地信网论坛
BBS.3S001.COM

国家"十五"重点图书

数字地球基础丛书

空间信息系统的集成与实现



李德仁 关泽群 著

全国优秀出版社
武汉大学出版社

地信网论坛
BBS.3S001.COM

(鄂)新登字 14 号

图书在版编目(CIP)数据

空间信息系统的集成与实现/李德仁,关泽群著.一武汉:武汉测绘科技大学出版社,2000.3
(数字地球基础丛书)

Ⅰ.空… Ⅱ.①李…②关… Ⅲ.①数字地球 ②空间信息系统 Ⅳ.P208

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 14779 号

责任编辑:徐 方 董 巍 任 翔 封面设计:曾 兵
武汉测绘科技大学出版社出版发行
(武汉市珞喻路 129 号,邮编 430079)
E-mail: dzcb@ wtusm.edu.cn
武汉工业大学出版社印刷厂印刷

开 本:787×1092 1/16 印 张:15.75 字 数:343 千字 插 页:8
2000 年 3 月第 1 版 2000 年 3 月第 1 次印刷
定 价:30.00 元(平) 45.00 元(精)

地信网论坛
BBS.3S001.COM

地信网论坛
BBS.3S001.COM

前　言

近二三十年来，现代空间信息技术的综合应用有了飞速发展，使得人们能够及时和连续不断地获得有关地球表层及其环境的大量几何与物理信息，形成地球空间数据流和信息流，从而促成了地球空间信息科学技术体系的产生。在这个技术体系中，最基础和基本的技术核心是“3S”技术及其集成。所谓“3S”是全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)和遥感(RS)的统称。没有“3S”技术的发展，现实变化中的地球是不可能以数字的方式进入计算机网络系统的。

“3S”集成是指将上述三种对地观测新技术及其它相关技术有机地集成在一起。这里所说的集成，是英文 Integration 的中译文，是指一种有机的结合、在线的连接、实时的处理和系统的整体性。GPS、GIS 、RS 集成的方式可以在不同技术水平上实现。

“3S”集成包括空基“3S”集成与地基“3S”集成。空基“3S”集成：用空—地定位模式实现直接对地观测，主要目的是在无地面控制点(或有少量地面控制点)的情况下，实现航空航天遥感信息的直接对地定位、侦察、制导、测量等。地基“3S”集成：车载、舰载定位导航和对地面目标的定位、跟踪、测量等实时作业。

“3S”的提法虽已经广为流传，但由于将空间定位技术(目前主要指 GPS 技术)、遥感技术和地理信息系统技术集成为一体，不论从理论上还是在实践中，都是一项难度很大的工作，即使在发达国家也仅属起步阶段，而国内实际上还处在理论探讨阶段。鉴于这种原因，为了跟上国际在该领域的发展，结合过去 10 年中武汉测绘科技大学在 GPS 辅助空中三角测量、国产 GIS 软件 GeoStar 和 CCD 实时立体摄影测量方面的成果，借助测绘遥感信息工程国家重点实验室的支持，在国家自然科学基金重点项目“遥感、地理信息系统和全球定位系统集成理论与关键技术”的资助下，以李德仁院士为课题主持人，由数十名教授、副教授、博士生和硕士生组成课题组，对空间信息系统的集成与实现进行了深入的理论探讨和一系列的实验。经过数年的艰苦努力已取得重要进展：

(1)在 GIS 与 RS、GPS 与 RS、GPS 与 GIS 两两的集成理论与关键技术方面已取得一系列成果；

(2)已对 GPS + RS + GIS、GPS + GIS + CCD 的整体集成开展了有成效的理论与实际工作；

(3)在空间信息的融合、空间概念的形成与联想、空间知识发现与数据挖掘等方面做了大量开拓性的工作，它们对促进空间信息系统的集成有重要作用。

地信网论坛
BBS.3S001.COM

第 1 章　绪 论

早在 20 世纪 70 年代,集成概念已非鲜闻,集成技术也逐步得到应用。但用现代系统科学与信息技术的观点来解释集成思想，并把这种思想用于遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和空间定位系统(主要指 GPS 全球定位系统）的集成，形成一个较完整的系统集成理论、技术与方法体系，则是空间信息领域的专家学者近年来一直在致力探索的事情。空间信息集成系统的核心在于系统集成，实现各单元信息系统的异构同化和同构整体化；这是一个多学科多技术相互渗透的并行、重构与协同过程，是多方法多机制相互融合以产生突破与聚变的过程。本书将从空间信息系统的集成与实现的角度就这方面的问题作系统的探讨。

1.1 “Geomatics ”与多学科集成[1]

1.1.1 “Geomatics ”一词的出现过程

“Geomatics ”一词最早于 60 年代末期出现在法国，法国的大地测量和摄影测量学家 Bernart Dubuisson于 1975 年将该词的法文‘ Geomatique ”正式用于科学文献。1990 年 Gagnon P.[2] 将‘ Geomatics ’定义为“利用各种手段，通过一切途径来获取和管理有关空间基础信息的空间数据部分的科学技术领域 ”。随即,加拿大、澳大利亚、英国、荷兰、香港等国家和地区的一些高等学校的测量工程系、政府机构、杂志等出现了更名热潮。例如,加拿大拉瓦尔大学、卡尔加里大学、新不伦瑞克大学将测量工程系改名为‘ Geomatics ’系,加拿大学者 Groot 到荷兰 ITC 任教,将测量学、摄影测量学、遥感图像处理、地图制图、土地信息系统以及计算机科学几个教研室合起来成立了‘ GeoInformatics ’系。同年,加拿大能源矿产资源部将其测绘和遥感局改名为‘ Geomatics Canada”。加拿大的测量员杂志和军事测绘杂志也改了杂志名。目前连曾对“Geomatics ”持观望态度的德国和美国也开始接受‘ Geomatics ’一词。

从以上“ Geomatics”一词出现的过程可以看出,“Geomatics”反映了现代测绘科学、遥感和地理信息学等学科与现代计算机科学和信息科学相结合的多学科集成以满足对空间信息要求的趋势。

1.1.2 国外学者、组织对“Geomatics”给出的各种定义

现在让我们分析一下国际上对“Geomatics”给出的各种定义并展开一些讨论。

首先是 Groot 教授的定义：“Geomatics 是研究空间信息的结构与性质，信息的获取、分类和合格化以及存储、处理、描绘、传播和确保其优化使用的基础设施科学技术”。

卡尔加里大学 Schwarz 教授的定义是：“Geomatics 是一个现代术语，描述一种采集、分析、表示、存储、发布和管理与空间分布有关数据的集成方法”。由于该教授是大地测量学家，他又强调指出：“天文测量和大地测量学，由于使用了地面、舰船、航空和太空平台传感器（不仅仅是影像传感器）来采集各种类型的空间数据，也应当包含在 Geomatics 之中”。

加拿大能源矿产资源部的定义是：“Geomatics 是我们新名字的一部分，因为它是我们各学科的一个简单的集合词。这些学科是测量学、制图学、遥感、地图学、摄影测量学和地理信息系统。所有这些学科都与地理信息的采集、处理、解译和发布有关”。

澳大利亚新南威尔士大学 Trinder 教授的定义是：“Geomatics 是一个现代科学术语，用以表示量测、分析、管理、存储和显示基于地球数据（即通常说的空间数据）的描述和位置的集成方法。这些数据来自各种数据源，包括地球轨道卫星、空载和舰载传感器及地面仪器。利用计算机硬件和软件，借助现代信息技术来处理和管理空间数据。它的应用覆盖所有依赖空间数据的学科，包括环境研究、规划、工程学、导航、地质和地球物理学、海洋学、国土开发、土地经营和旅游学”。

新西兰国际 Geomatics 杂志的有关定义是：“Geomatics 是一个集合词，代表了所有与采集、处理、查询、表示和管理与空间信息的学术活动”。

西班牙国家团体的定义是：“Geomatics 是一个新的学科，它包括了所有的用电子计算机处理地理信息的各种科学与技术。它覆盖了大地测量学、地形学、遥感、摄影测量、地理信息系统（GIS）、土地信息系统（LIS）、自动测图和市政工程管理（AM/FM）、重力测量、地震学、水文学、地籍学和其它地球科学”。

美国 Webster 字典（第三版，1993 年）所作的定义是：“Geomatics 是地球的数学，它强调的是所有现代地理科学的严格技术支撑”。

从以上七个由不同国家的不同专家给出的定义可以看出，以下几个方面是一致和公认的：

(1)“Geomatics”涵盖了现代测绘科学的全部内容；

(2)“Geomatics”强调了对地球空间数据和信息的计算机技术处理；

(3)“Geomatics”强调了相关学科的综合，强调对地球空间数据（Geo-Spatial data）的集成处理，强调从数据采集、处理、量测、分析、管理、存储、显示到发布的信息流全过程。

