

移动地理信息系统技术发展的三个时代

乔彦友, 常原飞

中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101

摘要: 为了明晰的理清移动地理信息系统技术发展脉络, 本文简述了信息技术变革是如何推动该技术向嵌入式时代、移动互联网时代、智能物联网时代不断演变, 并依次分析了每个时代的技术架构及其典型应用, 在此基础上提出了集成全球导航定位、5G、人工智能和计算机视觉等信息技术于一体的新一代移动地理信息系统概念, 分析了其具备的泛在化、实时化、智能化特征, 论述了支撑三大特征的跨平台内核、同步定位与全息高精度导航地图、语义地图和智能决策三种核心技术, 总结其发展和应用的变化趋势, 并对其前景进行了展望, 对后续移动 GIS 的发展有一定的指导意义。

关键词: 移动地理信息系统, 人工智能, 无人机遥感, 物联网, 云计算, 边缘计算, 智慧行业

1 引言

地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 的概念和基础是地理和测绘, 但它的技术支撑是计算机技术 (龚健雅, 2004), 因此几乎每一次信息技术的重要进展都带动了 GIS 技术的重大进步, 移动 GIS (Mobile GIS, MGIS) (Ness, 1993) 的出现和发展也是如此。起初, 人们把用户 (终端设备) 处于移动情况下使用的 GIS 称为 MGIS (赵文斌等, 2003), 但实际上 MGIS 的定义多种多样, 随着新技术的发展也在不断变化 (陈飞翔, 2006)。

20 世纪 90 年代末, 随着美国全球定位系统

(Global Positioning System, GPS) 部署完成, 为了方便野外数据采集, 桌面版 GIS 系统信息采集相关的功能向 PDA (Personal Digital Assistant) 等嵌入式设备上移植和运行, MGIS 进入了与 GPS 结合的“嵌入式时代”。在这一时期, 单机版 MGIS 在国土、林业、测绘等多个行业的外业数据采集中得到了成功的应用。虽然此时的 MGIS 也有一些在线功能 (田根等, 2004), 但当时移动网络的带宽还不足以支撑高频度的网络 GIS 服务。

随着 3G/4G 等宽带移动网络兴起和智能移动终端 (特别是 Android 手机) 的普及, MGIS 逐步从以 GNSS (Global Navigation Satellite System, 全球卫

星导航系统)为核心的时代进入了以无线通信网络为核心的“移动互联网时代”。该时代最典型的应用是谷歌、百度等电子地图服务商开发的地图类 APP 和及其相关的 LBS (Location Based Services) (卜健等, 2004) 类 APP。这时的 MGIS 已经延伸到了整个地理信息产业链, 涉及数据采集、数据处理、平台软件、行业应用等多个层面, “云+端”构成了地理信息的新生态。但是由于云计算存在欠实时、带宽不足、能耗大、不利于数据安全和隐私等问题, 本时代的 MGIS 业务仍然处于传统的人工地面操作阶段, 难以提供实时的空间分析、目标识别等智能化处理。

随着物联网 (Internet of Things, IOT) 的泛在化 (Ubiquitous) 发展, 特别是计算机视觉 (Computer Vision, CV)、人工智能 (Artificial Intelligence, AI)、5G 移动通讯、边缘计算 (Edge Computing) 等技术的发展, 2019 年前后 MGIS 技术逐步进入“智能物联网时代”。这个阶段主要技术特征是智能、实时、GIS 泛在化, 系统架构演化为“云+边+端” (刘继军等, 2020)。本时代人人都是传感器和绘图者, 涌现出大量的集成在地面移动平台 (可穿戴设备、车辆等) 和空中移动平台 (无人机等) 上的摄像头、雷达等智能传感器, 能够帮助我们定位并提供声光电磁等全息地图 (Holographic Maps) 信息, 这些物联网终端都可以作为 MGIS 的运行载体, 其采集的图片、视频、位置等数据不再全部上传云端, 而是通过 AI 等技术, 将海量的原始数据在网络边缘

设备上进行实时的智能分析处理, 仅将结果传输到云端。这种模式极大的减轻了网络带宽和数据中心功耗的压力, 有效降低了系统延迟, 增强了服务响应能力; 同时由于用户不再上传隐私或敏感数据 (只存储于网络边缘设备上), 极大减少了网络数据泄露的风险, 保护了用户数据安全和隐私。

可以看出, 随着信息技术的不断发展, MGIS 在硬件平台、系统架构、主要特征、典型用户都发生了较为明显的变迁, 可以清晰的划分为嵌入式、移动互联网、智能物联网三个时代, 对比见表 1:

表 1 MGIS 三个时代对比

Table 2 Three stages of Mobile GIS

	硬件平台	系统架构	主要特征	典型用户
嵌入式时代	PDA	端+PC 机	GNSS 为核心的数据采集	承担国土、测绘、林业等政府部门外业调查的工作人员
移动互联网时代	智能手机 / 平板电脑	端+服务端/云	无线通信网络为核心 LBS 相关服务	使用交通、餐饮、旅游等 LBS 生活服务的个人用户
智能物联网时代	各种智能物联网终端	端+边+云	智能、实时计算为核心的泛在化 GIS	从事无人机 / 车、视频监控、MR/AR 等行业企业用户

而在本文之前, 对 MGIS 的研究主要集中在移动互联网时代, 早期主要研究 MGIS 的原理和体系架构 (李成名等, 2004; 刘海新等, 2005; 李海燕, 2006; 王攀, 2006; 李德仁, 2006; 王丹等,

2006), 后期主要研究移动地图(周侗等, 2012)以及基于 Android 等平台的 MGIS 开发技术(张俊杰等, 2013; 王刚等, 2013), 并把嵌入式 GIS 和 MGIS 混在一起(王继周等, 2005)或完全作为两种独立的系统区分对待(王小兵等, 2012), 未能论述两者之间的承继关系。对物联网时代的 MGIS 则基本没有相关研究。本文在随后的章节中具体论述各个时代的技术架构和典型业务化应用, 并提出新一代(智能物联网时代) MGIS 的定义及其核心技术。

2 嵌入式时代

嵌入式时代的 MGIS 要求硬件平台具备相应的存储能力和计算能力, 能够满足空间数据存储和复杂计算的需求。当时嵌入式硬件设备主要指掌上电脑、智能手机以及车载电脑等智能终端。一般情况下, 本时代的 MGIS 以 PDA 作为硬件平台。PDA 是集网络、计算、通讯、记事、娱乐等多种功能于一体的移动式便携设备, 与电脑相比具有小巧、轻便、耗电少、可移动性强等特点, 其不足之处是屏幕相对较小。PDA 能随身携带, 随时随地都可以使用, 在集成 GNSS 模块后成为实现移动地理信息的载体。

