波三维时空计算、场景知识图谱

等消除多径效应; SceneBAS 应该能为定位、导航、授时场景增强以及综合 PNT 的智能服务提供多种技术手段, 场景感知识别也是进行多种定位技术手段智能融合的关键; SceneBAS 通过引入新的数据源, 制定相关标准规范, 提高定位导航系统的可用性、完好性、连续性及可靠性。SceneBAS 的建设需要多学科的支持, 尤其对三维场景计算能力提出了很高的需求, 仅提供环境纹理、空间结构等浅层的地图信息难以支撑综合 PNT 场景增强系统建设, 亟需研发立体时空计算理论及工具, 即一套对全空间、全要素、全内容的三维空间计算方法, 提供立体/三维地理空间要素格局、过程、模式、规律的表达与分析手段。SceneBAS 是全息位置地图、数字孪生环境等的核心组成部分, 也是支撑地理空间智能的关键技术体系。

未来中国的综合 PNT 体系将是北斗 PNT 为核心, GBAS、SBAS、SceneBAS 集成的全空间综合 PNT 智能服务体系, 是地理信息产业的关键技术支撑, 国内外导航与位置服务企业均在加大研发投入力度。本文系统分析了综合 PNT 场景增强技术的研究进展和面临的挑战, 提出了综合 PNT 场景增强的基本框架, 并展望了未来发展趋势。

## 1 综合 PNT 场景增强技术发展现状

### 1.1 定位场景增强技术现状

定位场景增强, 主要利用地理场景中包含的丰富先验知识如室内地图、拓扑结构、几何结构、图像或点云等, 采用空间约束、地图匹配提升定位精度和稳定性<sup>[25-27]</sup>。目前已有研究可以分为基于地图匹配的定位场景增强、基于空间约束的场景增强、基于环境地标的定位场景增强、基于视觉的定位场景增强等<sup>[28-30]</sup>。

基于地图匹配的辅助定位是定位场景增强最基础的方式之一, 其原理是利用建筑物的二维/三维拓扑结构数据, 通过将行人轨迹与拓扑结构数据进行地图匹配辅助确定用户位置信息。Quddus<sup>[31]</sup>提出空间拓扑结构约束的地图匹配算法; Xiao 等<sup>[32]</sup>提出条件随机场的地图匹配算法来提高定位精度; Zhang 等<sup>[33]</sup>等提出了 GPS/DR (dead reckoning)/MM (map matching) 混合的定位方法, 其中地图匹配 MM 模块利用历史的轨迹信息进行地图匹配来确定位置信息; Ren<sup>[34]</sup>等提出了一种基于隐马尔可夫的地图匹配算法来辅

助车辆导航; 范亚州等<sup>[35]</sup>提出地图信息辅助的多惯导阵列室内定位算法, 通过判断定位点距离路径中心的距离是否越界, 来进行地图信息修正定位轨迹。该类方法的优点是普适性高, 缺点是在空间结构复杂的室内空间或地下空间, 地图匹配的处理速度会极大的降低, 且准确率下降较快。

基于空间约束的辅助室内定位方式, 其核心思想是通过制定一些准则, 例如穿墙约束、航向约束、楼层约束等, 将不符合行人运动规律和模式的定位结果进行剔除。Noh 等<sup>[36]</sup>利用行人轨迹不能穿过墙壁的约束, 通过建筑物空间结构约束行人轨迹, 该方法在空间结构相对复杂的室内定位效果较差; Beauregard 等<sup>[37]</sup>提出了基于空间约束的粒子滤波算法, 其核心是当粒子更新时, 将穿墙粒子权值设为零, 以提高定位结果的准确性。航向信息也是提高室内定位结果精度的重要参考依据, 例如文献[38]使用室内基本结构信息辅助航向解算; Borenstein 等<sup>[39]</sup>提出启发式航向角估算法方法, 利用室内结构信息约束航向; 赵文晔等<sup>[40]</sup>提出了卡尔曼滤波-粒子滤波多重滤波(Kalman filter-particle filter, KF-PF)算法, 其核心是利用陀螺仪数据与地图来解算航向角。但该类方法受限于空间约束规则的制定, 过多依靠专家经验知识, 在不同的定位空间, 空间约束规则的阈值会有较大差异。

基于环境地标的定位场景增强方式主要是利用室内环境的特征、光线的明暗、气压、温湿度的变化、用户的行为特征等辅助进行定位<sup>[41-42]</sup>。Azizyan 等<sup>[43]</sup>提出了基于环境指纹的室内定位方式, 该方法利用不同的室内环境具备不同的环境特征来进行位置定位; Gusenbauer 等<sup>[44]</sup>采用行人运动行为识别作为辅助定位参考信息, 通过惯性传感器识别出用户的行为特征来校正位置估计结果; Grzonka 等<sup>[45]</sup>提出了虚拟地标的概念, 实现室内三维环境的位置追踪和轨迹重构; Hardegger 等<sup>[46]</sup>提出基于虚拟地标构建的 ActionSLAM (action simultaneous localization and mapping), 利用安装在行人身体的多个惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 来实现同时定位与建图, 利用位置相关的行为如开门、坐椅子等作为虚拟地标修正累积误差。Wang 等<sup>[47]</sup>通过智能手机内置的传感器对周围环境与用户运动行为进行感知, 将解算位置与虚拟地标相结合辅助进行室内定位。随着终端搭载的传感器种类不断丰富, 可获取的环境地标要素也随之增多, 基于环境地标



的定位场景增强方式适用性也不断增强。

随着计算机视觉、图像处理、摄影测量等技术的发展,智能手机终端硬件计算能力提高,基于视觉的定位方式逐渐受到广大学者关注。该方法主要利用定位场景中的视觉环境图像信息进行定位,目前基于视觉定位根据相机数量可以分为单目视觉定位、双目视觉定位及多目视觉定位,根据定位原理的不同可以分为基于图像检索的视觉定位、基于视觉里程计的视觉定位等。基于图像检索的视觉定位,其核心是图像特征的统一特征提取与相似度计算,Zemene等<sup>[48]</sup>利用拍摄照片与图像数据库进行匹配获取位置信息;Dash等<sup>[49]</sup>利用颜色、方向梯度直方图(histogram of oriented gradient, HOG)、纹理等实现图像特征融合与匹配;视觉里程计<sup>[50]</sup>是视觉SLAM的视觉前段,根据相邻图像的信息估计出相机的运动特征和姿态,视觉里程计算法根据其实现原理可以划分为二维-二维、二维-三维和三维-三维等类型,特征点法是主流计算方法,一般会将图像的点、边缘、区块等作为图像特征,常用的稳定的局部图像特征有ORB(oriented fast and rotated brief)、SURF(speeded-up robust features)、SIFT(scale invariant feature transform)等特征算子。Lu等<sup>[51]</sup>提出二维-三维的图像匹配模式,利用场景采集的大量照片实现三维重建,从而进行位置姿态估计;Agarwal等<sup>[52]</sup>采用一段轨迹熵的连续多张照片来检索,利用测距方法得到三维点云,进行位置解算。也有学者将惯性传感器引入视觉里程计,提出视觉惯性里程计<sup>[53]</sup>;张星等<sup>[54]</sup>提出一种视觉信息与惯性信息相结合的定位方式,其核心是利用视觉和惯性特征构建行人运动行为特征序列。视觉定位方式的优点是不需要提前部署硬件设施,定位精度高,且不会受到传统定位方式的信号衰减、多径效应的影响,缺点是需要用户持续跟踪拍摄,相片之间要有一定的重合度,缺少特征点的视觉场景是该方法的薄弱区域,而且目前大多依靠人工地标,做到任意的自然地标的视觉定位是未来需要解决的难题。

## 1.2 导航场景增强技术现状

导航是中国位置服务应用、空间站建设、载人航天与探月工程、深空探测、深海探测、高分辨率对地观测等复杂重大工程的重要支撑,导航可以分为车载导航、机器人导航、行人导航、增强现实(augmented reality, AR)导航等,也可分为量子导航、仿生导航、物理场匹配导航、视觉导航