各种定义中也有一些差异。有些定义中用地理信息（Geographic information），有些用空间信息（Spatial information），也有用基于地球的数据（Earth based data）。所涵盖的学科有的定义多，有的定义少，特别是 Webster 字典简单地用地球的数学来定义“Geomatics”，独具特

色。

到了 1996 年，国际标准化组织(ISO) 终于给出了“Geomatics”的定义：“Geomatics is a field of activity which, using a systematic approach, integrates all the means used to acquire and manage spatial data required as part of scientific, administrative, legal and technical operations involved in the process of production and management of spatial information. These activities include, but are not limited to, cartography, control Surveying, digital mapping, geodesy, geographic information systems, hydrography, land information management, land surveying, mining surveying, photogrammetry and remote sensing”。ISO 还给出以下的简明定义：“Geomatics is the modern scientific term referring to the integrated approach of measurement, analysis, management and display of spatial data”。

1.1.3 “Geomatics”应译为地球空间信息学

基于上述论述，作者有理由认为“Geomatics”一词应译为“地球空间信息学”。

从国际标准化组织（ISO）给出的定义可明显看出：

(1)“Geomatics”处理的是空间数据(Spatial data) 和空间信息(Spatial information)；

(2)“Geomatics”作为一个科学术语，所涉及的是采集、量测、分析、存储、管理、显示和应用空间数据的集成方法，属于现代的空间信息科学技术；

(3)“Geomatics”所涵盖的学科范围包括(但不限于)地图学、控制测量、数字测图、大地测量、地理信息系统，水道测量、土地信息管理、土地测量、摄影测量、遥感、重力测量和天文测量。所采用的方法有星载、机载、舰载和地面数据采集方法，属于现代测绘科学与计算机信息科学的集成，归属于空间信息科学。

从“Geomatics”的构词过程可以看出，它分为两部分“Geo”，和“matics”。“Geo”，可以理解为地球或地学，不宜理解为地理，更确切地应理解为 Geo - spatial 的缩写，宜译作地球空间；“matics”可以理解为 informatics 或 mathematics 的缩写，宜译为信息学。所以，“Geomatics”宜译为“地球空间信息学”。

国内文献曾将“Geomatics”译成“地理信息学”或“地球信息学”。作者认为这两种译法均不够准确，不能反映国际标准化组织和各国测绘学家对“Geomatics”给出的定义。地理学以人与自然关系为中心，研究四大圈层(大气圈、水圈、生物圈和岩石圈)之间的相互作用。地球空间信息并不能涵盖全部地理信息，尤其是人文地理方面的信息。而且国际地理学界没有利用“Geomatics”这个词，也没有给“Geomatics”下过正式的定义。

“Geomatics”不宜译作“地球信息学”的理由是明显的。地球作为一个复杂的巨系统，需要获取和利用地球信息来研究它。从目前地球科学的发展看，地球信息科学除了包括地球空间信息学外，还包括地质学、地球物理学、地球化学、大气科学、气象科学、生态学、环境科学等诸多地球科学学科提供的关于地球的信息，包括过去的、现在的和未来的地球信息。以全球定位

系统(GPS)、航空航天遥感(RS)、地理信息系统(GIS) 和计算机技术、通讯技术为主要手段的地球空间信息科学，只能以地球的数学这种形式来为地球信息科学提供空间基础数据。所以，地球空间信息科学是地球信息科学的组成部分，为之提供空间框架。以上说明将" Geomatics" 译为 " 地球空间信息学 " 充分反映了国际标准化组织(ISO)对" Geomatics "所下定义的完整内容，反映了传统测绘科学与遥感、地理信息系统、多媒体通讯等现代计算机科学和信息科学的集成。其意义远远超出了讨论一个名词译法的范围，而是标志着推动地球科学研究从定性走向定量、从模拟走向数字、从孤立静止走向整体动态乃至实时的信息化过程。它将成为我们探讨空间信息系统的集成与实现问题的出发点。

1.2 地球空间信息学与数字地球[3,4,5]

1.2.1 地球空间信息学

地球空间信息科学(Geo - Spatial Information Science 简称 Geomatics)是以全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)、遥 感(RS) 等空间信息技术 (简称 3S) 为主要内容,并以计算机技术和通讯技术为主要技术支撑,用于采集、量测、分析、存贮、管理、显示、传播和应用与地球和空间分布有关数据的一门综合和集成的信息科学和技术。它是地球科学的一个前沿领域，是地球信息科学的重要组成部分，是数字地球的基础。

1)地球空间信息学的形成

随着社会和经济的迅速发展，人类活动引起的全球变化日益成为人们关注的焦点。从最近几个世纪的历史看，人类活动对生态环境的影响主要是向变坏的方面发展。随着世界人口的急剧增加，造成资源的大量消耗、生态环境恶化也成为有目共睹的事实。地球及其环境是一个复杂的巨系统，为了解决上述问题，要求以整体的观点认识地球。随着人类社会步入信息时代，有关地球科学问题的研究需要以信息科学为基础，并以现代信息技术为手段，建立地球信息的科学体系。地球空间信息科学，作为地球信息科学的一个重要分支学科，将为地球科学问题的研究提供数学基础、空间信息框架和信息处理的技术方法。

地球空间信息广义上指各种空载、星载、车载和地面测地遥感技术所获取的地球系统各圈层物质要素存在的空间分布和时序变化及其相互作用信息的总体。" 地球空间信息科学 " 作为信息科学和地球科学的边缘交叉学科，它与区域乃至全球变化研究紧密相连，是现代地球科学为解决社会可持续发展问题的一个基础性环节。

空间定位技术、航空和航天遥感、地理信息系统和互联网等现代信息技术的发展及其相互间的渗透,逐渐形成了地球空间信息的集成化技术系统。近二三十年来，这些现代空间信息技

术的综合应用有了飞速发展，使得人们能够快速及时和连续不断地获得有关地球表层及其环境的大量几何与物理信息,形成地球空间数据流和信息流,从而促成了“地球空间信息科学”的产生。

地球空间信息科学不仅包含现代测绘科学的所有内容，而且体现了多学科的交叉与渗透，并特别强调计算机技术的应用。地球空间信息科学不局限于数据的采集，而是强调对地球空间数据和信息从采集、处理、量测、分析、管理、存储、到显示和发布的全过程。这些特点标志着测绘学科从单一学科走向多学科的交叉；从利用地面测量仪器进行局部地面数据的采集到利用各种星载、机载和舰载传感器实现对地球表面及其环境的几何、物理等数据的采集；从单纯提供静态测量数据和资料到实时／准实时地提供随时空变化的地球空间信息；将空间数据和其他专业数据进行综合分析，其应用已扩展到与空间分布有关的诸多方面，如：环境监测与分析、资源调查与开发、灾害监测与评估、现代化农业、城市发展、智能交通等。

推动地球空间信息科学发展的动力有两个方面：一是方面现代航天、计算机和通讯技术的飞速发展为地球空间信息科学的发展提供了强有力的技术支持；另一方面全球变化和社会可持续发展日益成为人们关注的焦点，而作为其主要支撑技术的地球空间信息科学必然成为优先发展的领域。具体表现为：地球空间信息科学理论框架逐步完善，技术体系初步建立，应用领域进一步扩大，产业部门逐步形成。

2)地球空间信息学的理论基础

地球空间信息科学理论框架的核心是地球空间信息机理。地球空间信息机理作为形成地球空间信息科学的重要理论支撑，通过对地球圈层间信息传输过程与物理机制的研究，揭示地球几何形态和空间分布及变化规律。主要内容包括 地球空间信息的基准、标准、时空变化、认知、不确定性、解译与反演、表达与可视化等基础理论问题。

(1) 地球空间信息基准

地球空间信息基准包括几何基准、物理基准和时间基准，是确定一切地球空间信息几何形态和时空分布的基础。地球参考坐标系轴向对地球体的定向是基于地球自转运动定义的，地球动力过程使地球自转矢量以各种周期不断变化；另一方面，作为参考框架的地面基准站又受到全球板块和区域地壳运动的影响。因此，区域定位参考框架与全球参考框架的连接和区域地球动力学效应问题，是地球空间信息科学和地球动力学交叉研究的基本问题。

(2) 地球空间信息标准

地球空间信息具有定位特征、定性特征、关系特征和时间特征,它的获取主要依赖于航空、航天遥感等手段。各种遥感仪器所感受的信号，取决于错综复杂的地球表面和大气层对不同电磁波段的辐射与反射率。地球空间信息产业发展的前提是信息的标准化，它作为一种把地球空间信息的最新成果迅速地、强制性地转化为生产力的重要手段，其标准化程度将决定以地球空间信息为基础的信息产业的经济效益和社会效益。主要包括：空间数据采集、存贮与交换格式标准、空间数据精度和质量标准、空间信息的分类与代码、空间信息的安全、保密及技术服