本时代有几大类嵌入式操作系统, 分别是微软的 Windows CE、Windows Mobile, Palm 的 Palm OS, Symbian 的 EPOC 等。其中 Windows CE/Mobile 是微软为手持设备推出的“移动版 windows”, 在当

时被广泛应用于智能手机和掌上电脑。

2.1 系统架构和功能

以嵌入式时代 MGIS 最典型的应用场景——野外数据采集记录为例, 整个系统通过 PDA 进行数据采集、管理、分析和显示等工作, 其中 GIS 功能都是由 PDA 端独立完成, 空间数据库与属性数据库都存放在 PDA 上, 因而能快速响应用户的操作。

同时, 考虑到 PDA 性能的限制, 空间数据与属性数据的预处理工作都在 PC 机上完成。空间数据与属性数据处理完毕后, 通过同步软件上传到 PDA 端进行使用。野外调查完毕后的空间数据与属性数据再通过同步软件下载到 PC 机, 并将 PDA 的数据库转存到 PC 的 Access 等数据库中。图 1 为本系统的结构示意图:

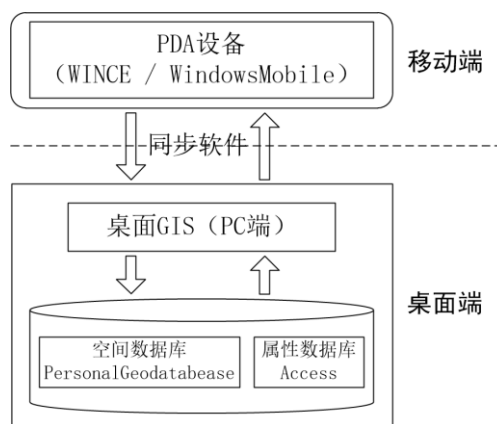


图 1 嵌入式 GIS 系统架构图

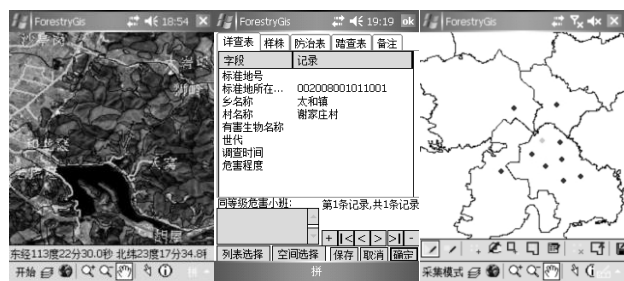
Fig.1 System architecture

整个系统可分为移动端(PDA 端)和桌面端(PC 端)两部分。PDA 端一般包括数据采集录入、地图浏览查询、GNSS 定位导航、图层管理等基本功能, 桌面端(PC 端)则实现信息传输、数据汇总导出、

数据预处理、参数设置等功能。PDA 端的功能在后续的两个时代也相近,但是 PC 端则演变成相应的服务器端/云端以及物联网时代的云+边。

2.2 业务化应用

野外调查一直是我国掌握林业有害生物灾害发生情况的主要途径,它具有劳动强度大、调查周期长等特点,调查数据的时效性比较差,难以及时应用于灾害防治决策活动中。在 PDA 设备上将电子地图和数据库集成在一起,并与内置的 GNSS 结合起来,可以方便地进行野外导航定位,并现场填写数字化的调查结果,为野外调查提供了一种全新的解决方案(武红敢等,2007)。



- (a) 地图显示 (b) 表格记录 (c) 空间对象编辑
(a) map view (b) table view (c) Spatial object editing

图2 林业嵌入式GIS软件

Fig.2 Software of embedded GIS

针对我国林业有害生物地面调查所存在的问题,中国科学院遥感应用研究所国家林业局植树造林司和中国林科院的指导下,于2007年开发了“基于GIS/GPS的林业有害生物监测数据记录系统”(何丹,2008;李卫国,2010;司敬知,2012;车振磊,2016),以便规范地面调查数据的记录工作,加强对监测数据的监督管理,提升基层的技术水平。

该系统(界面如图2所示)在全国二十余省份、上千县市得到了应用,以此为基础的乡、县、省、国家级监测管理系统(乔彦友等,2009;张迎,2007;张源,2008;常原飞等,2011)的建设和Web等空间信息管理技术(崔福东,2009;刘丽,2012)的应用,极大提升了我国林业有害生物管理的科学水平。

3 移动互联网时代

随着移动互联网的兴起和智能手机、平板等移动终端的普及,MGIS成为地理信息产业的又一技术热点。在移动互联网时代,对MGIS应用最多的是各种地图类APP软件和LBS类APP软件,基本覆盖了用户在衣食住行及运动健身等生活各方面的需求。但这类软件主要是面向大众消费群体,由于其数据本身及服务的局限,它不能为特定行业用户提供更加全面和专业的GIS功能。

传统的专业GIS厂商如ESRI和超图等推出了各自的MGIS开发平台,很多用户和学者基于这些平台开发了本行业领域的专业MGIS应用,以满足特殊行业、特殊部门用户的需求。常见的MGIS支撑平台有美国ESRI的ArcGIS for Android(或ArcGIS Mobile)以及中国科学院的SuperMap iMobile等。这些平台支持二维和三维应用开发,支持在线应用和离线应用,支持指划制图、模板化数据采集、数据分析、三维数据展示,同时也支持扩展开发,可用于行业应用系统快速定制开发。

3.1 系统架构

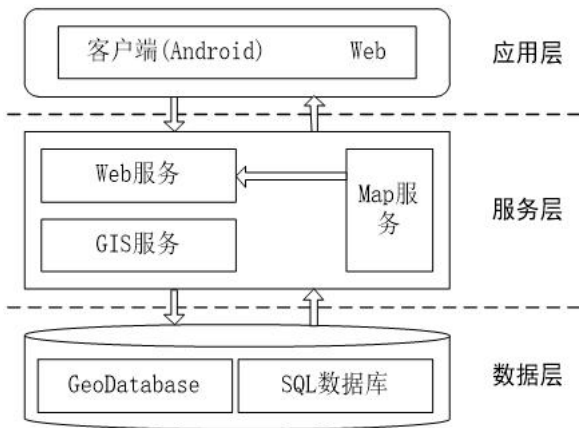


图 3 移动互联时代的系统架构

Fig.3 System architecture of mobile internet era

如图 3 所示，移动互联时代的典型 MGIS 系统为三层架构模型，即数据层、服务层和应用层，各层之间具有相对独立性，能够提高系统的可用性。其中数据层负责数据的存储与访问，是 MGIS 各类数据的集散地，为 GIS 功能实现提供基础支撑和保障；服务层负责提供可复用的服务，是 MGIS 的核心部分，系统的服务都集中在该层，主要完成空间数据信息的传输、处理以及 MGIS 功能的执行，包括 Web 服务、GIS 服务、Map 服务等组成部分；应用层则主要负责具体业务逻辑处理，直接与用户打交道，是向用户提供 GIS 服务的窗口，支持各种移动操作系统的客户端（手机、PDA、车载终端等）以及 Web 浏览器端。