等<sup>[55]</sup>。导航场景增强主要基于先验的二、三维导航地图,利用三维场景感知理解手段,实时获取导航周边环境信息,实时感知运动体位置、速度、姿态等运动参数,辅以智能路径规划算法,满足不同导航主体如人/车/无人机等的不同的实际导航需求,按照导引规律控制运动体到达目的地的技术。目前导航场景增强的相关研究主要集中在导航数据模型与路径规划算法。

在导航数据模型方面,车载导航电子地图的研究历史较早<sup>[56]</sup>,制作流程主要包括外业采集、内业处理、质量检查及审核发布等几个部分,常用导航电子地图格式有GDF(geographical data file)<sup>[57]</sup>、KIWI、SDAL(shared data access library)格式等。近年来,行人导航也受到部分学者的关注<sup>[58-60]</sup>,行人导航主要考虑到人是天然的智能导航体,具有空间认知的能力,行人对空间参考、方位、距离的描述与机器导航存在很大差异,即行人更易于接受相对空间信息的导航指引,例如基于地标的导航中相对远近、相对的方向等信息,因此行人导航数据集的构建大多采用相对度量方式,Fang等<sup>[61]</sup>提出了基于地标的行人导航数据模型(landmark-based pedestrian navigation data model, LPNDM),实现了涵盖公交、地铁等室内外一体化的行人导航;张华兵等<sup>[62]</sup>提出了基于实景显著性的行人导航数据集构建方法,该模型重点建模视觉显著元素、导航环境与视觉增强引导元素等;周沙等<sup>[63]</sup>提出了行人注视方向的估计模型,通过计算智能眼镜采集的注视图像与街景的相似度来估计行人的注视方向。高精度自动驾驶地图是进行无人装备自动驾驶的基础设施,也是实现无人车辆自主导航的重要基础,目前主要的高精度地图数据格式规范有NDS(navigation data standard)<sup>[64]</sup>、OpenDRIVE<sup>[65]</sup>、Lanelets<sup>[66]</sup>等。国内研究学者也提出了不同的数据模型,如Jiang等<sup>[67]</sup>提出清华道路数据模型,张攀等提出的WHU Map Model<sup>[68]</sup>,余卓渊等<sup>[69]</sup>提出了全息高精度导航地图理论模型框架。高精度地图主要的来源包括激光点云、遥感影像、开放街道地图(OpenStreetMap, OSM)、浮动车轨迹数据或其他外业测量车采集手段。目前主要存在的问题为:(1)高精度地图的制作流程很大程度上沿用了传统车载导航地图的传统制作流程,点、线、面、交通规则等交通要素是主要组成部分,未来的高精地图应该更多是面向机器使用,减少机器的语义理解的成本;(2)更新是目前高精度地图

的薄弱环节,且对地理信息与交通信息扩展性与兼容性不足,如果添加新的地理信息,需要很大调整,尤其是对众包更新支持的不足,随着带有高精度采集装置的无人装备数量不断增多,具备众包更新能力是保持高精度地图鲜活的关键。

在导航路径规划算法方面,导航是人类的基本需求,路径规划算法的研究成果非常丰富,如 A\*算法、Dijkstra 算法、遗传算法、粒子束算法、人工势场方法、标号算法、启发式算法、对偶图算法等。针对规模较大的路网的层次化算法,其核心是对图中的顶点与边进行分层,划定目标点的局部区域。当搜索源点附近时,需要考虑路网中的所有路段,当离开局部区域,搜索就在包含重要的路段的高速公路网,如层次公路算法<sup>[70]</sup>、HNR (highway node routing) 算法<sup>[71]</sup>、层次收缩算法<sup>[72]</sup>、TNR (transit-node routing) 算法<sup>[73]</sup>等。在行人导航路径规划方面,刘涛等<sup>[74]</sup>提出了空间认知最优路径算法,利用地标链来取代基于路网的路径规划,并引入了智能仿生算法,如蚁群算法、遗传算法等实现地标链求解。Fang 等<sup>[75]</sup>提出了基于蜂群智能的夜间行人导航路径方法,利用群体智能算法来实现求解多目标优化路径规划问题。基于路网的路径规划算法基本已经成熟,且在生产环境大量部署使用,但是随着无人机、机器人、自动驾驶等不断发展,对路径规划提出了新的需求,目前已有基于二维路网空间的路径规划研究成果,无法直接应用于贯穿室内、室外、地下等三维全空间。已有相关初步研究成果按照搜索方式不同可分为基于搜索路径规划算法、基于采样路径规划算法、基于智能仿生算法路径规划等。

基于搜索的算法沿用了基于路网的路径规划算法,通过空间划分将环境空间映射为节点,采用节点路径搜索实现路径规划<sup>[76]</sup>,通过增加剪枝和跳点方式识别消除对称路径,在保证路径搜索最优的同时提高了路径搜索效率;Theta\*算法<sup>[77]</sup>是 A\*算法的改进算法,通过视线检查扩展节点,改变原有网格搜索方式;Koenig 等<sup>[78]</sup>提出了适用于动态环境的 D\*算法,支持周边环境变化的情况下完成路径搜索任务。但该类算法的缺点是随着周围环境不断扩大,维度的不断增加,搜索节点的户数量不断增大,基于节点搜索算法运算规模会大幅度增加。

基于采样的路径规划算法可以有效减少基于搜索算法的运算规模,如快速拓展随机树 (rapidly-exploring random, RRT) 算法,该类算法具有概率

完整性,无需对空间进行网格划分,通过对空间中的采样点进行碰撞检测,能够有效解决高维空间和复杂约束的路径规划问题。研究学者针对不同解决问题的空间对 RRT 算法进行了优化,例如 Informed RRT\*<sup>[79]</sup>、PQ-RRT\*<sup>[80]</sup>、MOD-RRT\*<sup>[81]</sup>、EB-RRT<sup>[82]</sup>等。此外,常采用的是概率路线图 (probabilistic roadmap, PRM) 算法<sup>[83]</sup>,如 K-PRM<sup>[84]</sup>、S-PRM<sup>[85]</sup>等,该类算法基于随机采样策略构建无向路径图,再利用传统基于节点搜索算法寻找最优路径。该算法是概率完备但不是最优算法。

智能仿生类算法原理对群居动物进化或觅食等社群行为进行模拟,发现社群行为的思想可以最优化问题的解决方法实现求解非线性连续优化问题,如遗传算法<sup>[86]</sup>、蚁群算法<sup>[87]</sup>、进化算法<sup>[88]</sup>、粒子群优化算法<sup>[89]</sup>等。此外,还有学者提出强化学习算法<sup>[90]</sup>、模仿学习算法<sup>[91]</sup>、人工势场算法<sup>[92]</sup>、Voronoi 图搜索算法<sup>[93]</sup>等。

目前导航场景增强主要聚焦于导航数据模型与路径规划算法,但导航场景增强技术不限于此,未来需要导航场景增强更多的需要在无导航地图支撑下的三维场景的快速感知与理解,多个导航主体路径的快速寻优,且无人装备、自动驾驶车辆还需要许多额外的工作,例如轨迹生成、轨迹优化、轨迹预测等。全局路径规划与动态局部轨迹规划协同是未来研究的热点,考虑动力学约束的路径规划算法<sup>[94]</sup>也是未来研究的重点。

### 1.3 授时场景增强技术现状

时间同步是构建精密时间频率系统的关键,航空、电力、能源、机器人等领域对时间同步需求越来越广泛,时间同步精度要求越来越高<sup>[95-96]</sup>。目前已有的时间同步方法主要包括基于光纤、基于激光及基于 GNSS 时间同步等,尽管光纤与激光时间同步精度更高,但是 GNSS 覆盖范围广仍是最为广泛的时间同步方法。建立统一高精度时空基准也是综合 PNT 的基础能力,目前 GNSS 授时主要依靠星载原子钟,授时精度优于 2~100 ns,通过多层级的时间基准时间服务功能与授时终端,实现大范围、高精度时间频率的传递<sup>[97,4]</sup>。考虑到星载原子钟功耗、尺寸、重量和成本等方面,芯片级原子钟成为各国竞相研发的、具有战略意义的装置,芯片原子钟具有低功耗、体积小、精度高的优点,是微型 PNT 的组成部分,但芯片原子钟稳定度与 GNSS 星载原子钟相差两个量级<sup>[98]</sup>。

