



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Geospatial Information and Sensor Network

孟小亮 著

空间信息与 传感器网络



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

空间信息与传感器网络

Geospatial Information and Sensor Network

孟小亮 著



测绘出版社

• 北京 •

© 孟小亮 2016

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 提 要

随着物联网研究、教学和产业化在我国的迅速开展,射频识别技术、传感器和无线传感器网络技术正在极大地提高信息资源端对端的数据采集与应用能力,与空间信息和数字技术的结合越来越密切,表现出强大的发展潜力。本书对空间信息与传感器及传感器网络之间的关系,以及二者相结合的应用技术进行系统阐述。

本书是武汉大学空间信息与数字技术专业“空间信息与传感器网络”课程的专业教材,可供传感器网络、物联网、测绘、数字工程应用方面的科技工作者参考使用,还可以作为其他相关课程的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

空间信息与传感器网络 / 孟小亮著. —北京:测绘出版社, 2016.3

ISBN 978-7-5030-3857-0

I. ①空… II. ①孟… III. ①空间信息技术②无线电通信—传感器 IV. ①P208②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 269855 号

责任编辑	巩 岩	封面设计	李 伟	责任校对	董玉珍	责任印制	陈 超
出版发行	测绘出版社			电 话	010—83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010—68531363(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	11.75			字 数	231 千字		
版 次	2016 年 3 月第 1 版			印 次	2016 年 3 月第 1 次印刷		
印 数	0001—1000			定 价	49.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3857-0/P·823

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

在物联网、云计算、大数据、“互联网+”、3G 或 4G 高速通信技术、测绘与地理信息技术快速发展的时代背景下,我国相关产业战略对智慧城市建设和高等院校相关人才培养提出了新的需求。智慧城市建设重要目标之一是利用具有智能传感器网络的空间数据基础设施,将空间信息通过空间信息服务,用最快捷的方法和最低的成本送给最需要的用户,并实现空间信息的实时在线更新,使空间信息为从科学研究、经济建设、国防安全、人民生活到和谐社会可持续发展的各行各业提供实时智能服务。这是空间信息与传感器网络研究的意义与目标,也是本书作为一本应用技术专著兼教材的指导思想与写作目的。

空间信息与数字技术专业,作为测绘科学与计算机科学、信息科学、资源环境科学、经济与管理科学等的交叉学科,2004 年创办于武汉大学。目前,全国已有电子科技大学、西安电子科技大学、厦门理工学院、成都理工大学、山东农业大学、上海海洋大学、福建农林大学、河南工业大学和中国地质大学(武汉)等高校开设了此学科的本科专业或该专业方向的本科实验班。以上高等院校根据行业背景、地理位置、学科基础和师资情况分别制定了具有各自特色的培养目标及其主要课程的设置。以武汉大学为例,在测绘学科背景下,结合其地理、资源环境、计算机、信息和管理等优秀学科和师资条件,设立了一套特色专业课程体系。在空间信息与数字技术专业创始人边馥苓教授的提议下,经武汉大学空间信息与数字技术专业委员会讨论后通过,在国内率先开设“空间信息与传感器网络”课程作为专业必修课,并于 2009 年度写入武汉大学空间信息与数字技术专业培养方案,2011 年度第二学期正式向本科三年级学生(含国防生)开课,截至 2015 年已连续开课四个学期,作者一直担任此课程主讲教师。在课程教学过程中,作者一直进行相关科学技术应用的深入研究,收集相关资料,并着手写作此书,在实践教学中摸索前进。编写本书的目的是弥补目前这个方向没有教科书的空白。希望本书对从事相关研究与教学的科技与教育工作者具有一定的参考价值。

本书的内容覆盖范围广,涉及内容多,总结了空间信息与传感器网络相关技术的交叉知识,从空间信息与传感器网络的理论基础出发,系统阐述了传感器网络与传感网的概念、空间信息与传感器网络之间的关系、传感器网络环境下的定位与跟踪机制及其技术、三维空间中的传感器节点动态监测、基于地理位置信息的网络路由和传感器网络前沿等方面的内容。书中给出了多个应用领域中的空间信息与传感器网络应用实例,紧跟技术发展动态,介绍了近年来物联网、智慧城市对相关理