MGIS 应用的开发架构有 Native 开发、Web 开发以及混合开发 3 种模式。Native 开发模式是指针对不同移动操作系统，使用特定编程语言开发原生 GIS 应用程序的模式，这种模式的 MGIS 应用最为普遍；Web 开发模式是指让用户通过移动终端的浏

览器，获得 MGIS 服务，它通过 Web 技术标准解决移动平台的差异性，特别是 HTML5 技术的运用使得浏览器也能够实现原来只有 Native 应用程序才能实现的功能；混合模式是指同时使用 Native 模式和 Web 模式，在 Native 应用中嵌入一个内置浏览器控件，既能够像 Native 开发模式的应用那样提供良好用户交互体验，也发挥了 Web 开发模式的应用跨平台特点。目前来说 Native 开发模式性能较好，后两种开发模式通用性较强。

3.2 业务化应用

随着移动互联网的发展，大众生活类的 APP 与 MGIS 结合越来越紧密，MGIS 深入到了导航、购物、打车、餐饮、旅游等城市生活方方面面，成为智慧城市建设的典型业务化应用之一。中国科学院遥感应用研究所基于自主研发的基础地理信息平台（荐军, 2005），应用 MGIS 技术开发了智慧城市网格化管理平台、城市感知(夏昊, 2015; 左进波, 2018)、城市管理 APP—随手拍、治理通等系统，并为有移动地图服务需求的专业人员和公众用户设计开发了空天图系统，相关 APP 界面如图 4 所示。上述系统以移动智能手机为工具，把多种在线地图数据与离线地图数据整合在一起，突破了传统地图系统的数据源较少、数据类型单一等难点，使用户能够方便快捷地使用自己所需的地图信息。

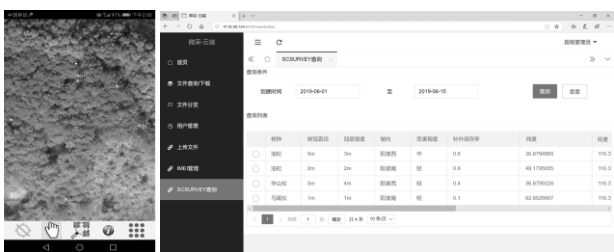


(a) 主界面 (b) 事件位置 (c) 地图显示 (d) 地图来源
 (a) UI of APP (b) loc of event (c) Map view (d) Map source

图 4 智慧城市网格化管理 APP

Fig.4 Grid management APP of smart city

此外，移动互联网时代的野外数据采集也升级为云+端架构。以松材线虫病死松树管理系统为例，系统由云服务端（内业）和移动端（外业）两部分构成，为松材线虫病死松树的外业精准信息采集和内业规范化建库提供了一套整体解决方案（武红敢等, 2019）。移动端软件安装在具备导航卫星定位模块的移动终端上，护林员在外业调查和核查时，可对病死松树编号、拍照等快速记录，同时记录调查时的位置和时间信息，并可将数据实时或随后上传云平台数据库，实现病死松树信息的精准采集（Wang 等, 2016）。服务端部署在云服务器上，负责存储与汇总调查数据等内业管理工作，可以根据任务定制相应格式的外业调查表格，对调查任务进行监督和检查，将合格的数据进行汇总统计，并导出为标准报表格式，实现内业报表的规范化管理。移动端和服务端界面如图 5 所示：



(a) 移动端界面 (b) 服务端界面
 (a) UI of APP (b) UI of Server

图 5 松材线虫病死松树管理系统界面

Fig.5 User interfaces of management system for trees attacked by pine wood nematode disease

4 智能物联网时代

近年来，随着物联网的泛在化发展以及 5G 移动通信网络的部署，边缘计算的热度持续上升。国际数据公司（International Data Corporation, IDC）预计，2020 年全球将有超过 500 亿的终端与设备联网，超过 40% 的数据要在网络边缘侧进行分析、处理与存储。在智能物联网时代，MGIS 可以部署在集成有雷达、摄像头等传感器的各种移动无人值守设备上，在 5G 等高速无线网络的支持下，实时的将空间信息自动采集到移动终端，并传输到最近的边缘计算设备上，进行智能处理和分析，从而平衡移动端算力和边缘设备算力来提高系统性能。

移动边缘计算 (Mobile Edge Computing, MEC)，是由 IBM、Nokia 和 Siemens 于 2013 年共同推出的一款计算平台上引出的概念，具体指在接近智能手机或者移动终端的地方提供计算能力，即将计算能力下沉到分布式基站，在无线网络侧增加计算、存储、处理等功能，将传统的无线基站升级为智能化基站。就应用场景来看，MEC 主要致力于为应用降低时延 (Mukherjee 等, 2018)，适合物联网、车联网、AR/VR 等多种应用场景。

4.1 系统架构

基于 MEC 的系统架构中不同的功能实体可划分为三个层级：云服务器层（Cloud Servers Level）、移动边缘主机层（Mobile Edge Servers Level）、智能感知设备层（Smart Sensing Devices Level），三层之间通过核心网络和边缘网络连接。系统架构如图 6 所示：

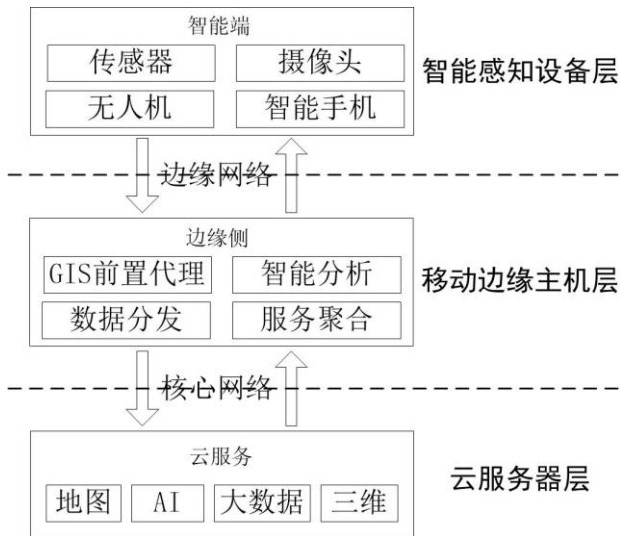


图 6 智能物联网时代的系统架构

Fig.6 System architecture of IOT era

在云上，GIS 功能拆分为微服务(陆懿帆等, 2020)，可按需弹性伸缩，实现地图、三维、大数据、AI 功能的全面微服务化，支持 GIS 容器化(徐蕴琪等, 2020)部署和自动化编排，并对所有微服务资源实时监控。