高精度授时服务与应用场景密切相关,不同行业如通信、交通运输、精密测控等对授时时间



需求与同步组网需求是不同的。目前在授时场景增强方面研究还相对较少,主要聚焦在不同场景之间的时间传递与时间同步方法,以及不同应用场景在空间信息网络时间同步体系构建中动态、多层异构多节点的时间同步需求。杨辉等<sup>[99]</sup>提出了一种光载无线网络的卫星地面基站与软件定义网络控制器的时间同步系统,并阐述了传输模式对时间同步精度的影响,可以有效提高时间同步精度;陈锐志等<sup>[100]</sup>研究了基于骨干网与接入网策略进行时空基准统一的方法,实验结果表明基于通信信号体制可实现10 ns精度量级的时间同步性能;于佳亮等<sup>[101]</sup>提出了广域精确授时(wide-area precise timing, WPT)的概念,并介绍了服务体系及关键技术,仅需要授时服务平台与IP网络支持,提供全球广域高精度授时。

## 2 面临的挑战

1)综合PNT场景增强缺少三维场景计算关键理论支撑。

综合PNT场景增强依赖三维场景计算能力,但目前还极度缺乏相关理论,近年来数字孪生、实景三维等技术飞跃式发展,立体测图能力获得极大提升,但已有三维研究进展大多集中在三维重建、场景点云理解、可视化分析等方面,如通视分析、可视域分析、阴影分析、等高线分析等<sup>[102]</sup>,但该类方法大多聚焦于建筑物表面几何模型与可视化,无法支撑综合PNT场景增强技术落地。究其原因在于,一方面三维场景模型大多依赖三角面建模,如不规则三角网(triangulated irregular network, TIN),其优点是模型精度高,但运算能力弱,模型越精细,三角面的数据几何倍数增长。目前Unreal与Unity3D等游戏引擎都具备亿级三角面渲染可视化能力,但三角面在时空计算方面还缺少有效技术手段。另一方面,三维场景不仅包含几何模型,还有充满几何模型的三维时空数据,如电磁波,该类数据立体时空计算是综合PNT消除多径、提高定位能力的关键。

2)场景复杂性与更新特征给综合PNT场景增强提出巨大挑战。

室内、地下等是综合PNT服务薄弱区域,也是高动态变化的区域,如商场店铺拓扑结构变化、纹理材质变化、矿井采煤面不断推进等,如何及时感知这些场景的动态更新,且场景增强能够根据更新做出调整与优化依然面临巨大挑战。

目前根据更新范围可分为广域版本级更新与局部补丁级更新。从更新手段可分为专业设备更新与众包技术更新,不同的更新策略与更新手段都有各自的优劣,数据采集获取的效率问题都比较高,主要挑战在于更新数据的处理与语义对齐,尤其是更新之后不能降低原来场景的精度。更新也是场景增强的重要任务之一,根据不同场景特点选择最优的更新策略与技术手段,从而保障高质量的综合PNT服务是一个难点问题。

3)有限终端资源难以支撑综合PNT场景增强系统。

目前智能手机终端的硬件计算能力得到大幅提升,但是各类终端的硬件计算能力差别较大,场景增强部分技术实现需要耗费较大的计算资源,如电磁波的三维时空分异、地图匹配辅助定位等对某些有限终端资源开展复杂的场景增强运算仍是挑战,且综合PNT耗费过多资源会降低位置服务应用体验。因此,将部分场景运算功能部署在云端,或引入边缘计算能力是个可行方案,但是如何实现云端-终端协同的场景增强系统仍是需要解决的问题。

## 3 综合PNT场景增强系统基本框架

### 3.1 综合PNT场景增强的建设主体

三维场景是进行综合PNT增强服务的基础数据源,仅二维基础地理信息难以支撑复杂空间综合PNT体系建设,综合PNT场景增强建设应该与中国数字孪生、实景三维战略建设推进一脉相承。数字孪生是物理世界与虚拟世界间一一对应、相互映射、协同交互的复杂巨系统,是复杂空间全要素数字化与全状态实时化,实现物理维度实体世界与信息维度虚拟世界的共生共存,虚实联控。2019年《自然资源部信息化建设总体方案》提出要全面增强自然资源三维动态监测与态势感知能力,推进三维实景数据库建设;2021年《实景三维中国建设技术大纲2021版本》进一步规定了地形级别、城市级别和部件级别实景三维建模内容。

综合PNT场景增强可看做数字孪生的上层知识服务应用,考虑到三维数据保密与隐私保护,综合PNT场景增强系统建设主体应该与数字孪生建设主体尽可能保持一致,大致可以分为以下几个尺度:

1)在广域尺度,综合PNT场景增强的建设主体应该依靠目前在广域尺度大量的测绘成果,目

前还未见有全球尺度的三维场景服务,但是 2 维/2.5 维基础地理信息服务相对比较普及,例如天地图、百度地图、OSM、Mapbox 等,虽然数字孪生在广域低成本数据采集与智能化三维建模更新方面还存在诸多挑战,但是中国在数字高程模型(digital elevation model, DEM)、数字地表模型(digital surface model, DSM)、数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM)等建设成果方面储备较多。

2)在局域尺度,综合 PNT 场景增强系统建设可以依靠目前北斗地基增强站的建设,例如千寻位置提供超过 2 800 个地基增强站的高精度位置服务,一方面地基增强站建设主体测绘数据丰富,另一方面在综合 PNT 增强系统方面建设经验丰富,在增强站数据处理、站点运维、支撑平台、接口文件协议、数据传输方式、智能服务类型、时空解算框架等发面都具有系列的标准规范可以借鉴参考。

3)在微观尺度,具备特定场景的数字孪生单位在数据不泄密的前提下,可以开展综合 PNT 场景增强系统建设,作为模块内嵌到高精度位置服务应用平台之中,为特定应用场景提供位置服务。

### 3.2 综合 PNT 场景增强系统服务层级

综合 PNT 场景增强系统应该具备提供不同细节层次的服务能力,从不同的层级去提高基础定位、导航、授时服务能力,图 1 为综合 PNT 的场景增强系统服务细节层次。由图 1 可知,L0 级是以覆盖场景的二维基础地理信息为数据源,其优点是大部分场景都能够提供二维地图数据,普适

性好,但是综合 PNT 提高的能力有限,该层级主要提供空间约束、地图匹配、拓扑结构、航向限制等的定位场景增强能力。L1 级是以三维场景为基础的综合 PNT 场景增强,三维场景可以提供丰富的语义信息,如环境纹理、三维高度等,支持通过利用环境纹理来消除多径效应,此外基站的部署优化及自适应调控等策略的实施,该级的服务极大地依赖三维场景信息,目前数字孪生的建设方兴未艾,只有部分典型三维场景信息才相对比较完备,且三维场景构建需要耗费大量财力、物力。L2 级是以三维场景为基础,时空数据孪生与基站网络孪生为基础的综合 PNT 场景增强服务,该类服务要以场景的立体时空计算为基础,可以对电磁波等空间连续场数据进行时空计算,涵盖了网络、信号、电磁场、地图等多个层面的一体化融合,该层级可以提供电磁波级别的综合 PNT 场景增强服务,直观展示覆盖盲区,定量化描述电磁波三维时空分异,该类信息支撑综合 PNT 在信道模型层面进行建模,如信道传播模型,无线环境图模型等。L3 级是在 L2 级基础之上提供对场景知识的智能服务能力,场景知识图谱<sup>[103-105]</sup>是表达地理场景各种要素实体之间的关系网络,本质上是一种语义网络,表达了各类实体、概念及其之间的语义关系,将场景信息表达更接近人类知识的形式,为综合 PNT 提供更好的知识智能服务能力。综合 PNT 的智能服务需要将专家知识、用户需求、场景感知等进行有机结合,引入人工智能、深度学习等方法实现综合 PNT 智能服务<sup>[2]</sup>。