论方法与工程技术的迫切需求。

本书共分为7章。其中有一部分内容可能是读者已经了解或熟悉的知识,例如,第1章中的3S技术、射频技术和传感器技术等基本理论知识,第2章中的测距方法和定位算法,第5章中的路由协议概述等,有相关基础的读者可以采用略读或跳过的方式。第2章至第5章阐述了空间信息与传感器网络的典型交叉问题,包括目标的定位与跟踪、三维的动态监测和基于地理位置信息的网络路由等,是本书的重点和核心内容。第6章主要介绍位置隐私和传感器网络安全,随着物联网快速发展,位置隐私成为了一个重要问题。第7章是作者总结的一些空间信息与传感器网络的前沿与发展方向。

第1章主要是对相关技术的概述,包括空间信息与数字技术、射频识别技术、无线传感器网络技术、基于无线射频的主流定位技术。作者通过相关技术概念的比较,认为智慧城市、智慧交通、智慧医疗和智慧社区等智慧工程实质上是空间信息、数字工程和传感器技术的有机结合,是这些技术催生出的更加丰富的外延应用。

第2章详细阐述了在二维平面上传感器节点的定位机制与算法。首先分析了传感器节点定位的应用领域;然后讨论了定位技术的分类方法,详细说明了几种距离相关和距离无关的定位技术,介绍了节点位置计算的基本方法,列出了一系列定位算法的性能评价指标;最后对一些典型定位系统做了简单的介绍。

第3章分析了在二维平面上空间信息与数字技术和传感器网络研究中都广泛存在的一个典型问题——跟踪运动目标。给出了两个基于射频识别和传感器网络的实际应用情景,分析了面向目标定位与跟踪的网络模型构成,包括网络部署、设计需求、结构、工作过程和模拟工具等。引入协作信号和信息处理方法将跟踪问题形式化,并给出求解单目标和多目标跟踪问题的解决办法。

第4章将无线传感器网络从二维平面扩展到三维空间,以适应地下、水下和空中等实际三维应用场景。除了理论问题研究的复杂性,三维无线传感器网络更受到物理环境的严格制约,与实际应用紧密结合。本章给出了基本的三维空间模型和定位方法,最后还针对虚拟现实对节点定位精度与实时性的要求,讨论了三维定位的精度分析问题。

第5章描述空间信息在无线传感器网络中的另一个重要作用——利用地理位置信息指导网络路由。首先介绍了无线传感器网络路由的功能、关键问题和分类;然后通过几种典型的基于地理位置的路由协议,阐述了通过获取各个节点的位置信息实现能量高效转发的方法;最后详细介绍了作者及其研究团队设计的一种基于栅格网分簇的路由协议,并给出了设计基于地理位置的路由的方法。

第6章是关于传感器节点的位置隐私保护问题。分析了射频识别系统和传感器网络中的位置隐私威胁,总结了一些位置隐私的保护方法,分别介绍了射频识别

系统和传感器网络中的主要位置隐私保护技术。

第7章是对空间信息与传感器网络前沿研究的展望,以传感器网络与传感网为两条发展路线,就传感网标准与实现、语义传感网、空间传感网虚拟实验、传感器网络服务和大众传感器等方面提出了相关看法,希望读者在读完本书后一起思考空间信息与传感器网络丰富的内涵与外延。

特别感谢武汉大学边馥苓教授在本书写作过程中给予的无私帮助,边馥苓教授为本书提供了前瞻性的学术视野和厚实广博的专业知识,她一丝不苟的治学作风和无私奉献的德育精神更感染了作者,并帮助作者克服了写作过程中的重重困难。作为一项探索性和前沿性的研究工作,作者不断对本书相关研究目标与研究方向进行调整。在研究过程中,美国东密歇根大学空间信息与教育研究所所长Xie Yichun教授给予的具体技术指导,为本书带来了先进理念和方法。武汉大学国际软件学院院长崔晓晖教授、华中科技大学柳健教授、华中农业大学马才学教授对本书的指导和肯定,让作者及时了解研究需求并充满研究动力。武汉大学空间信息与数字技术专业、软件工程专业、物联网专业的很多同事为本书提供了很多主题讨论和技术建议,感谢他们的鼓励、支持和指导。感谢研究团队的教师与学生,他们为本书的资料收集付出了大量的时间和精力。另外,感谢为本书提供过帮助的所有热心的朋友们。