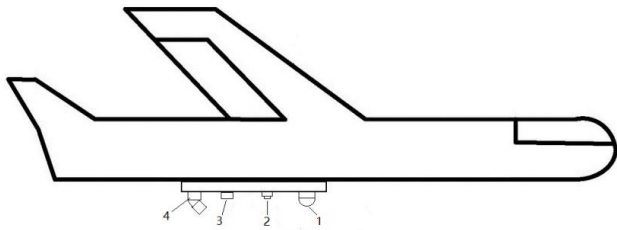
在边缘侧可进行 GIS 前置代理、服务聚合、数据分发和分析处理，即在 GIS 云服务和智能感知设备之间设置移动边缘主机节点，对 GIS 服务进行代理加速，将不同来源、不同内容的 GIS 服务聚合为一个服务，通过分发实现瓦片等数据在边缘 GIS 节

点的自动更新，并按照智能感知设备实际需求进行 GIS 分析和计算，有效提升 GIS 服务性能。

在智能感知设备层则将采集的信息传输到就近的移动边缘节点，并实时调用其提供的各种分析计算服务满足最终用户需求。例如在使用无人机遥感监测疑似目标时，可在飞行过程中实时与边缘侧设备通信，传输采集的图像/视频数据以及自身状态信息；边缘侧通过图像分析目标的异常情况，可实时的对无人机飞行路线、数据采集策略等进行调整。

4.2 业务化应用

与 AI 技术深度结合是本时代 MGIS 的典型业务化应用，特别是在无人机遥感监测等实时性要求较高的场景。近年来，林业上开始采用甚高空间分辨率遥感技术进行大范围、周期性的松材线虫病罹病木监测。由于疫情监测粒度为单木，为了满足这种高精度、高时效性的识别和定位需求，整个应用系统采用“云+边+端”的架构：在移动端集成可见光/红外相机、激光雷达（Light Detection and Ranging, LiDAR）、GNSS、IMU（Inertial Measurement Unit）等装置，形成集目标实时探测、定位及协同高倍率成像为一体的航空 MGIS 硬件（如图 7 所示）；在边缘计算节点基于亚米级影像的变色松树实时智能探测技术（王成波，2015），实现目标所在区域厘米级影像自动协同获取与精准识别；在云端负责系统管理，包括节点管理、资源动态调度、智能处理、统一时空参考框架等整体技术，实现罹病木、森林火点的大范围快速精准监测。



1-激光雷达; 2-大视野成像系统; 3-GNSS、IMU; 4-高倍率成像系统

1-LiDAR; 2-large FOV imaging system; 3-GNSS、IMU; 4-high magnification imaging system

图 7 目标实时探测、定位的智能化机载 MGIS 硬件

Fig.7 Intelligent airborne mobile GIS hardware for real time target detecting and locating

智能森林监测系统工作流程如图 8 所示：首先系统采用具备程控飞行能力的无人机平台，可自主起降，并自行降落到 GIS 系统中的充电站进行自动充电，能够大范围（万亩/架次）、快速（一小时内）获取目标区域超高分辨率（不低于 0.1 米）影像；其次，影像数据实时传输至边缘计算设备，通过部署在边缘节点上的人工智能算法对影像进行处理，实现影像中危害木的自动提取，实时、准确识别罹病木位置和数量（90%以上）；随后护林员可基于地面 MGIS 终端完成外业数据抽样核查，构建遥感影像野外标志数据库；最后用户汇总外业成果并制作专题地图，总结上述工作，完成监测工作报告。

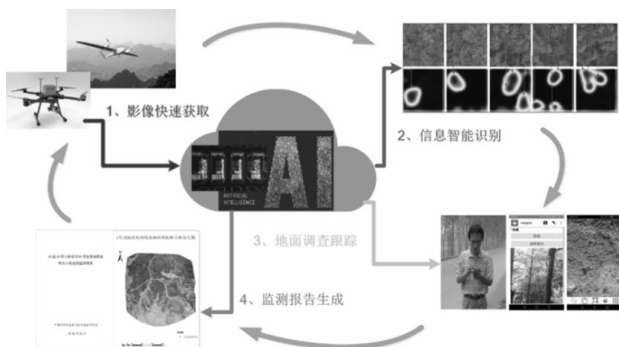


图 8 智能森林监测系统工作流程图

Fig.8 Work flow chart of intelligent monitoring system for forest

此外，MGIS 技术也非常适合于机场、港口等有车辆、无动力设备等众多活动目标监管需求的业务场景。通过构建以雷达为核心的空地雷达网、视频网、物联网等协同感知网络，采用 GNSS 差分定位与惯导定位的融合技术，实现复杂环境条件下机场飞行区状态、性能、主体行为等信息的立体化综合实时精准感知，解决当前飞行区运行管控中监测不准、环境不清、态势不明等问题。

5 新一代 MGIS 及其核心技术

随着新技术的不断出现、演变与融合，以及行业需求向实时、智能、精准等方向的转变，MGIS 逐步从本底数据可视化、GNSS 导航定位、数据采集与查询分析等传统形态开始升级。即在基础空间数据与统一时空参考框架的基础上，综合运用无人机/车等平台、多源传感器、实时感知定位技术、5G 通信、智能计算与决策技术，自主获取空间环境中的照片、视频、点云、温湿度等几何或物理信息，进行实时感知与建图、提取感兴趣目标信息，将现实世界映射到数字世界中，以时空可视化方式实时、动态呈现工作现场空间环境，并根据业务需求智能化、标准化的完成作业任务。

可以看出，物联网时代的 MGIS 具备新一代 MGIS 泛在化、实时化、智能化的特征，它是建立在移动计算环境、有限处理能力的终端条件下，结

合边缘计算和云计算，为用户提供移动中、分布式、随遇性、实时性移动地理信息服务的信息系统，是一个集 GIS、GNSS、5G、AI 和 CV 等信息技术于一体的智能系统。它的核心支撑技术如下：

5.1 跨平台 GIS 内核

面对泛在化、多样化的移动平台设备，一般来说基于标准 C++实现 GIS 内核是跨平台的最佳方案。标准 C++具有一次编码到处编译的特征，既支持 Windows、Linux 等桌面运行环境，Linux、UNIX 内核的服务器运行环境，以及以 Android、iOS 等的移动终端运行环境，同时在数据与计算双密集类应用中也有着显著的性能优势，因此与实时 GIS 的应用需求有很好的结合，可实现高性能的跨平台。