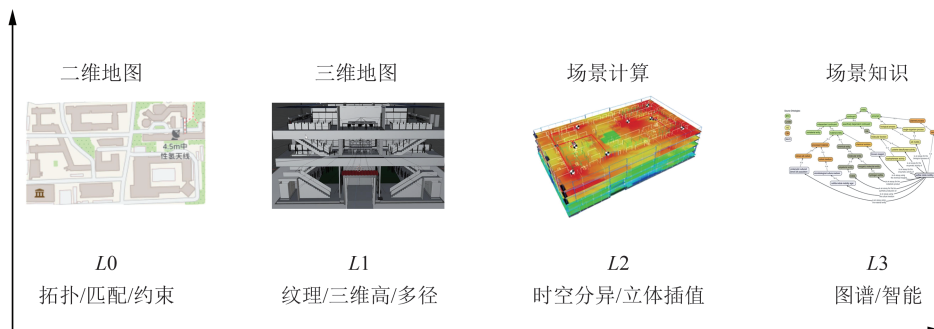


图 1 综合 PNT 的场景增强系统服务细节层次

Fig. 1 Intelligent Services Level of Scene-Based Augmentation System

### 3.3 综合 PNT 场景增强系统架构

综合 PNT 场景增强系统建设系统架构如图 2 所示。最底层为全空间、全要素数字孪生,涵盖三深空间几何模型的数字孪生、时空数据孪生以及综合 PNT 基站网络孪生。几何模型数字孪生应该包含地下、水下、地表、低空等多个空间几何

模型孪生,并支持毛细血管式的全要素采集,如纹理、结构等,并支持实时更新;时空数据孪生涵盖对综合 PNT 有影响的时空数据,如电磁波、温湿度等空间连续场数据的孪生;基站网络孪生应该涵盖对以北斗定位为主,声音、光源、电磁、UWB、地磁等多种定位手段为辅的孪生,并实现

对物理实际基站与数字孪生的双向映射与虚实反馈;以全空间数字孪生为基础,开展L0~L3不同级别的综合PNT服务,研发系列综合PNT场景增强算法,如时空分异、量化表征、多重分形、知识图谱等。在这些核心算子支撑下,开展信道仿真模型、无线环境图模型、误差分析模型及可

行平复方法等研究,实现定位场景增强、导航场景增强、授时场景增强等相关功能,重点解决综合PNT基站部署优化、基站流量预测、基站自适应调节的任务。此外,还需要针对综合PNT场景增强接口文件协议、数据传输方式、智能服务类型、时空解算框架等问题制定相关的标准规范。

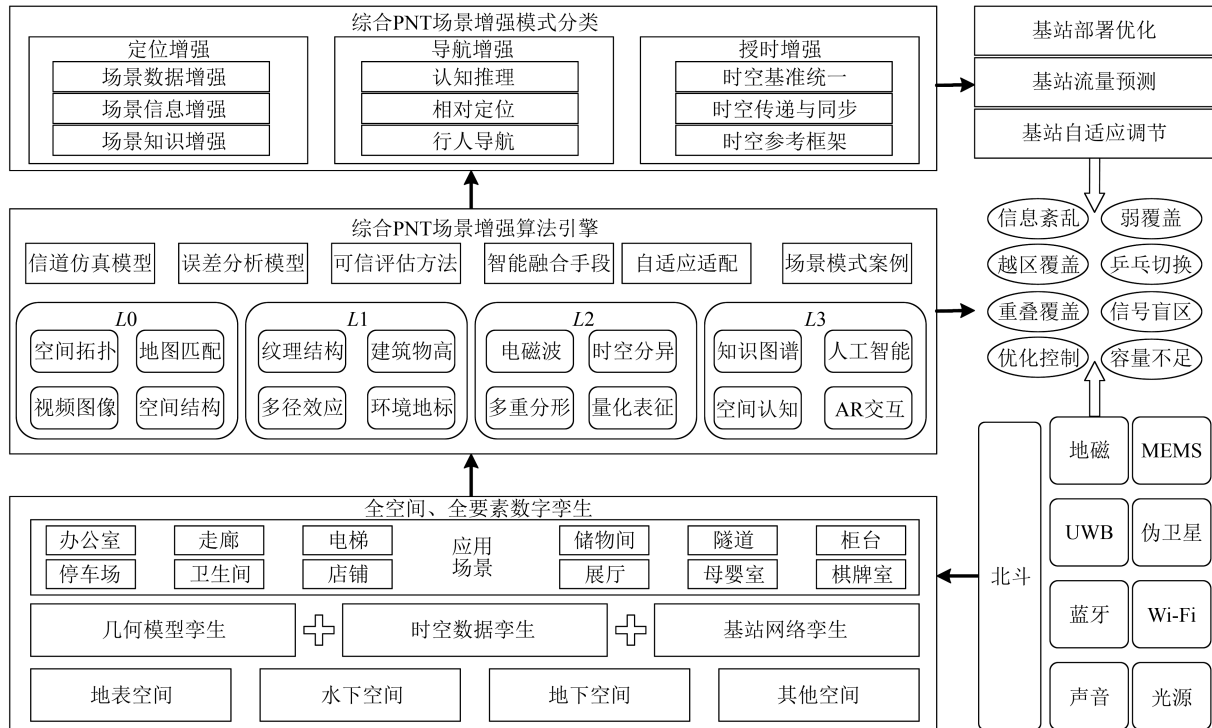


图2 综合PNT场景增强系统架构

Fig.2 Architecture of Scene-Based Augmentation System for Comprehensive PNT

### 3.4 增强系统体系组成及相互关系

综合PNT增强系统及其组成见表1。综合PNT的场景增强系统将使得时空服务更强、覆盖更广、更安全、更可靠。在精度方面,场景增强系统提供的精度增强主要体现在以下几个方面:一方面,场景的环境介质信息的传递,有利于信道模型的构建更加精准,有利于减少信号的多径效应,从而提高定位精度;另一方面,场景拓扑结构、路网等信息增强了定位的地图约束能力,实现定位增强。在完好性方面,场景增强系统能够直观展示三维空间的信号盲区、基站部署、定位精度、定位误差等信息,及时地向用户发出告警能力,有助于快速进行综合PNT故障的识别与剔除,能够极大地提高系统完好性。在连续性方面,场景的感知、识别、理解、计算能力是提高综合PNT连续性的关键,场景增强系统能够保障地上地下、室内室外等一体化无缝定位服务能力,增强空间信号连续性与服务连续性。可用性是面向用户的使用性能指

标,综合PNT场景增强能让用户体验到量化的系统可用性与服务可用性程度,改变传统综合PNT服务用户智能感知到可用与不可用两种状态,但并不能告知可用的概率,例如场景增强可以直观展示单颗或多颗卫星在特定场景的可用性。

表1 综合PNT增强系统体系表

Tab.1 System Table of Augmentation System for Comprehensive PNT

系统	范围	精度	完好性	连续性	可用性
北斗卫星	全球	基本	基本	基本	基本服务
导航系统		精度	服务	服务	
北斗地基增强系统	中国	高精度			增强服务
北斗星基增强系统	中国	较高精度	高完好性		增强服务
北斗+5G/6G	中国/室内外	高精度	高完好性	高连续性	增强服务/扩展服务
场景增强系统	全球/全空间	较高精度	高完好性	高连续性	增强服务