务标准等。

(3) 地球空间信息时空变化

地球及其环境是一个时空变化的巨系统，其特征之一是在时间－空间尺度上演化和变化的不同现象，时空尺度的跨度可能有十几个数量级。地球空间信息的时空变化理论，一方面从地球空间信息机理入手，揭示和掌握地球空间信息的时空变化特征和规律，并加以形式化描述，形成规范化的理论基础，使地球科学由空间特征的静态描述有效地转向对过程的多维动态描述和监测分析。另一方面，针对不同的地学问题，进行时间优化与空间尺度的组合，以解决诸如不同尺度下信息的衔接、共享、融合和变化检测等问题。

(4)地球空间信息认知

地球空间信息以地球空间中各个相互联系、相互制约的元素为载体，在结构上具有圈层性,各元素之间的空间位置、空间形态、空间组织、空间层次、空间排列、空间格局、空间联系以及制约关系等均具有可识别性。通过静态上的形态分析、发生上的成因分析、动态上的过程分析、演化上的力学分析以及时序上的模拟分析来阐释与推演地球形态，以达到对地球空间的客观认知。

(5) 地球空间信息不确定性

由于地球空间信息是在对地理现象的观测、量测基础上的抽象和近似描述，因此存在不确定性,而且它们可能随着时间发生变化,这使得地球空间信息的管理非常复杂、困难。同时,这些差异会对信息的处理、分析结果产生影响。地球空间信息的不确定性包括：类型的不确定性、空间位置的不确定性、空间关系的不确定性、时域的不确定性、逻辑上的不一致性和数据的不完整性。

(6) 地球空间信息解译与反演

通过对地球空间信息的定性解译和定量反演，揭示和展现地球系统现今状态和时空变化规律。从现象到本质回答地球科学面临的资源、环境和灾害诸多重大科学问题是地球空间信息科学的最终科学目标。地球空间信息的解译与反演涉及范围广泛的地球学科。

(7) 地球空间信息表达与可视化

由于计算机中的地球空间数据和信息均以数字形式存贮，为了使人们更好地了解和利用这些信息，需要研究地球空间信息的表达与可视化技术方法。主要涉及到空间数据库的多尺度(多比例尺)表示、数字地图自动综合、图形可视化、动态仿真和虚拟现实等。

3 地球空间信息学的技术体系

地球空间信息科学的技术体系是指贯穿地球空间信息采集、处理、管理、分析、表达、传播和应用的一系列技术方法所构成的一组完整的技术方法的总和。它是实现地球空间信息从采集到应用的技术保证,并能在自动化、时效性、详细程度、可靠性等方面满足人们的需要。地球空间信息科学技术体系是地球空间信息科学的重要组成部分，它的建立依赖于地球空间信息科学基础理论及其相关科学技术的发展，包括以下几个大的方面：

(1) 空间定位(GPS)技术

GPS 作为一种全新的现代定位方法，已逐渐在越来越多的领域取代了常规光学和电子仪器。80年代以来,尤其是 90 年代以来,GPS 卫星定位和导航技术与现代通信技术相结合，在空间定位技术方面引起了革命性的变化。用 GPS 同时测定三维坐标的方法将测绘定位技术从陆地和近海扩展到整个海洋和外层空间，从静态扩展到动态，从单点定位扩展到局部与广域差分，从事后处理扩展到实时（准实时）定位与导航，绝对和相对精度扩展到米级、厘米级乃至亚毫米级，从而大大拓宽它的应用范围和在各行各业中的作用。

(2) 航空航天遥感(RS)技术

当代遥感的发展主要表现在它的多传感器、高分辨率和多时相特征。国外已有或正研制地面分辨率为 1－3m 的航天遥感系统，俄罗斯也将原军方保密的分辨率为 2m 的间谍卫星影像公开出售。在影像处理技术方面，开始尝试智能化专家系统。遥感信息的应用分析已从单一遥感资料向多时相、多数据源的复合分析，从静态分析向动态监测过渡，从对资源与环境的定性调查向计算机辅助的定量分析过渡，从对各种现象的表面描述向软件分析和计量探索过渡。近年来，由于航空遥感具有的快速机动性和高分辨率的显著特点使之成为遥感发展的重要方面。

(3) 地理信息系统(GIS)技术

随着“数字地球”这一概念的提出和人们对它的认识的不断加深，从二维向多维动态以及网络方向发展是地理信息系统发展的主要方向，也是地理信息系统理论发展和诸多领域的迫切需要如资源、环境、城市等。在技术发展方面,一个发展是基于 Client/Server 结构,即用户可在其终端上调用在服务器上的数据和程序。另一个发展是通过互联网络发展 Internet GIS 或 Web－GIS,可以实现远程寻找所需要的各种地理空间数据,包括图形和图像,而且可以进行各种地理空间分析，这种发展是通过现代通讯技术使 GIS 进一步与信息高速公路相接轨。

(4)数据通讯技术

数据通讯技术是现代信息技术发展的重要基础。地球空间信息技术的发展在很大程度上依赖于数据通讯技术的发展,在 GPS、GIS 和 RS 技术发展过程中,高速度、大容量、高可靠性的数据通讯是必不可少的。目前在世界范围内通讯技术正处于飞速发展阶段，特别是宽带通讯、多媒体通讯、卫星通讯等新技术的应用以及迅速增长的需求，为数据通讯技术的发展创造了良好的外部环境。

1.2.2 数字地球

戈尔副总统在‘数字地球——认识 21 世纪我们这颗星球’的报告中,比较详尽地阐述了数字地球的概念。所谓“数字地球”，可以理解为对真实地球及其相关现象统一的数字化重现和认识。其核心思想是用数字化的手段来处理整个地球的自然和社会活动诸方面的问题，最大限度地利用资源，并使普通百姓能够通过一定方式方便地获得他们所想了解的有关地球的信

息,其特点是嵌入海量地理数据,实现多分辨率、三维对地球的描述,通俗地说就是虚拟地球。

1)数字地球的关键技术

戈尔副总统在报告中提到的数字地球关键技术包括：计算科学、大规模存储、高分辨率卫星图像、宽带网络、互操作性和元数据。概括起来有以下四点：

(1) 高分辨率卫星遥感

目前，在高分辨率遥感卫星的研制和发射方面，世界各国展开了激烈竞争，一些发达国家和发展中国家投入了大量的人力和物力如 美国、法国、印度等。1m 分辨率的卫星影像是人类即将获得的最高分辨率的民用卫星对地观测图像，它能够满足包括 1:1 万以上比例尺的测图，以及农业、资源、环境、交通、军事等诸多方面的应用,它是构成数字地球最基本的空间数据,并作为其他非空间数据的载体和框架，从而实现数字地球的空间定位。与此相关的空间信息获取技术包括 雷达卫星技术、小卫星技术、机星地一体化空间信息获取与处理技术。

(2) 高速网络与数据标准

数字地球的大量数据分布在世界各地的不同数据库中，并且由不同的机构进行维护，这些数据必须通过高速网络连接起来如 :ATM 技术。以 10^{15}信息传输单位的新一代因特网为代表的高速网络能够实现包括图像在内的多种数据在网络上快速传输。与此同时，全球统一完整的数据交换标准、规范也是实现数字地球的重要基础，否则来自不同数据库的各种数据将无法实现互操作和交换。

(3) 大规模存储与元数据

由于数字地球要求存储数倍于 10^{15}字节的信息，大规模的存储能力是实现数字地球的基本条件。一方面，各种数据压缩技术的不断发展能够实现对多种数据的快速压缩如：影像、多媒体数据，使得在网络上快速移动海量数字图像成为可能，并且随着激光技术的发展使得存储介质的容量成倍提高。另一方面，为了在海量数据中迅速找到需要的数据，元数据(metadata)库的建设是非常必要的,它是关于数据的数据,通过它可以了解有关数据的名称、位置、属性等信息，从而大大减少用户寻找所需数据的时间。

(4) 虚拟现实(Virtual Reality)技术

虚拟现实技术是实现数字地球的一个重要技术手段。它是采用计算机技术生成一个逼真的视觉、听觉、触觉和味觉的等感观世界，用户可以直接用人的技能和智慧对这个生成的虚拟实体进行观察和操作。同时它也是一种用户界面工具，用户不仅可以观察数据，而且可以与数据交互，并且这种观察具有从外到内或从内到外的空间特征，这与可视化计算中只允许用户从外向内观察数据空间有很大不同。

虚拟现实造型语言(VRML)是一种面向 Web、面向对象的三维造型语言,而且它是一种解释性语言。它不仅支持数据和过程的三维表示，而且能使用户走进视听效果逼真的虚拟世界，从而实现数字地球的表示以及通过数字地球实现对各种地球现象的研究和人们的日常应用。

2 数字地球的应用

在人类所接触到的信息中有 80%与地理位置和空间分布有关，地球空间信息是信息高速公路上的货和车。数字地球不仅包括高分辨率的地球卫星图像，还包括数字地图，以及经济、社会和人口等方面的信息，它的应用正如戈尔副总统在报告中提到的有时会因为我们的想象力而受到限制，换句话说，数字地球的应用在很大程度上超出我们的想象。这里只能就我们的理解提出一些现实的应用。