因为本人能力有限,书中难免存在不准确或错误的地方,如有不妥之处,请读者批评指正。

目 录

第 1 章 相关技术概述.....	1
§ 1.1 空间信息与数字技术	2
§ 1.2 射频识别技术	11
§ 1.3 传感器网络技术	15
§ 1.4 基于无线射频的定位技术	28
第 2 章 传感器节点定位机制与算法	35
§ 2.1 定位的应用领域	35
§ 2.2 定位技术分类	36
§ 2.3 距离相关的定位技术	37
§ 2.4 距离无关的定位技术	41
§ 2.5 计算节点位置的基本方法	45
§ 2.6 定位的性能评价指标	46
§ 2.7 典型传感器定位系统	48
第 3 章 典型问题:跟踪运动目标.....	51
§ 3.1 应用情景分析	51
§ 3.2 面向目标定位与跟踪的传感器网络	57
§ 3.3 求解运动目标跟踪问题	66
第 4 章 三维无线传感器网络动态监测	75
§ 4.1 三维应用情景分析	76
§ 4.2 三维拓扑组织	81
§ 4.3 三维定位机制与算法	84
§ 4.4 三维空间定位服务	99
§ 4.5 三维定位精度分析	102
第 5 章 基于地理位置信息的无线传感器网络路由.....	106
§ 5.1 无线传感器网络路由协议概述	106
§ 5.2 基于位置的能量高效分组转发	113

§ 5.3	GNCR 及模拟实验	118
第 6 章	传感器节点位置隐私保护	145
§ 6.1	位置隐私威胁	145
§ 6.2	位置隐私保护方法	147
§ 6.3	射频识别系统中的位置隐私保护技术	150
§ 6.4	无线传感器网络中的位置隐私保护技术	152
第 7 章	空间信息与传感器网络前沿展望	154
§ 7.1	传感器网络与传感网概念辨析	154
§ 7.2	传感网标准与实现	155
§ 7.3	语义传感网	158
§ 7.4	空间传感网虚拟实验	160
§ 7.5	传感器网络服务	162
§ 7.6	人是天生的传感器	163
参考文献		166

Contents

Chapter 1	Key definitions of related technologies	1
§ 1.1	Geospatial information and digital technology	2
§ 1.2	RFID	11
§ 1.3	Sensor networks	15
§ 1.4	Location technology based on radio frequency	28
Chapter 2	Location mechanism and algorithm of sensors	35
§ 2.1	Location applications	35
§ 2.2	Location technology classification	36
§ 2.3	Range-based location	37
§ 2.4	Range-free location	41
§ 2.5	The basic method of computing nodes location	45
§ 2.6	Localization algorithm performance evaluation indicators	46
§ 2.7	Typical sensor positioning systems	48
Chapter 3	A typical problem: tracking moving targets	51
§ 3.1	Application scenario analysis	51
§ 3.2	Sensor network for target location and tracking	57
§ 3.3	To solve the moving target tracking problem	66
Chapter 4	Three-dimensional WSN dynamic monitoring	75
§ 4.1	3D application scenarios analysis	76
§ 4.2	3D topological structure	81
§ 4.3	3D positioning mechanism and algorithm	84
§ 4.4	3D geospatial location services	99
§ 4.5	3D positioning accuracy analysis	102
Chapter 5	WSN routing based on geographical location information	106
§ 5.1	Summary of WSN routing protocol	106
§ 5.2	The energy efficient packet forwarding based on the location	113
§ 5.3	GNCR routing protocol and the simulation	118

Chapter 6	The sensor node location privacy protection	145
§ 6.1	Location privacy threat	145
§ 6.2	Location privacy protection methods	147
§ 6.3	Location privacy protection technology in the RFID system ...	150
§ 6.4	Location privacy protection technology in WSN	152
Chapter 7	Geospatial information and sensor network research trend	154
§ 7.1	Sensor networks and sensor web conception	154
§ 7.2	Sensor web standard and enablement	155
§ 7.3	Semantic sensor web	158
§ 7.4	Sensor network virtual experiment	160
§ 7.5	Sensor network services	162
§ 7.6	Citizens as sensors	163
References		166