## 4 未来发展趋势

### 4.1 立体时空计算是综合 PNT 场景增强的技术基础

随着互联网技术的不断进步与广域地理信息需求不断延展,地理信息科学正从对地图管理到场景管理,再到精细化的空间单元智能管理转变,经典的地理信息系统(geographic information system, GIS)理论与方法,如空间统计、网络分析、时空挖掘等从二维拓展到三维,数据处理需求从点、线、面二维矢量数据扩展到真三维时空连续场数据,如电磁波、湿度、温度、CO<sub>2</sub>等,数字孪生、实景三维等也会逐渐从可视化需求提升到可计算理论需求,而聚焦于三维计算的立体时空计算将会成为综合 PNT 场景增强的重要技术支撑。例如,可以根据两个不同空间电磁波时空分异进行不同的基站部署与宏观调控优化,从而提高综合 PNT 智能服务质量。

### 4.2 综合 PNT 在多增强系统支撑下进入三深空间

随着定位技术的不断发展,位置服务应用的不断增多,传统 PNT 智能服务的薄弱区域,如地下空间、水下空间、室内空间等,在单一定位手段难以满足定位需求下,场景依赖的智能融合定位方式会是可行的综合 PNT 解决方案。例如智能交通无人驾驶的地下车库-地上空间-遮蔽空间-隧道空间-室内多层车库的全链路无人驾驶导航应用,都需要综合 PNT 具备场景感知识别、知识计算等场景增强能力的支撑。

此外,云定位、云导航等技术能够为综合 PNT 进入三深空间、实现无缝定位能力提供更多的技术支持,传统的定位技术手段满足考虑单个终端定位需求,但如果定位请求达到亿级,为了实现多种定位方式,多种定位终端之间的定位需求,通过云定位实现定位信息共享或定位信号的复用,如何引入人工智能、博弈论等技术手段,实现在体积、功耗、存储、芯片等都差别较大智能手机的自适应终端适配,实现最优的综合 PNT 智能服务是未来需要解决的难点问题。

### 4.3 综合 PNT 智能服务对象对人服务与对机器服务路线逐渐清晰

综合 PNT 是与水、电、道路等同等重要的国家战略基础设施,长期以来,综合 PNT 建设对人服务与对机器服务并没有严格区分,而往往是以对人服务的视角来处理对无人控制机器操作,可以预见的是,未来无人设备的增长速度会几何倍数地超过人口的增长速度,而且综合 PNT 服务是

万物互联时代的亿级规模的 IoT (internet of things) 设备的刚需。设备对综合体 PNT 要求更高,连续性、高精度、可靠性都是设备稳定运行的关键,短暂 PNT 服务失效会给人类带来一定的不便,但是对设备来说却影响巨大,没有定位手段,作为天然导航体的人生活会有不便,但不会停滞。

未来综合 PNT 智能服务的为人服务与为机器服务两条路线会逐渐分离、各自发展壮大,场景增强如何在两条不同的发展脉络中起到作用是未来的研究重点与发展趋势。例如在定位增强方面,行人需要的是具有空间认知功能的相对定位方式,如“我在肯德基的门口左侧”,而机器需要的是能够理解周围电磁波的三维时空分布,环境介质是如何消除定位信号多径效应能提高定位精度。在导航场景增强方面,机器导航所需要的可更新、可交互的高精度自动驾驶地图,并不一定是人可以看懂得的点线面要素组成的地图,行人导航需要的是具备地标特征的相对导航方式,在狭小可视室内空间并不需要跟随式绝对起讫点式导航。

### 4.4 弹性可伸缩是综合 PNT 智能服务的关键

弹性可伸缩是未来综合 PNT 必备特征,场景增强是实现普适综合 PNT 智能服务的关键,未来综合 PNT 需要考虑应用场景的不同,如疫情防控、无人物流、地下矿井、自动驾驶等,定位精度并不是唯一考量因素,定位精度、定位时延、定位成本及定位容量等都是在进行多样化 PNT 智能服务业务应用需要权衡的要素,应该提供全局最优的 PNT 方案,同时顾及硬件设施成本。在各种定位技术成熟度的基础之上,并不需要对所有场景实现厘米级的覆盖,而应该在场景增强基础之上实现弹性可伸缩的综合 PNT 是未来的发展方向。

弹性可伸缩可以体现在以下两个方面:一方面是指多源 PNT 信息依据场景不同的弹性融合,以综合 PNT 信息为基础,根据场景特点,进行多种定位手段的弹性集成(如声、光、电、磁等),提高 PNT 的可用性、连续性及可靠,例如相邻的两个房间采用的定位方案可能是不同的,但从用户的角度是透明的、无感的,综合 PNT 提供的服务是相对稳定的。另一方面是指在综合 PNT 基站部署相对固定的条件下,综合考虑用电、成本、场景等特征,实现基站的自适应宏观调控优化,例如基站天线方位角和下倾角配置参数直接影响综合 PNT 的覆盖性能,传统网络优化方法主要依赖网络优化人员的经验知识,该方法存在主观性

较强、精确度较低、无法及时调整,需要过高的人力成本,依据场景增强实现自组织网络功能覆盖优化是一个难点问题。

#### 4.5 标准规范制定有助于综合PNT多增强系统建设

场景增强的标准规范建设是综合PNT场景增强系统建设走向落地的关键,场景增强涉及多个领域、多个行业,需要统一设计、建设和应用的标准。场景增强该如何建设,如何落地,数据接口标准、运维服务标准、测试标准、安全保密标准等都亟需通过标准体系建设进行明确,规范场景增强系统的设计、建设、运行、维护、服务和应用的工作,构建微场景增强案例样板库,立足“统一、通用、共享”建设要求,制定发布标准规范,建立一批场景增强系统的系统技术标准知识产权还需要许多研究工作。

## 5 结论与展望

构建泛在、融合、智能的综合时空体系属于中国重大的应用需求,中国综合PNT体系建设稳步推进,地基增强、天基增强、低轨增强系统逐渐完善,声、光、电、磁、UWB、伪卫星等多种定位技术飞速发展,但是综合PNT进入到地下、水下、室内等GNSS薄弱区域,受限于该类区域环境特征复杂、拓扑结构多样等,尚没有单一定位手段能够提供普适、稳定、连续的无缝PNT服务,笔者认为越到微观区域,综合PNT智能服务与复杂场景密切相关,提出新的场景增强系统,完善综合PNT的增强服务体系。

本文从定位增强、导航增强、授时增强等3个方面系统梳理了国内外技术研究现状,并指出了目前综合PNT场景增强系统面临的挑战,缺少场景计算相关理论、场景复杂及更新问题及有限终端计算资源难以支撑场景增强实现,给出了综合PNT场景增强系统的基本框架,阐述了与目前中国数字孪生、实景三维建设的关系,给出了L0到L3级别的场景增强服务层级,提出了场景增强系统建设基本架构。展望了综合PNT场景增强系统未来的发展趋势,立体时空计算理论、弹性可伸缩的综合PNT网络体系、未来综合PNT对人服务与对机器服务两条主线,并强调了综合PNT场景增强体系标准规范建设的重要性。中国的综合PNT服务体系在地基增强、天基增强、低轨增强以及场景增强的支撑之下终将进入深空、深地、深海三深空间,实现PNT智能服务应用的高精度与高效率,确保综合PNT服务性能的精确

性、连续性、完好性和高效性。

综合PNT场景增强系统研究才刚刚起步,场景增强系统该如何建设,云端如何提供增强服务,边缘计算如何提升增强计算能力,终端如何享受增强服务,尚未有场景增强系统标准规范,但综合PNT未来智能服务离不开场景感知计算,还有许多的研究内容需要开展。