(1) 全球变化与社会可持续发展

全球变化与社会可持续发展已成为当今世界人们关注的重要问题，数字化表示的地球为我们研究这一问题提供了非常有利的条件。在计算机中利用数字地球可以对全球变化的过程、规律、影响以及对策进行各种模拟和仿真，从而提高人类应付全球变化的能力。数字地球可以广泛地应用于对全球气候变化,海平面变化,荒漠化,生态与环境变化,土地利用变化的监测。与此同时，利用数字地球，还可以对社会可持续发展的许多问题进行综合分析与预测，如：自然资源与经济发展，人口增长与社会发展，灾害预测与防御等。

我国是一个人口多，土地资源有限，自然灾害频繁的发展中国家，十几亿人口的吃饭问题一直是致关重要的。经过 20 年的高速发展，资源与环境的矛盾越来越突出。1998 年的洪灾，黄河断流,耕地减少,荒漠化加剧,已经引起了社会各界的广泛关注。我们必须采取有效措施，从宏观的角度加强土地资源和水资源的监测和保护，加强自然灾害特别是洪涝灾害的预测、监测和防御，避免第三世界国家和一些发达国家发展过程中走过的弯路。数字地球在这方面可以发挥更大的作用。

(2) 政治、经济与军事应用

数字地球在当前世界政治、经济和军事中的应用是非常广泛的。例如，数字地球可以用于解决国家之间的争端,如边界划分 数字地球可以用于维护社会安定,打击犯罪,如 利用 GIS 对犯罪模式、频率、和分布进行分析,合理部署警力。利用 GPS 和 GIS 实现警车调度和指挥，以及重要车辆的跟踪与保卫；数字地球可用于自然灾害的预测和灾后应急指挥与重建，如洪水和地震灾害预测与救灾；数字地球可用于城市和农村的规划，如城市规模与功能的设计，土地利用监测 数字地球可用于提高工农业生产力,如利用卫星影像和 GPS 进行病虫害防治、田间作业指挥和精准农业。特别重要的是数字地球对于发展全球信息产业具有非常重要的作用，数字地球作为 Internet 上一个最基本的信息载体，社会经济生活中的各个部门和行业都可以将自己的信息加载到上面，最终将会形成全世界每年数百亿美元的新的经济增长点，并将对未来全球的政治、经济和军事产生无法估量的影响。

在经济全球化的今天,劳动力、资金、生产、市场的空间分布、动态变化和合理布局具有重要的意义。通过数字地球这样的政府行为来促进经济信息化的进程，将有利于我国社会主义市场经济的形成和发展。

美国提出的数字地球是后冷战时期“星球大战”计划的继续和发展，是其全球战略的继续

和发展。作为新一代的电子地图和地理信息系统，数字地球在军事上具有明显的应用价值，这一点从美伊战争和最近的对南战争中可以很容易的看出。而且它是一个典型的平战结合、军民结合的系统工程，因而，建设中国的数字地球工程符合我国国防建设的发展方向。

1.2.3 地球空间信息学与数字地球的关系

虽然数字地球既是一个新概念又是一个综合系统工程，但它涉及到的大部分理论、技术和应用却与现有的实际科技工作直接相连。它是从更高的层次、从系统论和一体化的角度来集成和应用已有和正在发展的理论、技术、数据和能力，从而更广泛、更深入、更有效、更经济地为社会提供服务。明确数字地球与当前地学理论、技术和应用发展的关系有助于深入认识数字地球，把握当前地学发展的方向和目标。

1) 地球空间信息学是数字地球的数学基础

在数字地球中，需要对整个地球进行数字化描述，地球空间信息是其中最重要的组成部分。地球空间信息学所研究的空间信息基准、标准、时空变化和不确定性等问题是关于地球空间信息最基本的理论，同时也是数字地球的基本理论。数字地球的建立依赖于若干理论问题的突破和完善。例如：在数字地球中如何对地球形状进行定义和描述；如何定义数字地球的几何基准以及几何变换方法和投影方法；如何定义和描述各种空间和非空间数据的标准和规范；如何定义与表达数字地球在时间与空间的连续性和完整性以及变化规律；如何定义和描述空间数据和非空间数据的不确定性及其传播规律；等等。

2 地球空间信息学是数字地球的空间信息框架

在数字地球中，各种社会、经济、文化等复杂信息是以地球空间信息进行定位和组织，地球空间信息是作为其他信息的载体。地球空间信息学所研究的空间信息的组织和管理方法为数字地球的建立提供了可靠的空间信息框架。“数字地球空间数据框架”("Digital Geo－Spatial Data Framework")是“空间数据基础设施”(Spatial Data Infrastructure，简称 SDI)的核心，它包含了最基本的空间数据集。框架的内容一般包括数字正射影像、数字地面模型、道路、水系、行政境界、公共地籍和地名注记等内容。这一空间数据框架一方面为研究和观察地球以及地理分析提供了最基本和公用的数据集；另一方面为用户添加各种与空间位置有关的信息提供了地理坐标参考。从而实现以不同时间、空间尺度对数字地球的各种数据进行有效的定位、组织、集成和应用。

3) 地球空间信息学为数字地球提供技术支撑

构成地球空间信息学技术体系的“3 S”技术和通讯技术是实现对地球表层及其附近的空间和非空间数据的获取、处理、分析、表示和传输的重要技术手段，这些技术的不断发展为数字地球的建立提供了可靠的技术保证。高分辨率遥感卫星的研制与发射，机星地一体化空间数据的采集、处理与分析技术的进一步完善，为数字地球空间数据的及时更新与信息提取提供了保证；分布式空间数据库技术的发展可以将海量的视频和图像数据与空间数据一起进行有效

的管理，特别是面向对象技术的发展使得空间数据库具有构造和表示复杂对象的能力，使得真实世界几乎所有的实体都可以表示为对象，从而实现减少 I/O 访问提高运行效率；空间数据仓库与知识挖掘技术将根据一定的主题内容集成来自不同数据库的具有不同时间和空间尺度的数据，从中挖掘出用户所需要的知识，实现面向数据和面向模型分析的统一 网络 GIS 技术从单机结构到 Client/Server结构，再到 Browser/Server结构的发展，标志着网络 GIS技术进入一个全新时代，它为在 Internet 上进行地球空间信息的查询和应用提供了方便；虚拟现实技术的发展和在地球空间信息表示中的应用为数字地球进入平常百姓的日常生活创造了条件，它把抽象的数据变得更加直观、可操作，从而满足不同层次的需要。

1.3 RS、GIS 与 GPS 集成的定义、理论与关键技术[6]

1.3.1 RS、GIS 与 GPS的集成

空间定位系统（目前主要指 GPS全球定位系统）、遥感（RS）和地理信息系统（GIS）是目前对地观测系统中空间信息获取、存贮管理、更新、分析和应用的 3 大支撑技术（以下简称“3S”），是现代社会持续发展、资源合理规划利用、城乡规划与管理、自然灾害动态监测与防治等的重要技术手段，也是地学研究走向定量化的科学方法之一。

这 3 大技术有着各自独立、平行的发展成就：

GPS是以卫星为基础的无线电测时定位、导航系统，可为航空、航天、陆地、海洋等方面的用户提供不同精度的在线或离线的空间定位数据；RS 在过去的 20 年中已在大面积资源调查、环境监测等方面发挥了重要的作用。在未来数年之中还将会在空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率 3 个方面，全面出现新的突破；GIS 技术则被各行各业用于建立各种不同尺度的空间数据库和决策支持系统，向用户提供着多种形式的空间查询、空间分析和辅助规划决策的功能。

随着“3S”研究和应用的不断深入，科学家们和应用部门逐渐地认识到单独地运用其中的一种技术往往不能满足一些应用工程的需要。事实上，许多应用工程或应用项目需要综合地利用这 3 大技术的特长，方可形成和提供所需的对地观测、信息处理、分析模拟的能力。例如海湾战争中“3S”技术的集成代表了现代战争的高技术特点，而且“3S”技术的集成应用于工业、农业、交通运输、导航、捕鱼、公安、消防、保险、旅游等不同行业，将产生愈来愈大的市场价值。

近几年来，国际上“3S”的研究和应用开始向集成化（或综合化）方向发展。在这种集成应用中，GPS 主要被用于实时、快速地提供目标，包括各类传感器和运载平台（车、船、飞机、卫星

等）的空间位置；RS用于实时地或准实时地提供目标及其环境的语义或非语义信息，发现地球表面上的各种变化，及时地对 GIS 进行数据更新；GIS则是对多种来源的时空数据进行综合处理、集成管理、动态存取，作为新的集成系统的基础平台，并为智能化数据采集提供地学知识。