第1章 相关技术概述

“空间信息”和“传感器网络”这两个名词时下非常流行,由此而产生了许多的交叉研究方向,例如,空间信息与经济相结合的区域经济,传感器网络与环境相结合的污染动态监测,空间信息、传感器网络与交通相结合的智慧交通。这些研究方向的交叉反映了地理、数学、物理与哲学等传统学科在空间问题上的思考。本书中的空间信息概念大于传统的地理信息,将空间观从传统地理学的地球表面扩展到任何空间,地图制图、遥感应用、医疗影像处理、网络路由、宇宙空间探索等均可以说是空间信息的研究领域。以空间信息为载体,利用数字技术整合、挖掘和综合应用的诸多数字工程在国内外已被广泛建设。进入物联网时代后,射频识别(radio frequency identification, RFID)技术、传感器和无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)技术极大提高了数字工程中端对端的数据采集与应用能力,并与空间信息和数字技术的结合越来越密切,表现出强大的发展潜力,产生出智慧城市、智慧交通、智慧医疗等智慧工程,这些均成为了政府、企业和民众都津津乐道的新概念。

空间信息与传感器网络分别与众多行业应用存在着广泛的联系,如图 1.1 所示,而这些联系存在很多结合点,对空间信息与传感器网络的研究实际上就是对这些结合点内涵和外延的研究。因此,本书在空间信息和传感器网络相关基本概念的基础上,描述了其在交通、物流、环境、军事等领域中的实际应用情景,分析利用空间信息与传感器网络进行定位与跟踪、网络路由、虚拟现实与动态监测等典型结合点,并试图探索空间信息与传感器网络研究中存在的问题该如何解决及将来的发展方向。

本章主要内容是相关技术的概述,包括空间信息与数字技术、射频识别技术、无线传感器网络技术、基于无线射频的主流定位技术。作者通过对相关技术概念的比较,认为智慧城市、智慧交通、智慧医疗和智慧社区等智慧工程实质上是空间信息、数字工程和传感器技术的有机结合,是这些技术催生出的外延应用。

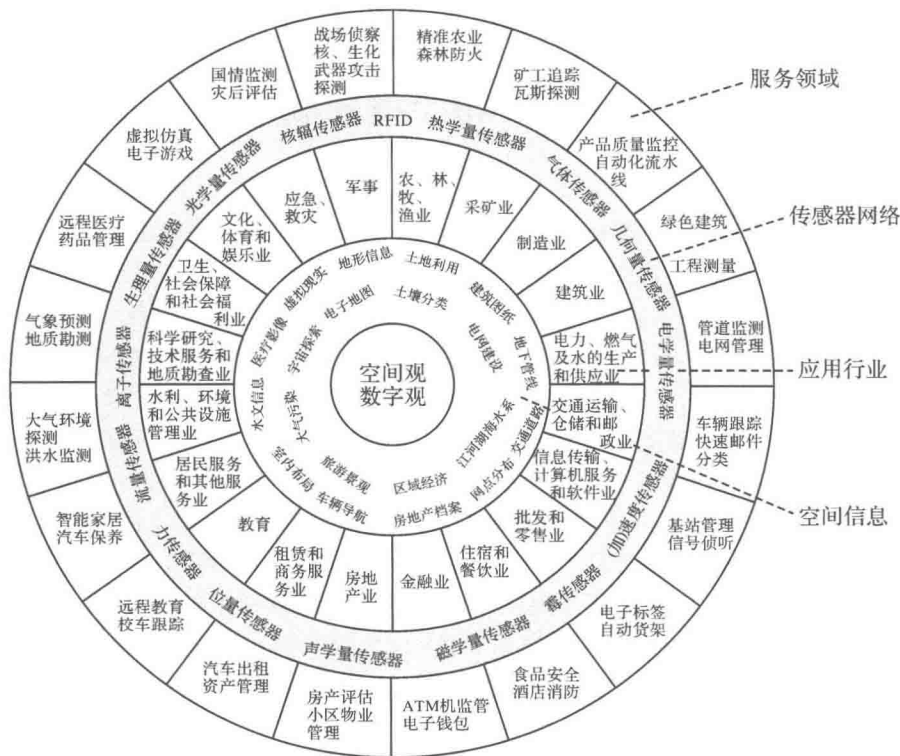


图 1.1 空间信息与传感器网络的行业应用

§ 1.1 空间信息与数字技术

空间信息与数字技术(边馥苓,2008,2011a)为传感器网络的研究提供了数据采集、管理与处理功能的理论和技术支持。本节主要介绍空间信息服务、3S集成、位置服务、数字工程与智慧工程等相关基础概念。