## 参 考 文 献

- [1] Yao Yibin, Yang Yuanxi, Sun Heping, et al. Geodesy Discipline: Progress and Perspective[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(10): 1243-1251. (姚宜斌, 杨元喜, 孙和平, 等. 大地测量学科发展现状与趋势[J]. 测绘学报, 2020, 49(10): 1243-1251.)
- [2] Yang Yuanxi, Yang Cheng, Ren Xia. PNT Intelligent Services [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8): 1006-1012. (杨元喜, 杨诚, 任夏. PNT智能服务[J]. 测绘学报, 2021, 50(8): 1006-1012.)
- [3] Yang Yuanxi. Concepts of Comprehensive PNT and Related Key Technologies [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(5): 505-510. (杨元喜. 综合PNT体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016, 45(5): 505-510.)
- [4] Yang Yuanxi, Li Xiaoyan. Micro-PNT and Comprehensive PNT [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1249-1254. (杨元喜, 李晓燕. 微PNT与综合PNT[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1249-1254.)
- [5] National Technical Committee on BeiDou Navigation Satellite System of Standardization. Technical Specification for Reference Station Construction and Acceptance of BeiDou Ground-Based Augmentation System—Part 1: Construction Specification. GB/T 39772.1-2021 [S/OL]. [2021-03-09]. <https://openstd.samr.gov.cn/bz/gk/gb/newGbInfo?heno=F27AD8276452D2DEB4FA576F9E234FDC>. (全国北斗卫星导航标准化技术委员会. 北斗地基增强系统基准站建设和验收技术规范, 第1部分:建设规范, GB/T 39772.1-2021 [S/OL]. [2021-03-09]. <https://openstd.samr.gov.cn/bz/gk/gb/newGbInfo?heno=F27AD8276452D2DEB4FA576F9E234FDC>.)
- [6] Yang Yuanxi, Ren Xia. Ultra-High Precision Positioning [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, 35(3): 410-412. (杨元喜, 任夏. 超高精度定位[J]. 中国科学基金, 2021, 35(3): 410-412.)
- [7] Koivisto M, Talvitie J, Costa M, et al. Joint

- cmWave-Based Multiuser Positioning and Network Synchronization in Dense 5G Networks[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Barcelona, Spain, 2018.
- [8] Cao Z P, Chen R Z, Guo G Y, et al. IBaby: A Low Cost BLE Pseudolite Based Indoor Baby Care System[C]// Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services (UPINLBS), Wuhan, China, 2018.
- [9] Guo G Y, Chen R Z, Ye F, et al. Indoor Smartphone Localization: A Hybrid WiFi RTT-RSS Ranging Approach [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 176767-176781.
- [10] Liu K K, Liu X X, Li X L. Guoguo: Enabling Fine-Grained Smartphone Localization via Acoustic Anchors[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2016, 15(5): 1144-1156.
- [11] Ruotsalainen L, Kuusniemi H, Bhuiyan M Z H, et al. A Two-Dimensional Pedestrian Navigation Solution Aided with a Visual Gyroscope and a Visual Odometer [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17 (4) : 575-586.
- [12] Gan X L, Yu B G, Heng Z, et al. Indoor Combination Positioning Technology of Pseudolites and PDR [C]// Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services (UPINLBS), Wuhan, China, 2018.
- [13] Kuang J, Niu X J, Zhang P, et al. Indoor Positioning Based on Pedestrian Dead Reckoning and Magnetic Field Matching for Smartphones [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, 18(12): 4142.
- [14] Chen Ruizhi, Guo Guangyi, Ye Feng, et al. Tightly-Coupled Integration of Acoustic Signal and MEMS Sensors on Smartphones for Indoor Positioning [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50 (2): 143-152. (陈锐志, 郭光毅, 叶锋, 等. 智能手机音频信号与MEMS传感器的紧耦合室内定位方法[J]. *测绘学报*, 2021, 50(2): 143-152.)
- [15] Chen Guoliang, Zhang Yanzhe, Wang Yunjia, et al. Unscented Kalman Filter Algorithm for WiFi-PDR Integrated Indoor Positioning [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44 (12) : 1314-1321. (陈国良, 张言哲, 汪云甲, 等. WiFi-PDR室内组合定位的无迹卡尔曼滤波算法[J]. *测绘学报*, 2015, 44(12): 1314-1321.)
- [16] Sun Jianqiang, Shang Junna, Shi Huli. PDR-Assisted UWB Indoor Non-line of Sight Positioning Method [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2020, 33(5): 711-717. (孙建强, 尚俊娜, 施浒立. PDR辅助UWB的室内非视距定位方法[J]. *传感技术学报*, 2020, 33(5): 711-717.)
- [17] Fu Tingqiang. Research on Integrated Navigation and Positioning Algorithm Based on GNSS/IMU/Visual Multi-sensor Fusion [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. (付廷强. 基于GNSS/IMU/视觉多传感融合的组合导航定位算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.)
- [18] Gao Jingxiang, Chang Mengyang. Geomagnetism and PDR Location Algorithm Based on Smart Phone [J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2020, 43 (4): 1-4. (高井祥, 常梦阳. 基于智能手机的地磁与PDR定位算法[J]. *现代测绘*, 2020, 43(4): 1-4.)
- [19] Zhang Peng, Zhao Qile, Li You, et al. PDR/WiFi Fingerprinting/Magnetic Matching-Based Indoor Navigation Method for Smartphones [J]. *Journal of Geomatics*, 2016, 41(3): 29-32. (张鹏, 赵齐乐, 李由, 等. 基于PDR、WiFi指纹识别、磁场匹配组合的室内行人导航定位[J]. *测绘地理信息*, 2016, 41(3): 29-32.)
- [20] Fan S K, Wu Y Z, Han C, et al. A Structured Bidirectional LSTM Deep Learning Method for 3D Terahertz Indoor Localization [C]// IEEE Conference on Computer Communications, Toronto, Canada, 2020.
- [21] Ma T, Xiao Y, Lei X, et al. Indoor Localization with Reconfigurable Intelligent Surface [J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(1): 161-165.
- [22] Lin Z P, Lü T J, Mathiopoulos P T. 3D Indoor Positioning for Millimeter-Wave Massive MIMO Systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(6): 2472-2486.
- [23] Lü Guonian, Yu Zhaoyuan, Yuan Linwang, et al. Is the Future of Cartography the Scenario Science? [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20 (1): 1-6. (闰国年, 俞肇元, 袁林旺, 等. 地图学的未来是场景学吗? [J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(1): 1-6.)
- [24] Yu Baoguo, Bao Yachuan, Yang Menghuan, et al. Conceptual Framework and Research Progress on Communication and Navigation Integration [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2022, 9(2): 1-14. (蔚保国, 鲍亚川, 杨梦焕, 等. 通导一体化概念框架与关键技术研究进展 [J]. *导航定位与授时*, 2022, 9(2): 1-14.)
- [25] Gu F Q, Hu X K, Ramezani M, et al. Indoor Localization Improved by Spatial Context—A Survey [J]. *ACM Computing Surveys*, 2020, 52(3): 1-35.
- [26] Nessa A, Adhikari B, Hussain F, et al. A Survey of Machine Learning for Indoor Positioning [J].