集成是英语 Integration 的中译义，它指的是一种有机的结合，在线的连接、实时的处理和系统的整体性。目前，由于对“集成”的含义理解不清，似有“集成”泛滥化之势头。比如说，对于已得到的航空航天遥感影像，到实地用 GPS 接收机测定其空间位置（X, Y, Z），然后通过遥感影像处理，将结果经数字化送入地理信息系统中，这同样使用了“3S”技术，但它不是一种集成。它不符合上述的集成概念。一个较好的“3S”技术集成系统的例子是美国俄亥俄州立大学、加拿大卡尔加里大学分别在政府基金会和工业部门资助下进行的集 CCD 摄像机、GPS、GIS 和惯性导航系统（INS）为一体的移动式测绘系统（Mobile Mapping System）。该系统将 GPS/INS，CCD 实时立体摄像系统和 GIS 在线地装在汽车上。随着汽车的行驶，所有系统均在同一个时间脉冲控制下进行实时工作。由空间定位、导航系统自动测定 CCD 摄像瞬间的像片外方位元素。据此和已摄得的数字影像，可实时/准实时地求出线路上目标（如两旁建筑物、道路标志等）的空间坐标，并随时送入 GIS 中，而 GIS 中已经存贮的道路网及数字地图信息，则可用来修正 GPS 和 CCD 成像中的系统偏差，和作为参照系统，以实时地发现公路上各种设施是否处于正常状态。

显然，这样的集成还应当有现代通讯技术和专家系统技术相配合，只是“3S”的提法已经广为流传开了。从以上讨论不难看出，空间定位技术、遥感技术和地理信息技术的集成是一项技术难度极高的高科技。

1.3.2 “3S”技术集成中需要解决的理论问题和关键技术

为了实现真正的“3S”技术集成，需要研究和解决“3S”集成系统设计、实现和应用过程中出现的一些共性的基本问题，如“3S”集成系统的实时空间定位、一体化数据管理、语义和非语义信息的自动提取、数据自动更新、数据实时通讯、集成化系统设计方法以及图形和影像的空间可视化等，为进一步设计和研制实用的“3S”集成系统提供理论、方法和工具。这里不妨再作一些更具体的分析和说明。

1）“3S”集成系统的实时空间定位

研究“3S”集成系统的传感器实时空间定位、系统行进过程中快速确定相关地面目标的方法和实现技术。包括：

(1)广域和局域差分 GPS 网的构建方法与实时数据处理的理论与算法；

(2)遥感传感器位置和姿态的测定及在航空、航天遥感中的应用；

(3)GPS 辅助的遥感地面目标的自动重建与量测方法。

2）“3S”集成系统的一体化数据管理

研究“3S”数据的集成管理模式、数据模型，设计和发展相应的数据管理系统，以实现图形、图像、属性、GPS 定位数据等的一体化管理，为“3S”的集成处理和综合应用提供基础平台。包括：

(1)非均质、多尺度、多时态空间数据的组织与管理；

(2)面向对象的一体化数据结构与数据模型的研究；

(3)大容量影像数据的压缩、传输、建库和存贮的理论与方法。

3）语义和非语义信息的自动提取理论方法

研究从航空、航天遥感数据和 CCD 立体象对中自动、快速和实时地提取空间目标位置、形状、结构及相互关系和空间目标的语义信息的理论与方法。主要包括：

(1)遥感影像地物结构信息的自动提取和精确图形表达；

(2)多种传感器、多分辨率和多时相遥感图像的融合理论与方法：

(3)基于知识工程的遥感影像解译与分类系统的研究。

4）基于 GIS 的航空、航天遥感影像的全数字化智能系统及对 GIS 数据库快速更新的方法

研究如何依托已建立的 GIS 系统来实现航空、航天遥感影像的智能化全数字过程，并从中快速发现在哪些地区空间信息发生了变化，进而实现 GIS 数据库的自动／半自动快速更新。主要内容为：

(1)GIS 信息与现势的航空、航天影像复合；

(2)从 GIS 信息与航空、航天影像之配准中，自动（或半自动）检测空间信息的变化和增加；

(3)由 GIS 的属件数据以及它与现势影像配准之结果，自动（或半自动）提取语义信息与获取知识；

(4)GIS 信息的自动更新。

5）“3S”集成系统中的数据通讯与交换

数据通讯是“3S”技术集成中的一个关键问题。例如在环境监测、灾害应急、自动导航和自动加强系统中，需要将 GPS 记录数据和遥感成像数据(CCD 记录和雷达记录等)实时传送到信息处理中心或反之将所有数据传送到量测平台上去，为此，需要研究：

(1)数据单向实时传送的理论和方法；

(2)数据双向实时传送的理论和方法；

(3)数据交换的理论和方法。

6）“3S”集成系统中的可视化技术理论与方法

“3S”集成系统中将有不同分辨率、不同时相的大量图形和影像数据，需要研究它们的多级分辨率和多尺度表示在各种介质和终端上的可视化问题。包括：

(1)空间图形图像数据库的多级分辨率的存贮、显示和表达；

(2)可视化空间数据库的构建与应用；

(3)从空间数据库至地图数据库的自动综合和符号化理论与方法；

(4)图形和影像的可视化技术与虚拟现实。

7) "3S"集成系统的设计方法及 CASE 工具研究

主要研究基于计算机辅助软件工程（CASE）技术的"3S"集成系统的设计方法和软件开发、维护的自动化技术，设计和发展专用于"3S"集成系统设计的 CASE 工具，例如：

(1)可视化编程技术的研究和工具开发；

(2)"3S"集成系统的结构化分析和设计规格的自动生成；

(3)综合考虑时空关系及语义信息的数据实体关系表达与数据字典生成；

(4)"3S"集成中的分量方法(Component approach)及关键技术。

8) "3S"集成系统中基于客户机/服务器的分布式网络集成环境

"3S"集成系统研究是一项涉及到多专业、多用户、多数据的综合研究课题，它需要一个强大而又有效的硬环境支持。这其中包括：多种软件系统（GIS 软件 ARC/INFO、MGE、GeoStar 等，全数字化摄影测量系统 VirtuZuo，遥感图像处理系统 ERDAS, GPS 数据处理软件 Wu-CAPS 等）的综合使用；多类型数据的快速传输；多用户的工作方式。该项研究应根据"3S"集成系统研究的特点与特殊要求，为"3S"集成研究设计提供一个多种空间信息数据获取方式与地理信息管理系统融为一体的基础研究环境。这种集成化环境的研究完成，可以将多种数据集中在一起实现共享，特别是网络化的数据传送方式可以快速有效地将数据传送到各用户，为"3S"集成的深入研究提供条件。此项研究包括：

(1)"3S"集成系统网络集成环境的硬、软件组织；

(2)分布式多用户间的数据快速传送；

(3)多类型数据的数据通讯与格式转换。

以上是就"3S"整体集成系统来讨论的，具体应用时可视应用目的和集成方式不同而有可能加以简化。

1.3.3 "3S"技术中实用的集成模式

这里，简要地对实际应用中可能用到的"3S"技术集成模式加以讨论。

1) GIS 与 GPS 的集成

利用 GIS 中的电子地图和 GPS接收机的实时差分定位技术，可以组成 GPS+GIS的各种电子导航系统，用于交通、公安侦破、车船自动驾驶，也可以直接用 GPS方法来对 GIS 作实时更新。这是最为实用、简便、低廉的集成方法。

这时存在几种复杂程度不同、价格也不同的集成模式：

(1)GPS 单机定位+栅格式电子地图。该集成系统可以实时地显示移动物体（如车、船、飞机)所在位置，从而进行辅助导航，优点是价格便宜，不需要实时通讯。缺点是精度不高，自

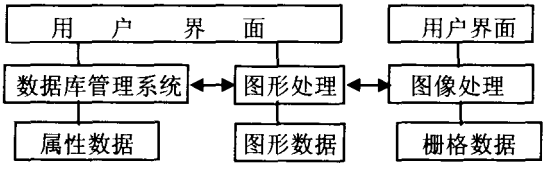
动化程度也不高。

(2)GPS 单机定位＋矢量电子地图。该系统可根据目标位置（工作时输入）和车船现在位置(由 GPS 测定）自动计算和显示最佳路径，引导驾驶员最快地到达目的地。并可用多媒体方式向驾驶员提示。但矢量地图(交通图)数据库需要化较大成本。GPS 测定误差可设法加以补偿和改正。

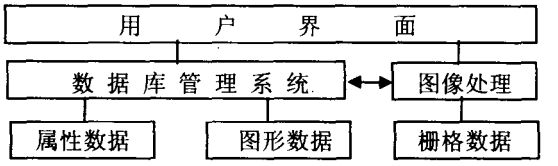
(3)GPS 差分定位＋矢量/栅格电子地图。该系统通过固定站与移动车船之间两台 GPS 伪距差分技术,可使定位精度达到 1～3m ,此时需要通讯联系,可以是单向的,也可以是双向的,即 GIS系统可以放在固定站上,构成车、船现状监视系统,可以放在车、船上构成自动导航系统,双方均有 GIS加通讯,则可构成交通指挥、导航、监测网络,上述 GPS＋GIS 集成系统可用于农作物耕作运营中。