1.1.1 空间信息与服务

一般认为,空间数据所表达的信息称为空间信息,空间信息即有意义的空间数据(边馥苓,2009),其三要素表现为地点、时间和人物。人类社会经济生活与空间信息密切相关,尤其是全局性、战略性的重大问题,其大部分内容或者直接与空间信息相关联,或者间接利用空间信息解决问题。

随着人类社会的信息化进程逐步加快,以地球表面位置为参照的自然、社会、人文和经济等数据所代表的空间信息无论是在数量级还是复杂性上都在迅速地增长。人们需要更有效的手段对存储在网络上的各种大量空间信息进行获取、处理

与应用。由于互联网(internet)的迅速发展和普及,为空间信息处理与管理提供了新的操作平台,产生了很多相应的网络空间信息服务产品。空间信息需要被广泛共享、交换与使用,这使得空间信息的存储与处理环境从传统的集中式向目前流行的分布式方向发展。分布式指数据和程序分散在多个服务器,以网络上分散分布的数据及受其影响的数据处理为研究对象的一种理论计算模型。分布式有利于空间信息处理任务在整个计算机系统上进行分配与优化,克服了传统集中式系统会导致中心主机资源紧张与响应瓶颈的缺陷。很明显,传统的集中式环境很难满足分工明确的现代社会的需求,分布式环境已成为空间信息处理与管理的主要发展趋势。

不同领域和部门之间空间信息共享、交换和使用的需求使空间信息的管理和处理不再仅局限于专业用户,已经开始向社会化和大众化的应用需求发展。这种发展需求使空间信息共享、交换和使用从面向空间信息管理转变为面向空间信息服务。服务是通过接口向外发布的功能实体,可以提供用户使用空间信息的各种功能,即以服务接口规范为基础的互操作方式提供了一种支持空间信息的共享、交换和使用的有效解决方案。图 1.2 描述了一种基于面向服务体系架构(service oriented architecture, SOA)和工作流引擎的空间信息服务模式(Meng et al, 2009a, 2009b, 2010),此外,还包括含状态传输(representational state transfer, REST)(Fielding, 2000)等服务模式。无论哪种架构或者形式,都必须遵从标准的服务接口规范,才能实现异构平台和异源数据的互操作。目前,国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)^①、电气电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)^②、开放地理信息联盟(Open Geospatial Consortium, OGC)^③和美国联邦地理数据委员会(Federal Geographic Data Committee, FGDC)^④等标准化机构对空间信息管理与处理功能模块划分和接口规范进行了大量的研究,并颁布了一系列标准规范。

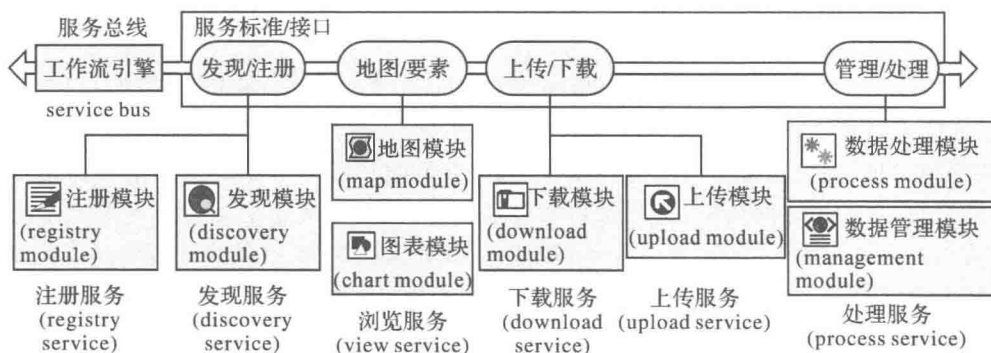


图 1.2 基于 SOA 的空间信息服务模式

- ①网址(<http://www.iso.org/>)。
 ②网址(<http://www.ieee.org/>)。
 ③网址(<http://www.opengeospatial.org/>)。
 ④网址(<http://www.fgdc.gov/>)。