在跨平台内核支持下，各种异构的移动智能终端就能在云+边+端的架构下无缝的衔接在一起，形成无所不在的智能感知网络。

5.2 同步定位和全息高精度导航地图

同步定位与地图构建 (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)起源于机器人领域(Durrant 等, 2006; Bailey 等, 2006), 如今在自动驾驶、无人机、实时空间制图等方面都已得到广泛的研究和实践。

近年来，经过实践证明，依靠多传感器信息深度融合的方式解决高精度、实时定位、导航和

地图构建问题已成为学术界的共识 (Qian 等, 2016)。多传感器的信息融合具有巨大优势和研究价值：(1) 对传感器本身而言，多传感器组合导航系统是一种有效弥补单一传感器缺陷的方式 (Xia 等, 2014)。例如，通过与惯性传感器组合解决卫星导航中信号受到遮挡导致的失锁问题；通过与测距传感器组合弥补相机无法获取影像景深的不足。(2) 从算法层面看，多传感器组合为解决导航、定位与地图构建问题提供了更多可能。一方面，在保证一定观测精度的前提下，更多的观测信息有助于建立更加完备的状态估计函数模型，从而保证载体位姿估计的精度；另一方面，不同类型的观测信息可以相互辅助，提高解决问题的效率。例如采用惯性测量单元(Inertial Measurement Unit,IMU)辅助 GNSS 实现模糊度的快速固定；IMU 辅助 LiDAR 消除点云运动畸变等。(3) 在实际应用层面，多传感器组合导航、定位、地图构建系统更具有实际应用价值。一方面，利用点云和影像等视觉观测信息可以实现室内外环境一体化的三维地图构建，从而为载体感知环境、感兴趣目标探测与定位、导航控制提供重要的数据资料，同时也为用户提供更加精细的位置信息服务。

除了上述的多传感器融合技术之外，高精度导航地图是实现车路协同演示、路径规划的另一个基础支撑 (姚海敏等, 2020)。适用于自动驾驶的道路高精度地图相较普通导航电子地图而言，具有更高精度、更加详细的地图素、更加丰富的属性，对

于无人车定位、导航、控制及安全至关重要，是自动驾驶的核心技术之一（陈宗娟等，2018；刘经南等，2018）。地图数据采集一般使用集成 GNSS+IMU+超宽带(Ultra Wide Band, UWB)+激光雷达(LiDAR)的测绘车采集数据，要保证车辆在地图上准确显示，地图精度和定位精度是关键。在路口、停车场、车库出入口等重点部位提高感知能力和定位精度，安装 LiDAR、UWB 定位系统，实现场端传感器对机动车、非机动车、障碍物的连续可靠感知定位。地图采集工作开始前需要通过已知点校核，以保证坐标系统一致。其次可通过在园区内布置足够的校正点、比对点用于地图纠偏和精度验证，特别是车辆行驶的道路、停车位附近，以及地下车库，保证误差控制在容许范围内。

此外，车辆智能导航还需要周围环境全场景信息。全息位置地图（周成虎等，2011）和全息地图概念的相继提出和发展，为高精度导航地图应用的推进和内涵的拓展提供了参考。全息地图（周成虎，2014）是随着移动互联网络、传感网、物联网和智能移动终端的飞速发展，使得信息内容更丰富、获取形式更多样，可实现人与人、人与物、物与物之间按需进行信息获取、传递、存储、认知、决策等功能的地图新形式。全息高精度导航地图（余卓渊等，2020）是一种面向机器（车辆）的移动运算，集环境感知、全要素融合、高精度定位、规划决策的智能化导航地图。现有的高精度导航地图是全息高精度导航地图的一种基本形式、一个子集，它为

全息高精度地图提供了重要的基础数据；全息地图的数据集成和表达方式则是全息高精度导航地图的范式指导。全息高精度导航地图的相关技术和方法通过获取和融合卫星遥感影像、激光雷达、声光电磁传感器、泛在信息网等多种类型数据，生成高精度和全要素的道路静态信息、动态信息。

5.3 语义地图和智能决策

传统 SLAM 依赖于基于点、线、面等空间层次的特征提取与匹配算法来估计运动，其场景重建只能生成三维稠密地图（Whelan 等，2016），缺乏相关的语义信息，限制了移动端对环境物体信息的理解（邹斌等，2020）。为了既保留传统 SLAM 构建的几何信息，同时又能提供环境中的语义信息，McCorMac 等（2016）利用神经网络生成类别概率图，从而在地图中添加预测结果进行形成语义地图。Girshick（2016）等设计了基于区域的卷积神经网络（Region-based Convolutional Neural Networks, RCNN）经典检测算法，进而衍生出 Faster RCNN、Mask RCNN（Ren S Q 等，2017；He K M，2020）等优秀架构。YOLO（You Only Look Once）（Redmon 等，2016）系列算法通过单阶段的网络结构，使深度学习在移动芯片上的实时目标检测成为可能。这些研究在基于自动驾驶车辆、无人机、机器人等硬件平台的新一代智能移动 GIS 应用中具有非常重要的参考意义。

决策能力是智能移动 GIS 应用的核心，系统对图像中语义的理解可以用于后续的决策。基于学习

的途径，即基于数据驱动的途径，通过环境感知来定义应该解决什么样的问题，更有可能解决真实环境中做决策的问题。若将机器决策放在学习的框架上，则可以分为无监督学习、监督学习和强化学习三大类技术，其中强化学习的本质就是要解决做决策问题，即自动进行决策，并且可以做连续决策，是机器学习中的一个重要研究领域（姚兴虎等，2020）。它主要包含事件、环境状态、行动和奖励四个元素，强化学习的目标就是从大量数据中反复学习找到最优解，获得最多的累计奖励，从而不断改进和升级各种无人值守设备的智能决策机制，是未来智能决策的重要方向之一。

6 总 结

MGIS 发展到现在已有 20 年，期间随着移动终端硬件平台、操作系统的不断更新迭代，经历了单机版的嵌入式时代、以云计算为中心的移动互联网时代、去中心化边缘计算的智能物联网时代。嵌入式时代的 MGIS 集成了 GNSS 模块，实现了野外数据采集的数字化和精准化；移动互联网时代的 MGIS 集成了移动宽带网络模块，结合云服务平台实现了随时随地的电子地图和 LBS 服务，但这两个时代的 MGIS 仍然局限于地面的人工信息采集方式。

与传统的 MGIS 相比，新一代的智能物联网 MGIS 集成了 GNSS、5G、AI 和 CV 等信息技术，对地理空间数据的采集与处理具有更加智能化、实时化以及泛在化的特征。这时候终端的类型不再局