2) GIS 和 RS 的集成

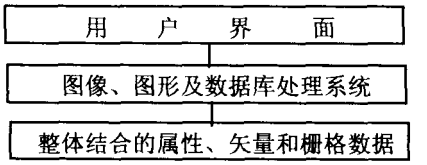
遥感是 GIS重要的数据源和数据更新的手段，而反过来,GIS则是遥感中数据处理的辅助信息,用于语义和非语义信息的自动提取,图 1.3.1 表示了 GIS与 RS各种可能的结合方



(a) 分开但是平行的结合



(b) 无缝的结合



(c) 整体集成

图 1.3.1 GIS与 RS结合的 3 种方式

式,包括'分开但是平行的结合(不同的用户界面,不同的工具库和不同的数据库),表面无缝的结合(同一用户界面,不同的工具库和不同的数据库)和整体的集成(同一个用户界面,工具库和数据库）。未来要求的是整体的集成。

GIS 与 RS的集成主要用于变化监测和实时更新，它涉及到计算机模式识别和图像理解，在海湾战争中，这种集成方式用来作战场实况的快速勘查，为战场指挥服务，也用于全球变化和环境监测。

3) GPS/INS与 RS 的集成

遥感中的目标定位一直依赖于地面控制点，如果要实时地实现无地面控制的遥感目标定位，则需要将遥感影像获取瞬间的空间位置(X_S, Y_S, Z_S)和传感器姿态(φ, ω, κ)用 GPS/INS 方法同步记录下来。对于中低精度可用伪距法，对于高精度定位，则要用相位差分法。

目前 GPS 动态相位差分已用于航空/航天摄影测量进行无地面空中三角测量，并称为 GPS 摄影测量，它虽不是实时的，但经事后处理可达到米至厘米级精度，已用于生产。可提高作业效率,缩短周期一年以上,节省外业工作量 90%,成本 70%左右。实时相位差分需解决 OTF (On the flying)技术。

1.3.4 "3S"的整体集成

空间定位技术、遥感技术和地理信息技术的整体集成无疑是人们所追求的目标。这种系统,不仅具有自动、实时地采集、处理和更新数据的功能,而且能够智能式地分析和运用数据,为各种应用提供科学的决策咨询，并回答用户可能提出的各种复杂问题。

例如，加拿大卡尔加里大学 Schwarz 教授为首研制的车载'3S"集成系统(VISAT),车上前置的一对 CCD 相机代表遥感摄像系统,GPS 与 INS 联合使用，可互为补偿运动中可能的失锁和其它系统误差。GIS 系统安装在车内。GPS/INS 为两个 CCD 相机提供外方位元素,影像处理可求出点、线、面地面目标的实时参数,通过与 GIS 中数据比较,可实时地监测变化、数据更新和自动导航。

机载/星载3S"集成系统在美国已研制成功。通过装在飞机上的 GPS/INS 系统和 OTF 技术实时地求出遥感传感器的全部外方位元素，然后利用 CCD 扫描成像和激光断面扫描仪可同时求出地面目标(物元)的空间位置和灰度(光谱测量)值(X, Y, Z. G)。该系统飞行高度必须大于 60m 以免激光伤人,但又不能太高,目前主要用于大城市进行 GIS 实时数据采集和更新。但是,这种整体集成系统价格昂贵,整个系统需 300 万～500 万美元以上的成本，目前仍处于研究和试运行之中,我国 863 高技术研究中也有类似项目,攻关成功后,可望推广应用。

"3S',集成具有重大意义,也具有相当难度,集成方式多种多样,宜从简单到复杂,从低成本到高成本，关键在于要找到它的应用市场。应当肯定他说,"3S"技术集成大有作为！

1.4 空间信息系统集成的研究思路

从前面几节可以看出，空间信息系统集成的研究是一项涉及到多专业、多数据的综合性研究课题，我们已经从两个方面系统地开展了这项工作：一方面就 GIS 与 RS、GPS 与 RS、GPS 与 GIS 两两的集成理论与关键技术进行了深入的研究；另一方面从 GPS + RS + GIS、GPS + GIS + CCD（或其它测绘传感器）整体集成的角度开展了理论与实际工作。同时，形成了如图 1.4.1 的研究思路。

图 1.4.1 由以下五个部分构成：

第一部分，涉及将 GPS 动态相位差分技术用于航空/航天摄影测量进行无地面空中三角测量，并称为 GPS 摄影测量。它虽不是实时的，但经后期处理可达到厘米至米级精度，已用于生产。在这样的 GPS 与 RS 集成过程中，最主要的理论与技术问题是 OTF(On the flying)技术。

第二部分，涉及 GIS 与 RS 的集成。包括三个主要的技术过程：(1)多传感器、多分辨率、多时相遥感数据融合；(2)利用 RS 数据和 GIS 数据快速发现空间对象的变化，同时，对 GIS 数据库进行快速更新；(3)从 GIS 数据中发现知识用以辅助遥感数据处理。

第三部分，涉及车辆定位与自动导航。主要是在 GPS 与 GIS 的支持下，为控制人员或当事人提供实时的车辆位置和导航信息，减少路途时间。此外，还包括道路信息和其它环境信息的采集。

第四部分，涉及以空间定位技术、遥感技术和地理信息系统技术为基础的集成数据库技术。主要指 GPS 数据、RS 数据和 GIS 数据的一体化存贮与管理，也包括利用遥感数据制作导航数字影像地图以及基于数据集成的 3D 可视化模型。

第五部分，涉及车载 GPS、GIS 与 CCD （包括其它测绘传感器）集成系统。GIS 系统安装在车内，GPS 为 CCD 摄像机提供外方位元素，影像处理可求出点、线、面地面目标的实时参数。以上几个部分的详细内容将会在本书后续章节逐步展开。