在此背景下,要求空间信息的管理与功能处理从紧耦合(tight-coupling)、集中(central)、封闭(closing)向松散耦合(loose-coupling)、分布式(distributed)、开放(open)的方向发展。随着这样的过渡,作为空间信息采集、管理与功能处理的传统 3S 集成技术也随之向具有松散耦合特点的分布式环境下易于集成的空间信息服务(geospatial information services)的方向发展(孟小亮,2009)。

1.1.2 3S 集成

一般来说,3S 集成是将地理信息系统(geographic information system, GIS)、全球定位系统(Global Position System, GPS)和遥感(remote sensing, RS)技术根据应用需要,有机地组合成一体化的、功能更强大的新型系统的技术和方法(冯学智,2007)。随着空间信息服务、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)和摄影测量(photogrammetry)等技术对 3S 集成的扩展,3S 集成也逐渐泛指空间信息相关技术的大集成。

1. GIS

仅用分类与制图的方法,不可能充分地利用空间信息,加上早期计算机不能处理地图数据,直至 20 世纪 50 年代才开始运用计算机制作气候图,分析农业地理数据和人口数据等。20 世纪 60 年代加拿大学者 Roger Tomlinson 首先提出了 GIS 这一概念(Greiner,2007),并开发了世界上第一个地理信息系统(Canadian GIS, CGIS),用于自然资源的管理与规划。此后,国内外对 GIS 的相关研究和教学已经非常普遍,其定义可以归纳为:以地理空间数据为基础,在计算机软硬件的支持下,对空间相关数据进行采集、管理、操作、模拟、分析和显示,并采用地理模型分析方法,适时提供多种空间和动态的地理信息,是为地理研究和地理决策服务而建立起来的计算机技术系统,GIS 即为空间数据的管理系统(边馥苓,1996;李建松,2006;汤国安等,2010)。

目前,在我国高等教育中,根据中华人民共和国教育部高等教育司(2014)印发的《普通高等学校本科专业目录》,地理信息系统专业已改为地理信息科学专业,说明研究的兴趣从侧重于 GIS 技术和工具,转变到这些技术和工具引起的相关基本科学问题,包括空间分析、地图投影和可视化等,GIS 的概念也延伸到了对地理空间知识的系统学习。与之比较,空间信息与数字技术专业、物联网工程专业等则被归为计算机科学,相关课程和研究广泛应用 GIS,体现了目前多学科集成的新趋势。信息技术(information technology, IT)浪潮更将 GIS 从专业领域应用推向大众科学,图 1.3 从技术角度出发,描述了目前 GIS 的这种发展趋势。