- IEEE Access*, 2020, 8: 214945-214965.
- [27] Li Qingquan, Zhou Baoding, Ma Wei, et al. Research Process of GIS-Aided Indoor Localization [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(12): 1498-1506. (李清泉, 周宝定, 马威, 等. GIS辅助的室内定位技术研究进展[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1498-1506.)
- [28] Davidson P, Piché R. A Survey of Selected Indoor Positioning Methods for Smartphones [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(2): 1347-1370.
- [29] Simões W C, Machado G S, Sales A M, et al. A Review of Technologies and Techniques for Indoor Navigation Systems for the Visually Impaired [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(14): 3935.
- [30] Zhou B D, Li Q Q, Mao Q Z, et al. ALIMC: Activity Landmark-Based Indoor Mapping via Crowdsourcing [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(5): 2774-2785.
- [31] Quddus M A. Current Map-Matching Algorithms for Transport Applications: State of the Art and Future Research Directions [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2007, 15(5): 312-328.
- [32] Xiao Z L, Wen H K, Markham A, et al. Lightweight Map Matching for Indoor Localisation Using Conditional Random Fields[C]//The 13th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, Berlin, Germany, 2014.
- [33] Zhang X G, Wang Q, Wan D J. Map Matching in Road Crossings of Urban Canyons Based on Road Traverses and Linear Heading-Change Model [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(6): 2795-2803.
- [34] Ren M, Karimi H A. A Hidden Markov Model-Based Map-Matching Algorithm for Wheelchair Navigation [J]. *Journal of Navigation*, 2009, 62(3): 383-395.
- [35] Fan Yazhou, Guan Qi, Ding Derui. Indoor Positioning Method of Multi-inertial Navigation Array Based on Map Matching Assistance [J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2020, 10(4): 203-207. (范亚州, 管启, 丁德锐. 基于地图匹配辅助的多惯导阵列的室内定位方法[J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(4): 203-207.)
- [36] Noh Y, Yamaguchi H, Lee U. Infrastructure-Free Collaborative Indoor Positioning Scheme for Time-Critical Team Operations [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, 48(3): 418-432.
- [37] Beauregard S, Widyawan, Klepal M. Indoor PDR Performance Enhancement Using Minimal Map Information and Particle Filters [C]// IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Monterey, USA, 2008.
- [38] Khairi A, Chris H, Terry M, et al. Integrating Low Cost IMU with Building Heading in Indoor Pedestrian Navigation [J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2011, 10(1): 30-38.
- [39] Borenstein J, Ojeda L. Heuristic Drift Elimination for Personnel Tracking Systems [J]. *Journal of Navigation*, 2010, 63(4): 591-606.
- [40] Zhao Wenyue, Gao Jingxiang, Li Zengke, et al. An Indoor Positioning System Based on Map-Aided KF-PF Module [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(5): 806-812. (赵文晔, 高井祥, 李增科, 等. 地图匹配辅助的KF-PF室内定位算法模型 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(5): 806-812.)
- [41] Zhou Baoding, Li Qingquan, Mao Qingzhou, et al. User Activity Awareness Assisted Indoor Pedestrian Localization [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(6): 719-723. (周宝定, 李清泉, 毛庆洲, 等. 用户行为感知辅助的室内行人定位 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(6): 719-723.)
- [42] Zhou B D, Li Q Q, Mao Q Z, et al. Activity Sequence-Based Indoor Pedestrian Localization Using Smartphones [J]. *IEEE Transactions on Human Machine Systems*, 2015, 45(5): 562-574.
- [43] Azizyan M, Constandache I, Choudhury R R. SurroundSense: Mobile Phone Localization via Ambience Fingerprinting [C]//The 15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Beijing, China, 2009.
- [44] Gusenbauer D, Isert C, Krösche J. Self-contained Indoor Positioning on Off-the-Shelf Mobile Devices [C]// International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Zurich, Switzerland, 2010.
- [45] Grzonka S, Karwath A, Dijoux F, et al. Activity-Based Estimation of Human Trajectories [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(1): 234-245.
- [46] Hardegger M, Roggen D, Mazilu S, et al. Action-SLAM: Using Location-Related Actions as Landmarks in Pedestrian SLAM [C]// International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Sydney, Australia, 2013.
- [47] Wang H, Sen S, Elgohary A, et al. No Need to War-Drive: Unsupervised Indoor Localization [C]//

- The 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, Low Wood Bay, Lake District, UK, 2012.
- [48] Zemene E, Tesfaye Y T, Idrees H, et al. Large-Scale Image Geo-localization Using Dominant Sets [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, 41(1): 148-161.
- [49] Dash P P, Patra D. Efficient Visual Tracking Using Multi-feature Regularized Robust Sparse Coding and Quantum Particle Filter Based Localization [J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, 10(2): 449-462.
- [50] Sattler T, Leibe B, Kobbelt L. Efficient & Effective Prioritized Matching for Large-Scale Image-Based Localization [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 39(9): 1744-1756.
- [51] Lu G Y, Kambhmettu C. Image-Based Indoor Localization System Based on 3D SfM Model [C]// IS&T/SPIE Electronic Imaging, San Francisco, California, USA, 2014.
- [52] Agarwal P, Burgard W, Spinello L. Metric Localization Using Google Street View [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, Germany, 2015.
- [53] Forster C, Carlone L, Dellaert F, et al. On-manifold Preintegration for Real-Time Visual: Inertial Odometry [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(1): 1-21.
- [54] Zhang Xing, Liu Tao, Sun Longpei, et al. A Visual-Inertial Collaborative Indoor Localization Method for Multiple Moving Pedestrian Targets [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(5): 672-680. (张星, 刘涛, 孙龙培, 等. 一种视觉与惯性协同的室内多行人目标定位方法 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(5): 672-680.)
- [55] Guo Lei, Fang Jiancheng. Recent Prospects on some Problems of Navigation Guidance and Sensing Technology [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2017, 47(9): 1198-1208. (郭雷, 房建成. 导航制导与传感技术研究领域若干问题的思考与展望 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2017, 47(9): 1198-1208.)
- [56] Li Deren, Li Qingquan, Yang Bisheng, et al. Techniques of GIS, GPS and RS for the Development of Intelligent Transportation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(4): 331-336. (李德仁, 李清泉, 杨必胜, 等. 3S技术与智能交通 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2008, 33(4): 331-336.)
- [57] Kim T J, Choi K. GIS for Transportation [M]. Heidelberg: Springer, 2012.
- [58] Fang Zhixiang, Xu Hong, Xiao Shilun, et al. Pedestrian Navigation Research Trend: From Absolute Space to Relative Space-Based Approach [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2173-2182. (方志祥, 徐虹, 萧世伦, 等. 绝对空间定位到相对空间感知的行人导航研究趋势 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(12): 2173-2182.)
- [59] Liu T, Zhang X, Li Q Q, et al. A Visual-Based Approach for Indoor Radio Map Construction Using Smartphones [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2017, 17(8): 1790.
- [60] Han Qin, Curtin M K, Rice M T. Pedestrian Network Repair with Spatial Optimization Models and Geocrowd Sourced Data [J]. *GeoJournal*, 2018, 83: 347 - 364.
- [61] Fang Z X, Li Q Q, Zhang X, et al. A GIS Data Model for Landmark-Based Pedestrian Navigation [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012, 26(5): 817-838.
- [62] Zhang Huabing, Fang Zhixiang, Guo Yihan, et al. A Saliency-Based Pedestrian Navigation Data Model [J]. *Journal of Geomatics*, 2015, 40(3): 57-59. (张华兵, 方志祥, 郭翌寒, 等. 基于实景显著性的行人导航数据模型 [J]. *测绘地理信息*, 2015, 40(3): 57-59.)
- [63] Zhou Sha, Niu Jiqiang, Xu Feng, et al. Estimating Gaze Directions for Pedestrian Navigation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(5): 700-705. (周沙, 牛继强, 徐丰, 等. 面向行人导航的注视方向估计模型 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(5): 700-705.)
- [64] Navigation Data Standard (NDS) Community. NDS Open Lane Model [EB/OL]. [2022-01-09]. <https://www.openlanemodel.org/>.
- [65] Association for Standardization of Automation and Measuring Systems. OpenDRIVE 1.6 [EB/OL]. [2022-01-09]. [https://releases.asam.net/OpenDRIVE/1.6.0/ASAM\\_OpenDRIVE\\_BS\\_V1-6-0.html](https://releases.asam.net/OpenDRIVE/1.6.0/ASAM_OpenDRIVE_BS_V1-6-0.html).
- [66] Bender P, Ziegler J, Stiller C. Lanelets: Efficient Map Representation for Autonomous Driving [C]// IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, Dearborn, USA, 2014.
- [67] Jiang K, Yang D, Liu C. A Flexible Multi-layer Map Model Designed for Lane-Level Route Planning in Autonomous Vehicles [J]. *Engineering*, 2019, 5