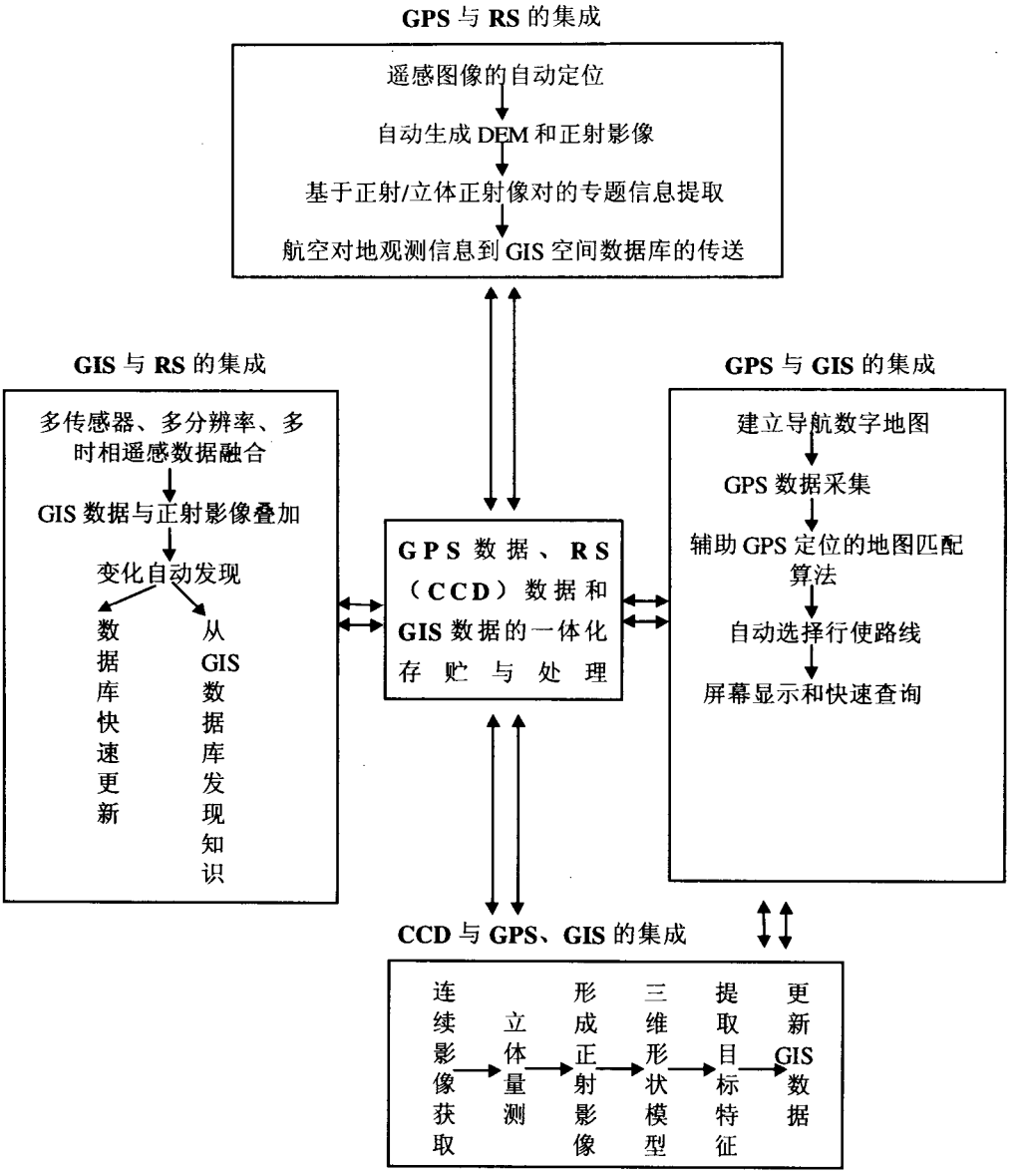


图 1.4.1 空间信息系统集成的研究思路

参考文献

[1] 李德仁．论‘GEOMATICS’的中译名．测绘学报，1998,27(2):95～98
[2] P. Gagnon. Geomatics—An Integrated, Systematic Approach to Meet the Needs for Spatial Information, CISM J. ACSGC, 1990(44)
[3] 李德仁,李清泉．地球空间信息科学的兴起与跨学科发展．见 周光召主编．科技进步与学科发展．北京 中国科学技术出版社,1998:448～452
[4] 李德仁．对地观测新技术与社会可持续发展．见 中科院百名院士报告会文集．北京 科学出版社,1997
[5] 李德仁,李清泉．论地球空间信息科学的形成．地球科学进展,1998,13(4):319～326
[6] 李德仁．论 RS、GIS与 GPS集成的定义、理论与关键技术．遥感学报，1997,1(1):64～68

第 2 章　空间信息的融合

通过不同传感器或不同方法采集的空间信息由于受多种因素影响，其不确定性是普遍存在的。如果在对空间信息进行分析和识别时，仅对每一种信息作出独立的处理或决策，其效果常常不够理想。鉴于这种情况，有必要将来自不同传感器或不同方法采集的空间信息融合为对空间对象的一致描述。在这一章里，我们将从互补信息和协同信息的融合、商结构下的融合以及多源遥感数据的融合三个方面说明这个问题。

2.1　互补信息和协同信息的融合

空间信息至少可分成二类：互补信息和协同信息。

互补信息是指来自多个不同信息源的空间信息，它们提供的环境特征是彼此独立的，即反映的是空间对象的各个不同侧面。互补信息的融合可以减少由于缺少某些对象特征而产生的对地物理解的歧义，因而可提高系统描述空间对象的完整性和正确性。由于互补信息一般来自于异质传感器，它们在测量精度、范围、输出形式等方面有较大的差异，因此，在多种信息融合前先将不同传感器的信息抽象为同一种表达形式就显得尤为重要。

在空间信息处理中，如果一种信息的处理必须依赖于另一种信息的处理时，这两种空间信息被称为协同信息。协同信息的融合，很大程度上与不同信息处理所经历的时间或顺序有关。

2.1.1　互补信息的融合

互补信息融合的途径之一是利用 Dempster－shafer(简称 D－S)证据理论将多个数据源分别提供的有关空间对象的证据综合为一致的结果描述[1]。

如果将命题看作识别框架 Θ 上的元素，对于 $\forall m(A)>0$，称 A 为信度函数 Bel 的焦元。在此，集函数 $m:2^{\Theta}\to[0,1]$，满足：①$m(\varnothing)=0$，②$\sum_{A\subset\Theta}m(A)=1$；信度函数 Bel 定义为

$$\mathrm{Bel}(A)=\sum_{B\subset A}m(B)\qquad(\forall A\subset\Theta)\tag{2.1.1}$$

即 A 的信度函数为 A 中每个子集的信度值之和。

设 $\mathrm{Bel}_1,\mathrm{Bel}_2$ 是同一识别框架 Θ 上的两个信度函数，m_1,m_2 分别是其对应的基本可信度

分配，焦元为 $B_1,\cdots,B_l$ 和 $C_1,\cdots,C_k$。给定 $A\subset\Theta$，若有 $B_i\cap C_j=A$，那么 $m_1(B_i)m_2(C_j)$ 就是确切地分到 A 上的部分信度，而分到 A 上的总信度为：$\sum_{B_i\cap C_j=A} m_1(B_i)m_2(C_j)$，但是当 $A=\emptyset$ 时，按这种理解，将有部分信度 $\sum_{B_i\cap C_j=\emptyset} m_1(B_i)m_2(C_j)$ 分到空集上，这显然不合理，为此可在每一信度上乘一系数：$(1-\sum_{B_i\cap C_j=\emptyset} m_1(B_i)m_2(C_j))^{-1}$，使总信度满足 1 的要求。至此，实际上已给出了两个信度的合成法则：

$$m(A)=m_1(B)\oplus m_2(C)=\frac{\sum_{B_i\cap C_j=A} m_1(B_i)m_2(C_j)}{1-\sum_{B_i\cap C_j=\emptyset} m_1(B_i)m_2(C_j)} \tag{2.1.2}$$

对于多个信度的合成(融合)，令 $m_1,\cdots,m_n$ 分别表示 n 个信息的信度分配，如果它们是由独立的信息推得的，则融合后的信度函数 $m=m_1\oplus m_2\oplus\cdots\oplus m_n$ 可表示为：

$$m(A)=\frac{\sum_{B_i\cap C_j=A}\prod_{i=1}^{n} m_i(A_i)}{1-\sum_{B_i\cap C_j=\emptyset}\prod_{i=1}^{n} m_i(A_i)} \tag{2.1.3}$$

如果将各遥感传感器采集的信息作为证据，则每个传感器可提供一组命题(分类)，对应决策为：$x_1,\cdots,x_m$，并可建立一个相应的信度函数。这样，多传感器信息融合实质上就成为在同一识别框架下，将不同的证据体合并成一个新的证据体的过程。

在图像识别中，更直接的互补信息融合方法是建立在乘积规则基础上的融合方法。设第 i 个样本 e_i 来自第 j 个模式类的条件概率密度为 $P(e_i|\Omega_j)$，$P(\Omega_j)$是第 j 类模式出现的先验概率，那么样本 e_j 在整个模式类中出现的概率密度为

$$P(e_i)=\sum_{j=1}^{N} P(\Omega_j)P(e_i\mid\Omega_j) \tag{2.1.4}$$

由概率论可知，在假定样本是相互独立的条件下，样本 $e_i,e_2,\cdots,e_m$ 来自第 j 个模式类的后验概率为

$$P(\Omega_j\mid e_1,e_2,\cdots e_m)=\prod_{i=1}^{m} P(\Omega_j\mid e_i)[P(\Omega_j)]^{-(m-1)} \tag{2.1.5}$$

$$P(\Omega_j\mid e_i)=P(e_i\mid\Omega_j)P(\Omega_j)/P(e_i) \tag{2.1.6}$$

式(2.1.5)是基于最大似然概率的多遥感传感器信息融合乘积规则。识别结果是上式左端似然概率最大的模式类。

实验表明基于上述后验概率的乘积规则的融合效果并不理想，因为乘积规则是利用所有通道的信息同时支持假设得到的，如果有一个通道的信息不支持这个假设，这时该通道的后验概率几乎为零，使得融合效果降低，另外乘积规则对模型参数的误差比较敏感。为此，英国学者 Killer[2]提出一种基于后验概率的加性规则的信息融合方式，对式(2.1.5)修正得

$$J = \arg\max_{j} \sum_{i=1}^{m} P(\Omega_j \mid e_i) \tag{2.1.7}$$

设每个通道的样本向量 e_i 的维数为 Dim，由于不同通道样本向量的维数往往不一样，概率密度 $P(e_i \mid \Omega_j)$ 的数值在不同通道上具有不同的数量级，利用它们计算的后验概率密度 $P(\Omega_j \mid e_i)$ 对维数的依赖很大，为此有必要对维数的影响归一化，文献[3]提出下述归一化方法：

$$\widetilde{P}(e_i \mid \Omega_j) = (P(e_i \mid \Omega_j))^{\alpha/\mathrm{Dim}_i} \tag{2.1.8}$$

式中，α 为介于 0～1 之间的光滑因子，由实验确定，它是对归一化后的概率密度进行平滑，使得概率密度在不同的样本点上的取值在数量级上相接近。式（2.1.4）～式（2.1.6）中的 $P(e_i \mid \Omega_j)$ 以 $\widetilde{P}(e_i) \mid \Omega_j)$ 取代，利用式(2.1.7)及式(2.1.5)进行融合的加性规则、乘积规则分别称为修正的加性规则、乘积规则。

2.1.2 协同信息的融合

隐含在影像中的空间信息可以被提取出来辅助光谱分类，各种各样的空间信息已被用于分类前分层，分类后标注或作为附加层来输入分类器。如用云和阴影的相关位置成功地把云影从水表面分离出来；通过图斑的大小和邻元的判决规则来分类，提高了分类精度。

这里要介绍的研究主要利用地物的几何属性来修正分类，以避免光谱分类中的光谱混淆，是一种将空间信息和光谱信息相结合来区分地面物体的方法。该几何属性是通过方向对称变换从航空图像上得到的，但尺度因子的估计首先利用了监督分类的结果。