限于原先的地面移动终端设备，而是还包括空中的无人机、地上地下的各种传感器以及各种人体可穿戴设备等。这些设备采集的视频、图像、文本等具备位置数据的多媒体信息，被传输到就近的边缘设备上进行处理，实时生成高精度的空间和语义地图，即时为用户提供智能化的辅助决策。由于人类生活中约有 80% 的数据都具有空间属性，随着可穿戴设备、智能物联网的普及和发展，MGIS 技术将应用到人们衣食住行生活的方方面面，未来人人都是移动节点、物物皆为 GIS 终端！

志 谢 文中论述的研发工作得到了赵健、荐军、梁寒冬、高雪迪、何忠信、张迎、韩鹏、许哲、邓书斌、何丹、张源、刘朔、崔福东、李扬、李卫国、刘丽、梁威、刘智慧、王志宝、司敬知、赵飞、邵红兰、王成波、夏昊、石木耀、马贤迪、赵仁辉、李爽、车振磊、殷文斌、左进波、肖京格、李佳蓉、卫春阳、付东、张隆裕、武天丽、刘希浩、权一卓、吴宇昂等老师和同学的鼎力支持，在此表示衷心的感谢！

REFERENCES

- Bailey T and Durrant-Whyte H. 2006. Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II. IEEE Robotics & Automation Magazine, 13(3):108-117 [DOI:10.1109/MRA. 2006.167814 4]
- Bu J and Zhang Q.2004.Technical implementation of distributed mobile GIS based on LBS. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications,16(1):105-107 (卜健, 张琦. 基于应用的分布式移动技术实现.重庆邮电学院学报, 16(1):105-107)

- Chang Y F, Wu H G, Dong Z H, Cui F D, Liu L, Jian J, Zhang Y and Li W G. 2011. A National monitoring and warning system for forest pest based on service-oriented architecture. *Scientia Silvae Sinicae*, 47(6): 93-100 (常原飞, 武红敢, 董振辉, 崔福东, 刘丽, 荐军, 张迎, 李卫国. 2011. 国家级林业有害生物灾害监测与预警系统. *林业科学*, 47(6): 93-100)
- Che Z L. 2016. A study on key techniques of forest pests hazard re-investigation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (车振磊. 2016. 林业有害生物灾害点复位调查关键技术研究. 北京: 中国科学院大学)
- Chen F X. 2006. Mobile spatial information services. Beijing: Institute of Remote Sensing Application Chinese Academy of Sciences (陈飞翔. 2006. 移动空间信息服务关键技术研究. 北京: 中国科学院遥感应用研究所)
- Chen Z J, Sun E D, Li D D, Zhang C C, Zang D D and Chen X. 2018. Current situation analysis and implementation of high precision map. *Computer Knowledge and Technology*, 14(22): 270-272 (陈宗娟, 孙二鑫, 李丹丹, 张聪聪, 藏丹丹, 程旭. 2018. 高精地图现状分析与实现方案研究. *电脑知识与技术*, 14(22): 270-272)
- Cui F D. 2009. Research on forestry pests web service management technology. Beijing: Institute of Remote Sensing Application Chinese Academy of Sciences (崔福东. 2009. 林业有害生物 Web 服务管理技术研究. 北京: 中国科学院遥感应用研究所)
- Durrant-Whyte H. and Bailey T. 2006. Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(2):99-110 [DOI: 10.1109/MRA.2006.1638022]
- Girshick R, Donahue J, Darrell T and Malik J. 2016. Region- Based Convolutional Networks for Accurate Object Detection and Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 38(1):142-158 [DOI:10.1109/TPAMI.2015.2437384]
- Gong J Y. 2004. Review of the progress in contemporary GIS. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 27(1):5-11 (龚健雅. 2004. 当代地理信息系统进展综述. *测绘与空间地理信息*, 27(1):5-11)
- He K M, Georgia G, Piotr D and Ross G. 2020. Mask R-CNN. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 42(2):386-397.
- He D. 2008. Research and application of embedded GIS in forestry pest survey. Beijing: Institute of Remote Sensing Application Chinese Academy of Sciences (何丹. 2008. 嵌入式 GIS 在林业有害生物调查中的研究与应用. 北京: 中国科学院遥感应用研究所)
- Jian J. 2005. Urban fundamental geographical information platform framework and key technology study. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences(Institute of Remote Sensing Application) (荐军. 2005. 城市基础地理信息平台框架及关键技术研究. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所))
- Li C M, Wang J Z, Liu Y. 2004. Theory and Application of Moving GIS. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, (11):990-993. (李成名, 王继周, 刘勇. 2004. 移动 GIS 的原理、方法与实践. *武汉大学学报(信息科学版)*, (11):990-993.)
- Li D R. 2008. Mobile Mapping Technology and Its Applications. *Proceedings of the 4th Council of the 9th CSMS and its 2008 annual meeting*, PP4-22. (李德仁. 2008. 移动测量技术及其应用. 中国测绘学会九届四次理事会暨 2008 年学术年会论文集, PP4-22.)
- Li H Y. 2006. Research on the Concept System of Mobile GIS. Chang'an university (李海艳. 2006. 移动 GIS 的概念体系研究. 长安大学)
- Li W G. 2010. Research on field investigation system based on embedded GIS. Beijing: Institute of Remote Sensing Application Chinese Academy of Sciences (李卫国. 2010. 基于嵌入式 GIS 的野外调查系统研究. 北京: 中国科学院遥感应用研究所)
- Liu H X, Liu H D, He J H and Zhao Y L. 2005. Development and Application of Mobile GIS. *Journal of Geomatics*, (04):41-42 (刘海新, 刘惠德, 何虎军, 赵玉玲. 2005. 移动 GIS 的发展及其应用. *地理空间信息*, (04):41-42)