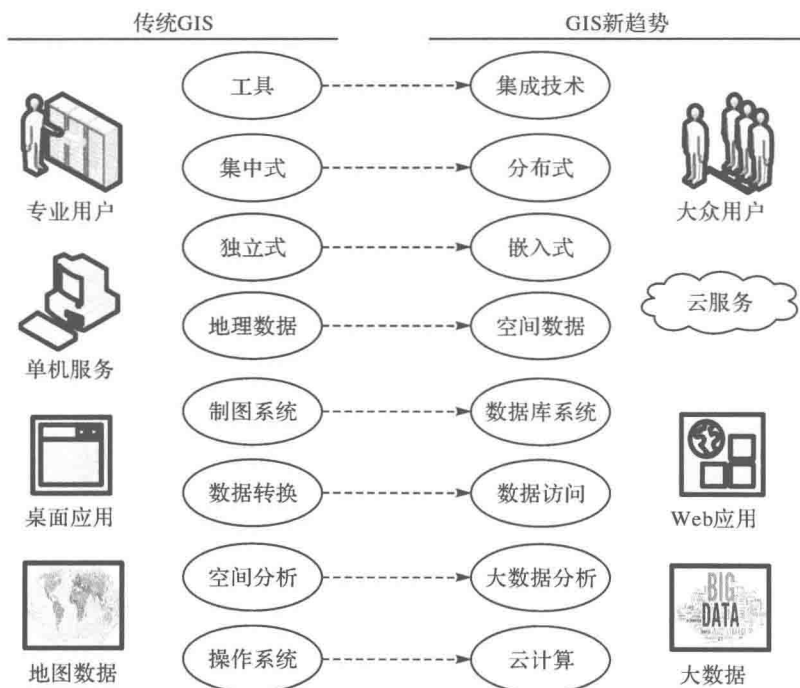


图 1.3 GIS 发展趋势

2. GPS 与 GNSS

GPS 是目前世界上最常用的卫星导航系统,它是美国国防部研制的新一代精密卫星导航和定位系统,最初设计为军用,1964 年投入使用,主要由 24 颗工作卫星组网。20 世纪 80 年代逐渐允许民间使用,但对民用仍有很多限制,仅军用接收机可以享受高质量的信号,供民用的信号质量被故意降低。2000 年以后,美国取消了这种区别对待,民用信号也可以达到 10 m 级的精度,在很大程度上拓展了 GPS 在民用方面的应用(黄丁发 等,2009;李天文,2010)。GPS 不仅具有全球全天候连续覆盖、高精度三维定位、定时、测速与导航功能,而且抗干扰能力强,保密性能好。GPS 的应用领域已经非常广泛,包括控制测量、工程测量、地形地籍测量、海洋测绘、航测、遥感、卫星定轨、月球与火星测绘、飞机与轮船导航、地面交通管理、通信、旅游等各行业。

全球导航卫星系统最早由欧盟提出,是一个综合星座系统,是所有在轨工作的卫星导航定位系统的总称,包括美国的 GPS、俄罗斯的格洛纳斯(GLONASS)、中国的北斗卫星导航系统(Beidou Navigation Satellite System, BDS)和欧盟的伽利略(Galileo)四大全球卫星系统。此外,一些国家的区域系统,如美国的广域增强系统(wide area augmentation system, WAAS)和局域增强系统(local area

augmentation system, LAAS)、日本的 QZSS 及印度的 IRNSS 等也包括在内, GNSS 可用卫星数已达 100 颗以上(霍夫曼-韦伦霍夫 等, 2009; 纪龙蛰 等, 2012)。图 1.4 是四大全球卫星系统的空间部分示意图。卫星导航定位系统的工作原理将在 1.4.1 节介绍。

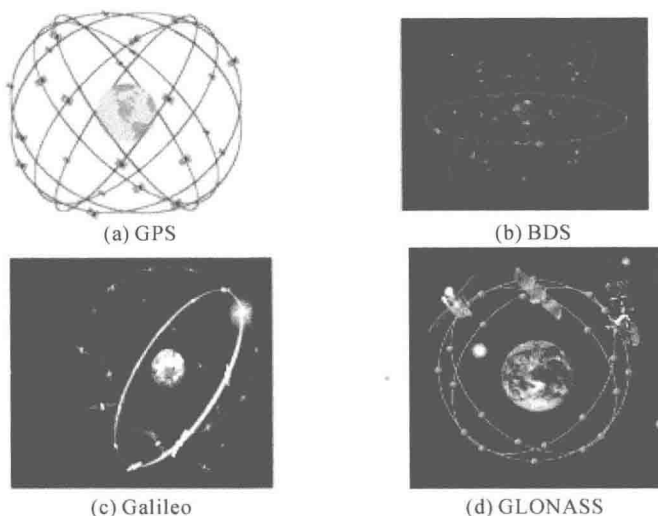


图 1.4 四大全球卫星系统空间部分示意^①

3. 摄影测量与遥感

1988 年, 国际摄影测量与遥感协会(International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS)在日本京都召开的第 16 届大会上定义摄影测量与遥感为: 对非接触传感器系统获得的影像及其数字表达进行记录、量测和解译, 从而获得自然物体和环境的可靠信息的一门工艺、科学和技术(李德仁, 2008; 邹晓军, 2011)。影像是客观物体或目标的真实反映, 包含物体的几何信息和物理信息, 摄影测量正是将目标物体摄成影像, 并在像片上进行量测和解译就可获取其信息, 而不用接触目标物体本身。