- (2): 305-318.
- [68] Zhang Pan, Liu Jingnan. A Generalized Data Model of High Definition Maps [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(11): 1432-1446. (张攀, 刘经南. 通用化高精地图数据模型[J]. 测绘学报, 2021, 50(11): 1432-1446.)
- [69] Yu Zhuoyuan, Lü Guonian, Zhang Xining, et al. Pan-Information-Based High Precision Navigation Map: Concept and Theoretical Model [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(4): 760-771. (余卓渊, 闰国年, 张夕宁, 等. 全息高精度导航地图: 概念及理论模型[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 760-771.)
- [70] Sanders P, Schultes D. Highway Hierarchies Hasten Exact Shortest Path Queries [C]// European Symposium on Algorithms, Berlin, El Paso, Texas, USA, 2005.
- [71] Schultes D, Sanders P. Dynamic Highway-Node Routing [M]// Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [72] Geisberger R, Sanders P, Schultes D, et al. Contraction Hierarchies: Faster and Simpler Hierarchical Routing in Road Networks [M]// Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [73] Bast H, Funke S, Matijevic D, et al. In Transit to Constant Time Shortest-Path Queries in Road Networks [C]// Meeting on Algorithm Engineering & Experiments, New Orleans, Louisiana, 2007.
- [74] Liu Tao, Zhang Xing, Li Qingquan, et al. An Indoor Pedestrian Route Planning Algorithm Based on Landmark Visibility [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(1): 43-48. (刘涛, 张星, 李清泉, 等. 顾及地标可视性的室内导航路径优化算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(1): 43-48.)
- [75] Fang Z X, Li L, Li B J, et al. An Artificial Bee Colony-Based Multi-objective Route Planning Algorithm for Use in Pedestrian Navigation at Night [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(10): 2020-2044.
- [76] Tong Y C, Wu H Y, Zheng X J, et al. Fast Jump Point Search Based Path Planning for Mobile Robots [C]// The 4th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS), Wuhan, China, 2021.
- [77] De Filippis L, Guglieri G, Quagliotti F. Path Planning Strategies for UAVS in 3D Environments [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, 65(1): 247-264.
- [78] Koenig S, Likhachev M. Fast Replanning for Navigation in Unknown Terrain [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(3): 354-363.
- [79] Gammell J D, Srinivasa S S, Barfoot T D. Informed RRT\*: Optimal Sampling-Based Path Planning Focused via Direct Sampling of an Admissible Ellipsoidal Heuristic [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Chicago, USA, 2014.
- [80] Li Yanjie. PQ-RRT\*: An Improved Path Planning Algorithm for Mobile Robots [J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 152: 113425.
- [81] Qi J, Yang H, Sun H X. MOD-RRT\*: A Sampling-Based Algorithm for Robot Path Planning in Dynamic Environment [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(8): 7244-7251.
- [82] Wang J K, Meng M Q H, Khatib O. EB-RRT: Optimal Motion Planning for Mobile Robots [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2020, 17(4): 2063-2073.
- [83] Yan F, Liu Y S, Xiao J Z. Path Planning in Complex 3D Environments Using a Probabilistic Roadmap Method [J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2013, 10(6): 525-533.
- [84] Karaman S, Frazzoli E. Sampling-Based Algorithms for Optimal Motion Planning [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2011, 30(7): 846-894.
- [85] Pettersson P O, Doherty P. Probabilistic Roadmap Based Path Planning for an Autonomous Unmanned Helicopter [J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology*, 2006, 17(4): 395-405.
- [86] Pehlivanoglu Y V, Baysal O, Hacıoglu A. Path Planning for Autonomous UAV via Vibrational Genetic Algorithm [J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2007, 79(4): 352-359.
- [87] He Y F, Zeng Q H, Liu J Y, et al. Path Planning for Indoor UAV Based on Ant Colony Optimization [C]// The 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Guiyang, China, 2013.
- [88] Hasircioglu I, Topcuoglu H R, Ermis M. 3-D Path Planning for the Navigation of Unmanned Aerial Vehicles by Using Evolutionary Algorithms [C]// The 10th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, Atlanta, GA, USA, 2008.
- [89] Leng Foo J, Knutzon J, Kalivarapu V, et al. Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles Using B-Splines and Particle Swarm Optimization [J]. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2009, 6(4): 271-290.
- [90] Kober J, Bagnell J, Peters J. Reinforcement Learning in Robotics: A Survey [J]. *The International Jour-*



- nal of Robotics Research*, 2013, 32: 1238-1274.
- [91] Hussein A, Gaber M M, Elyan E, et al. Imitation Learning: A Survey of Learning Methods[J]. *ACM Computing Surveys*, 2018, 50(2): 1-35.
- [92] Orozco-Rosas U, Montiel O, Sepúlveda R. Mobile Robot Path Planning Using Membrane Evolutionary Artificial Potential Field[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 77(C): 236-251.
- [93] Wang J K, Meng Q H. Optimal Path Planning Using Generalized Voronoi Graph and Multiple Potential Functions [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(12): 10621-10630.
- [94] Zhou B, Gao F, Wang L, et al. Robust and Efficient Quadrotor Trajectory Generation for Fast Autonomous Flight[J]. *arXiv*, 2019, DOI: 1907.01531
- [95] Li X X, Ge M R, Zhang H P, et al. A Method for Improving Uncalibrated Phase Delay Estimation and Ambiguity-Fixing in Real-Time Precise Point Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87: 405-416.
- [96] Ge M R, Chen J P, Douša J, et al. A Computationally Efficient Approach for Estimating High-Rate Satellite Clock Corrections in Realtime [J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(1): 9-17.
- [97] Liu Jingnan, Chen Guanxu, Zhao Jianhu, et al. Development and Trends of Marine Space-Time Frame Network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(1): 17-37. (刘经南, 陈冠旭, 赵建虎, 等. 海洋时空基准网的进展与趋势[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(1): 17-37.)
- [98] Yuan Hong, Chen Xiao, Luo Ruidan, et al. Review of the Development Trend of LEO-Based Navigation System[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2022, 9(1): 1-11. (袁洪, 陈潇, 罗瑞丹, 等. 对低轨导航系统发展趋势的思考[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(1): 1-11.)
- [99] Yang Hui, Yu Baoguo, Wang Zhengyong, et al. Research on Clock Synchronization Technology in Space Information Network[J]. *Radio Engineering*, 2018, 48(3): 173-177. (杨辉, 蔚保国, 王正勇, 等. 空间信息网络时间同步技术研究[J]. 无线工程, 2018, 48(3): 173-177.)
- [100] Chen Ruizhi, Yu Baoguo, Wang Fuhong, et al. Orbit Determination and Time Synchronization of Spatial Information Network Combining Sparse Regional Ground Stations [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(9): 1211-1221. (陈锐志, 蔚保国, 王甫红, 等. 联合少量地面控制源的空间信息网轨道确定与时间同步[J]. 测绘学报, 2021, 50(9): 1211-1221.)
- [101] Yu Jialiang, Shi Chuang, Zhang Dong, et al. Wide-Area Accurate Timing Technology and Its Application [J]. *Telecom Engineering Technics and Standardization*, 2020, 33(8): 82-87. (于佳亮, 施闯, 张东, 等. 广域精确授时技术及其应用[J]. 电信工程技术与标准化, 2020, 33(8): 82-87.)
- [102] Li Qingquan, Shao Chengli, Wan Jianhua, et al. Superior Photogrammetry and Ubiquitous Real 3D Data Collection: A Case Study of Real 3D Qingdao [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1587-1597. (李清泉, 邵成立, 万剑华, 等. 优视摄影测量与泛在实景三维数据采集: 以实景三维青岛为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1587-1597.)
- [103] Lu Feng, Yu Li, Qiu Peiyuan. On Geographic Knowledge Graph [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(6): 723-734. (陆锋, 余丽, 仇培元. 论地理知识图谱[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(6): 723-734.)
- [104] Zhu Yunqiang, Sun Kai, Hu Xiumian, et al. Research and Practice on the Framework for the Construction, Sharing, and Application of Large-Scale Geoscience Knowledge Graphs [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2022, DOI: 10.12082/dqxxkx.2022.210696. (诸云强, 孙凯, 胡修棉, 等. 大规模地球科学知识图谱构建与共享应用框架研究与实践[J]. 地球信息科学学报, 2022, DOI: 10.12082/dqxxkx.2022.210696.)
- [105] Zhou Chenghu, Wang Hua, Wang Chengshan, et al. Research on Geo-knowledge Map in the Age of Big Data [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2021, 51(7): 1070-1079. (周成虎, 王华, 王成善, 等. 大数据时代的地学知识图谱研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(7): 1070-1079.)