- Liu J J, Zou S H and LU X L. 2020. Joint optimization scheme of resource allocation and offloading decision in mobile edge computing. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*,(2020): 1-11 [DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2006087] (刘继军,邹山花,卢先领. 2020. MEC 中资源分配与卸载决策联合优化策略. *计算机科学与探索*, (2020):1-11 [DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2006087])
- Liu J N, Wu H B, Guo C, Zhang H M, Zuo W W and Yang C. 2018. Progress and Consideration of High Precision Road Navigation Map. *Strategic Study of CAE*, 20(2):99-105 (刘经南,吴杭彬,郭迟,郭迟,张宏敏,左文炜,羊铖. 2018. 高精度道路导航地图的进展与思考. *中国工程科学*,20(2):99-105)
- Liu L. 2012. Research on general framework and template of management information system based on WebGIS. Beijing: Institute of Remote Sensing Application Chinese Academy of Sciences (刘丽. 2012. 基于 WebGIS 的管理信息系统通用框架及模板技术研究. 北京: 中国科学院遥感应用研究所)
- Lu Y F, Cao R H, W J L and Yan C G. 2020. Method of encapsulating procuratorate affair services based on microservices. *Computer Science*, 046(001):149-154 [DOI: 10.11896/jsjcx.191100152] (陆懿帆,曹芮浩,王俊丽,闫春钢. 2020. 一种基于微服务的检察业务服务封装方法. *计算机科学*, 046(001):149-154 [DOI: 10.11896/jsjcx.191100152])
- McCormac J, Handa A, Davison A and Leutenegger S. 2017. Semantic Fusion: Dense 3D semantic mapping with convolutional neural networks. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2017):4628-4635 [DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989538]
- Mukherjee M, Shu L and Wang D. 2018. Survey of fog computing: Fundamental, network applications, and research challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*,20(3):1826-1857 [DOI:10.1109/COMST.2018.2814571]
- Ness S T Lee. 1993. Single line street network: The Foundation of Mobile GIS. *Vehicle Navigation and Information Systems Conference Proceedings of the IEEE*, 1993:34-37 [DOI: 10.1109/VNIS.1993.585578]
- Qian C, Liu H, Tang J, Chen Y W, Harri K, Antero K, Zhu L L, Liang X L, Chen L and Juha H. 2017. An integrated GNSS/INS/LiDAR-SLAM positioning method for highly accurate forest stem mapping. *Remote Sensing*, 9(1): 3 [DOI:10.3390/rs9010003]
- Qiao Y Y, Chang Y F, He D, Zhang Y and Jian J. 2009. GIS/GPS-based forestry pest monitoring data recording system and its industrialization. *Journal of Remote Sensing*, 13(s1):422-426 [DOI:10.11834/jrs.20090060] (乔彦友,常原飞,何丹,张迎,荐军. 2009. 基于 GIS/GPS 的林业有害生物监测数据记录系统及产业化. *遥感学报*, 13(s1):422-426 [DOI:10.11834/jrs.20090060])
- Redmon J, Divvala S, Girshick R and Farhadi A. 2015. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. *Computer Vision & Pattern Recognition. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, (2016):779-788
- Ren S Q, He K M, Girshick R and Sun J. 2017. Faster RCNN: towards real-time object detection with region proposal networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(6):1137-1149.
- Si J Z. 2012. Research on field data collection technology of forestry pests based on GIS/GPS. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (司敬知. 2012. 基于 GIS/GPS 的林业有害生物野外数据采集技术研究. 北京: 中国科学院大学;中国科学院研究生院)
- Tian G, Tong X H and Zhang J. 2004. Research and implementation of embedded gis based on mobile. *Remote Sensing Information*,(1):49-52 (田根,张锦,童小华. 2004. 基于移动的嵌入式 GIS. *遥感信息*, (1):49-52)
- Wang C B. 2015. Study on automatic recognition and service-oriented informationized field investigation of discolored pine trees. Beijing: Institute of Remote Sensing Application Chinese Academy of Sciences (王成波. 2015. 变色松树的图像识别与地面调查综合技术研究. 北京: 中国科学院遥感与数字地球研究所)
- Wang C B, Qiao Y Y, Wu H G, Chang Y F and Shi M Y. 2016. Empowering fall webworm surveillance with mobile phone-based community monitoring: a case study in northern

- China. *Journal of Forestry Research*, (27):1407-1410.
- Wang D, Li X, Zhu M Z. 2006. Research on system architecture of mobile GIS. *Computer Engineering and Design*, (20):3835-3837(王丹,李欣,朱美正. 2006.移动式地理信息系统体系结构的研究.计算机工程与设计, (20):3835-3837)
- Wang G, Han Z B. 2013. Design and Implementation of Android-oriented Mobile GIS. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (08):77-80(王刚,韩振鏢. 2013.面向 Android 智能移动终端的 GIS 设计与实现.测绘通报, (08):77-80)
- Wang J Z, Li M C. 2005. Research on embedded mobile GIS. *Science of Surveying and Mapping*, (04):48-50+5(王继周,李成名. 2005.嵌入式移动 GIS 研究.测绘科学, (04):48-50+5)
- Wang P. 2006. Mobile GIS and Its New Applications. *Geomatics & Spatial Information Technology*, (05):129-131(王攀. 2006.移动 GIS 及其新应用.测绘与空间地理信息, (05):129-131)
- Wang X B, Sun J Y. 2012. Geographic Information System Overview. *Journal of Geomatics*, 10(01):25-28+1 (王小兵,孙久运. 2012.,地理信息系统综述.地理空间信息, 10(01):25-28+1)
- Whelan T, Salas-Moreno R F, Glocker B, Davison A J and Leutenegger S. 2016. Elastic Fusion: real-time dense SLAM and light source estimation. *The International Journal of Robotics Research*, 35(14):1697-1716.
- Wu H G, Chang Y F and He D 2007. GIS/GPS-based forestry pest monitoring data recording and processing system. *Forestry of China [J]*, (18):54-54 (武红敢, 常原飞, 何丹 2007. 基于 GIS/GPS 的林业有害生物监测数据记录与处理系统. 中国林业, (18):54-54)
- Wu H G, Wang C B and Chang Y F. 2019. Study on cloud service management of dead pine tree caused by *bursaphelenchus xylophilus*. *Forest Resources Management*, (05):68-75. [DOI:10.13466/j.cnki.lyzygl.2019.05.012] (武红敢,王成波,常原飞. 2019. 松材线虫病死松树云服务管理的探究. 林业资源管理, (05):68-75 [DOI:10.13466/j.cnki.lyzygl.2019.05.012])
- Yu Z Y, Lv G N, Zhang X N, 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,闫国年,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)
- Xia H. 2015. A Study on Context-awareness of Mobile Device for Location-Based Service. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (夏昊. 2015. 面向位置服务的移动终端情景感知研究. 北京: 中国科学院大学)
- Xia H, Zuo J B, Liu S, and Qiao Y Y. 2018. Indoor localization on smart phones using built-In sensors and map constraints. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1-10 [DOI: 10.1109/TIM.2018.2863478]
- Xu Y Q, Huang H and Jin Z. 2020. Application research on container technology in scientific computing. *Computer Science*, 48(1): 319-325. (徐蕴琪,黄荷,金钟. 2020. 容器技术在科学计算中的应用研究.计算机学报, 48(1): 319-325)
- YAO H M and CHEN J H. 2021. Application Practice of Vehicle-Road Fusion Positioning Based on High Precision Map and Multi-Sensor. *Journal of Geomatics*, 1-7[2021-01-18]. <https://doi.org/10.14188/j.2095-6045.2020368> (姚海敏,陈建华. 2021. 基于高精度地图及多传感器融合定位的车路协同应用实践. 测绘地理信息: 1-7[2021-01-18]. <https://doi.org/10.14188/j.2095-6045.2020368>.)
- Yao X H and Tan X Y. 2020. Reward highway network based global credit assignment algorithm in multi-agent reinforcement learning. *Journal of Computer Applications*, 1-8[2020-10-09]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1307.TP.20200930.1727.004.html> [DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2020061009] (姚兴虎,谭晓阳. 2020. 基于奖励高速路网络的多智能体强化学习中的全局信用分配算法. 计算机应用, 1-8[2020-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1307.TP.20200930.1727.004.html>.)
- Zhang J J, Zhang H Y and Luo R. 2013. Research of mobile GIS based on Android platform and its implementation. *Computer Engineering and Design*, 34(09):3322-3326.(张俊杰,张海燕,罗锐. 2013. 基于 Android 平台的移动 GIS 研究与实现. 计算机工程与设计, 34(09):3322-3326.)
- Zhang Y. 2007. Research and application of county-level forestry