根据摄影平台的不同, 可分为地面、航空、航天和显微摄影测量等: ①地面摄影测量一般将摄影机安置在地面, 对地表对象进行摄影获取其信息, 常用于工程测量, 还可用于工业和运动物体测量等领域, 又称为近景摄影测量; ②航空摄影测量是将摄影机(或传感器)安装在飞机、无人机、气球甚至风筝等飞行器上, 飞行器在预设航线上飞行, 摄影机(或传感器)每隔一定时间对地面进行拍照或扫描, 根据摄取的地面照片获取地表信息的方式, 是目前快速获取和更新地理信息的主要技术手段; ③航天摄影测量是将摄影机(或者传感器)安置在卫星上, 并对地球表面进行

^①图片来源: 北斗卫星导航系统网站(beidou.gov.cn)。

拍照或扫描,以获取地面影像,传统的遥感即航天摄影测量,随着高分辨率传感器的快速发展,航天摄影测量已成为国情监测的重要数据源;④显微立体摄影测量是利用扫描电子显微镜对研究对象进行扫描摄影,通过解析分析,获取对象表面待定点的三维坐标、状态几何位置、光滑度及等值线图等信息,一般用于医学领域。

根据是否利用模式识别技术,摄影测量又可分为解析和数字摄影测量,后者继续和扩展了前者的严密解算理论,利用计算机的“数字眼光”(边馥苓,2011b)代替“人眼”进行立体观测,实现自动或半自动识别。

图 1.5 描绘了摄影测量与遥感和空间信息与数字技术之间的关系。

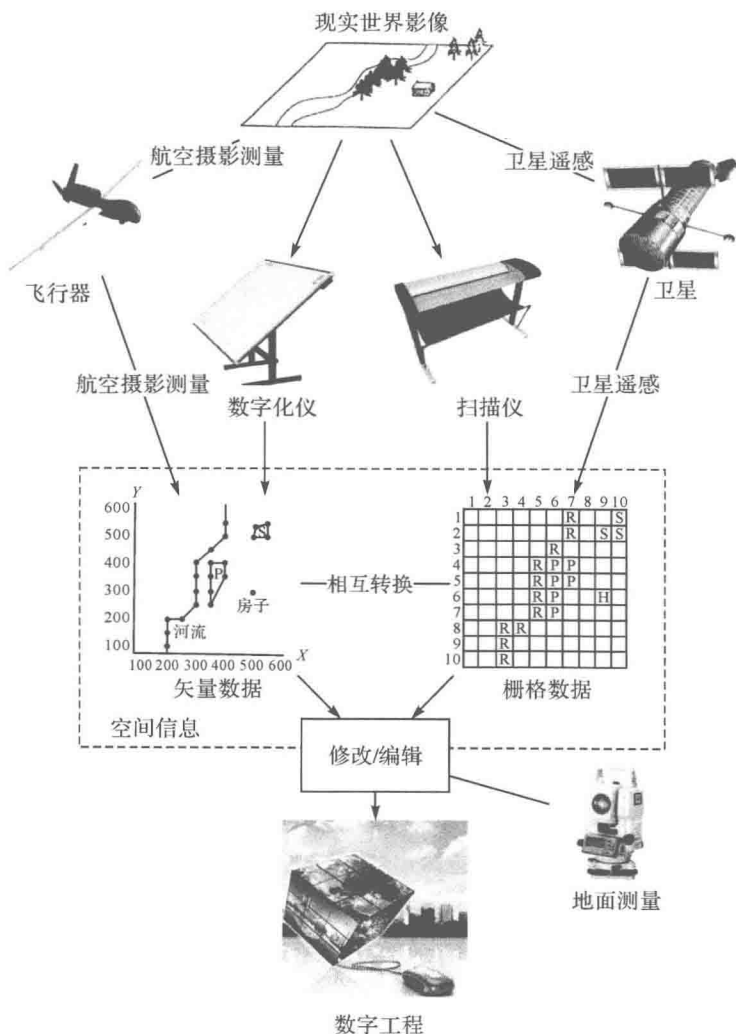


图 1.5 摄影测量与遥感和空间信息与数字技术之间的关系