- pest monitoring and management information system based on GIS. Shijiazhuang: Hebei Normal University (张迎. 2007. 基于 GIS 的县级林业有害生物监测管理信息系统研究与应用. 石家庄: 河北师范大学)
- Zhang Y. 2008. Research on forestry pest web management information system based on spatial data service technology. Beijing: Institute of Remote Sensing Application Chinese Academy of Sciences (张源. 2008. 基于空间数据服务技术的林业有害生物网络管理信息系统研究. 北京: 中国科学院遥感应用研究所)
- Zhao W B and Zhang D R. 2003. Geographical Information System in Mobile Computing Environment. *Geography and Geo-Information Science*, 19(2):19-23 (赵文斌, 张登荣. 2003. 移动计算环境中的地理信息系统. *地理与地理信息科学*, 19(2): 19-23)
- Zhou C H, Zhu X Y, Wang M, et al. Panoramic location-based map[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(11):1331-1335(周成虎, 朱欣焰, 王蒙, 等. 全息位置地图研究[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(11):1331-1335.)
- Zhou C H. The era of holographic maps has arrived: Historical evolution of map functions[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(7):3-8(周成虎. 全息地图时代已经来临——地图功能的历史演变[J]. *测绘科学*, 2014, 39(7):3-8.)
- Zhou T and Long Y. 2012. Review about Recently Development of Mobile Map and Internet Map in China. *Geography and Geo-Information Science*, 28(05):1-5 (周炯, 龙毅. 2012. 我国近期移动地图与互联网地图发展综述. *地理与地理信息科学*, 28(05):1-5)
- Zou B, Lin S Y and Yin Z S. 2020. Semantic Mapping Based on YOLOv3 and Visual SLAM. *Laser & Optoelectronics Progress*, 57(20):124-130 (邹斌, 林思阳, 尹智帅. 2020. 基于 YOLOv3 和视觉 SLAM 的语义地图构建. *激光与光电子学进展*, 57(20):124-130)
- Zuo J B. 2018. Research on Mobile Perception of Urban Environment. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (左进波. 2018. 面向城市环境的移动感知研究. 北京: 中国科学院大学)

Three Development Stages of Mobile Geographic Information System Technology

QIAO Yanyou, CHANG Yuanfei

Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: In this paper, the development of mobile geographic information system (MGIS), which is driven by the change of information technology, is clarified and divided into three eras: embedded era, mobile Internet era and intelligent Internet of things era.

At the end of 1990s, with the completion of global positioning system(GPS) deployment in the United States, in order to facilitate field data acquisition, the functions related to information acquisition of desktop GIS system were transplanted to personal digital assistant(PDA) and other embedded devices, MGIS entered the "**embedded era**" combined with GPS. In this period, the stand-alone version of MGIS has been successfully applied in the field data collection of land, forestry, surveying and mapping

and other industries. Although MGIS had some online functions at that time, the bandwidth of mobile network was not enough to support high-frequency network GIS services.

With the rise of 3G / 4G and other broadband mobile networks and the popularity of intelligent mobile terminals (especially Android mobile phones), MGIS has gradually entered the "**mobile Internet era**". In this period, the core module of MGIS was translated from Global Navigation Satellite System (GNSS) to wireless communication network. The most typical applications in this era are the map APP developed by Google, Baidu and other electronic map service providers and its related location based services(LBS) APP. At this time, MGIS has extended to the entire geographic information industry chains, involving data collection, data processing, platform software, industry applications, etc. "Cloud + End" constitutes a new ecosystem of geographic information. However, due to the problems of cloud computing, such as less real-time, insufficient bandwidth, large energy consumption, not conducive to data security and privacy, MGIS in this era is still in the traditional artificial ground operation stage, which is difficult to provide real-time spatial analysis, target recognition and other intelligent processing.

With the ubiquitous development of Internet of things (IOT), especially the development of computer vision (CV), artificial intelligence (AI), 5G mobile communication, edge computing and other technologies, MGIS technology gradually enters the "**intelligent Internet of things era**" around 2019. The main technical features of this stage are intelligent, real-time and ubiquitous GIS, and the system architecture evolves into "cloud + edge + end". In this era, everyone is a sensor and plotter. A large number of intelligent sensors such as cameras and radars integrated on ground mobile platforms (wearable devices, vehicles, etc.) and air mobile platforms (unmanned aerial vehicles, etc.) have emerged, which can help us locate and provide holographic maps information such as acoustic-optic-magnetic information. These Internet of things terminals can be used as carrier of MGIS. The massive raw data of collected images, videos, locations and other data are no longer all uploaded to the cloud, but are analyzed and processed in real time by AI and other technologies on the network edge devices , and only the results are transmitted to the cloud. This mode greatly reduces the pressure of network bandwidth, data center power consumption, the system delay, and enhances the service response ability. At the same time, because users no longer upload privacy or sensitive data (only stored on network edge devices), the risk of network data leakage is greatly reduced, and user data security and privacy are protected.

On this basis, a new generation of MGIS is proposed, which integrates GNSS, 5G, AI, CV and other

information technologies. Its ubiquitous, real-time and intelligent features are analyzed, and three core technologies, including cross-platform kernel, simultaneous localization and mapping, pan-information-based high precision navigation map, semantic map and intelligent decision-making, are discussed, the development trend and direction are predicted.

Key words: Mobile GIS, Artificial Intelligence, UAV Remote Sensing, Internet of Things, Cloud Computing, Edge Computing, Smart Industry