围绕着利用地物的几何属性来修正分类问题，我们在研究中对影像融合技术有新的拓展。首先表现在分别利用 TM 图像和雷达(SAR）图像估计尺度因子；其次在方向对称变换中把来自航空图像的梯度与来自 TM 图像和 SAR 图像尺度因子结合在一起。这实际上就是基于协同信息的融合。

在具体获取尺度因子的过程中，我们使用了矩形几何方法和简化格点方法，这些方法简化了尺度因子的获取过程。

1) 方向对称变换与分类

形状是指各种地物的外形、轮廓。通常情况下，不同的地物形状会有所差异。由于形状的差异与地物本身的性质和形成过程有关，因而形状也就成了地物分类或识别的重要依据。这里介绍的方向对称变换[4]，不仅能描述各点的点对称性，而且能够通过对称性在不同方向上的分布来描述物体的基本形状，这无疑会在识别、分类上带来更大的方便。

方向对称变换可以被看做针对图像边缘的一种局部算子，用来描述各点上的点对称性。为了说明这个问题，先介绍几个概念。

设 $p_k=(x_k,y_k)$ 是任意一个点，其中 $k=1,2,\cdots,K$。给定一个函数 $f(x,y)$，在点 p_k 上的梯度定义为一个矢量

$$\nabla f_k = (\frac{\partial f_k}{\partial x}, \frac{\partial f_k}{\partial y}) \tag{2.1.9}$$

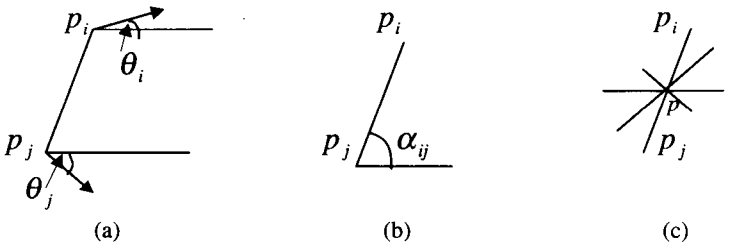


图 2.1.1 描述点对称性的几个参数

这一矢量写成极坐标形式就是

$$v_k = (r_k, \theta_k) \tag{2.1.10}$$

其中

$$r_k = \| \nabla f_k \|, \theta_k = \arctan(\frac{\partial f_k}{\partial y} / \frac{\partial f_k}{\partial x}) \tag{2.1.11}$$

式中 r_k 为点 p_k 处的边缘强度，θ_k 为边缘方向(见图 2.1.1(a))。

记 α_{ij} 为两个点 p_i 和 p_j 连线与水平线的逆时针角度(见图 2.1.1(b))，考虑到两点的无序性，α_{ij} 的值域记为 $[0, \pi)$，记所有以 p 为中心点的点对集合为

$$\Gamma(p) \left\{ (i,j) \left| \frac{p_i + p_j}{2} = p \right. \right\} \tag{2.1.12}$$

式中 p 点的位置参见图 2.1.1(c)。

利用以上几个概念，可进一步定义方向对称变换，记

$$D_\sigma(A,B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-\frac{\| A - B \|}{2\sigma}) \tag{2.1.13}$$

其中，A, B 可以是矢量(p_i 或 p_j 的坐标)，也可以是标量(如角度)，而 $D_\sigma(A,B)$ 是 A、B 间距离的加权函数，σ 是尺度因子。则对于任意方向 φ，点 p 处的方向对称变换为

$$M(p,\varphi) = \sum_{(i,j)\in\Gamma(p)} C(i,j) D_a(\alpha_{ij}, \varphi) \tag{2.1.14}$$

其中

$$C(i,j) = D_\sigma(p_i, p_j) D_b(\theta_i, \alpha_{ij}) D_b(\theta_j - \pi, \alpha_{ij}) r_i r_j \tag{2.1.15}$$

而方向对称变换的方向定义为

$$\Phi(p) = \{ \varphi \mid M(p,\varphi) = \max(M(p,\varphi)_{\varphi\in[0,\pi)}) \} \tag{2.1.16}$$

由计算可以得出,当 p_i 和 p_j 两点的边缘方向是相对的，而它们的方向又与它们连线的方向一致(相同或相反的方向)时,式(2.1.15)的值最大。一般来说尺度因子 a 和 b 可以取为定值。式(2.1.15)中第一项是 p_i 和 p_j 两点的距离加权函数，其中尺度因子 σ 与对称物体的大小有关。对于对称物体的中心点，在合适的尺度下它们的方向对称变换值表现得很大。

对于不同形状的物体，其中心点的对称性分布表现不同。如果从 $0,\pi/4,\pi/2,3\pi/4$ 四个方向考察物体中心点的对称性分布，会发现圆形物体在 4 个方向上对称性大致相等；正方形物体在水平和垂直方向上对称性相等且比较强，在另两个方向上对称性较弱；扁椭圆物体在垂直方向上的对称性很强，在水平方向上对称性很弱。这样，利用方向对称变换不仅能够找到物体的中心点，而且可以很方便地对地物进行大致分类。

2 利用影像融合估计尺度因子

许多空间对象都具有某种对称性。在这些对称性中，有的对称性在很大范围内才能观察到，有的在较小的范围内就可以观察到，也就是说空间对象的对称性存在一个尺度的问题。由此可以看出,若要利用式(2.1.15)获得方向对称变换系数，需要在多个尺度上进行计算，这是一项繁杂的工作。为了简化这个过程，我们将尺度因子的估算分成如下几个步骤：

(1)利用传统的监督分类划分尺度因子

监督分类中最重要的一点是根据需要从影像中选取代表各类别的训练样区。为了尽可能地使不同训练样区能代表不同地物，应从影像上各类地物的不同分布区中选择训练样区。然后，分别将代表同类地物的小训练样区合并，并且尽可能使训练样区中的像元数多些。训练样区选好后，用最大似然法从众多样区中导出一个用监督分类法生成的土地利用图。

在利用 TM影像得到的分类图上，有些地物面积大，这些区域包括植被农田和裸露水泥地 另一些地物面积小,如小的河流、道路、山坡等,图斑边缘不规则,主要由破碎块和复杂形状区组成。对于这两类不同的区域，一般应选择不同的尺度因子。

(2)利用 SAR影像改进尺度因子选择

在 TM 影像上,有些地物的类别单凭光谱特征很难区分,如种有农作物的农田与林地,大片水泥地与裸露地等。针对这些情况，本文对 TM影像与 SAR影像进行了融合处理[5]。由于所选取的 SAR影像的空间分辨率和清晰度都比 TM影像好,所以在融合后的影像上,既具有多光谱特征又具有良好的清晰度，可以用来改进分类。利用融合后的影像所得到的分类可以重新调整图斑的大小，在必要的情况下，还可以增加一个中间层，也就是说对于简单的区域可以选择 1～2 个尺度因子,对于复杂的区域可以选取 2～3个尺度因子。

(3)应用矩形几何快速确定尺度因子

从融合后的影像所得到的分类图上，我们可以清晰地看到不同的区域分布有不同大小的图斑。一般来说大的图斑对应大的尺度，小的图斑对应小的尺度。为了具体知道一个图斑究竟是属于大尺度，还是属于小尺度，需要对图斑进行大小的测定。在此，我们利用矩形几何对图斑的大小做快速测定[6]。具体做法如下：

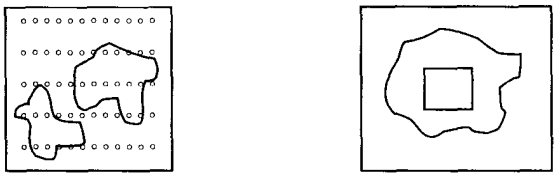
①用平行于两个正交方向的矩形掩膜分类图上的某个图斑。

②依次移动矩形的每条边，使其与图斑的边缘相切。

③分别记录矩形的宽度与高度。

④根据矩形的宽度与高度确定尺度因子。

在实际应用中，可参照文献[4]将对称变换进行简化，边缘方向量化为 8 个角度，与此对应，直线的方向量化为 4 个角度，角度 φ 的值按照直线方向量化为 4 个角度。为了减少计算量，可在图斑上附上格点(见图 2.1.2(a))，只对这些格点进行对称计算。在很多情况下，不需要对上面提到的矩形的整个范围计算对称点，只需要在图斑内一个小的范围内进行计算（见图 2.1.2(b))。如何确定此范围，需要利用相关区域的知识。



(a)　　(b)

图 2.1.2　对称点的计算与范围

在对称点的确定中，可多选择几个点作为待选点，以后再根据其它的信息最后筛选出对称点。

3)实验结果及分析

我们以 1993 年 12 月获取的三水地区 TM5、TM4、TM3 影像以及同一地区的航空影像和雷达影像为研究对象。这些影像包含了河流、鱼塘、湖水、农田、森林、裸露地、水泥地、道路等地物。考虑到 TM5、TM4、TM3 波段假彩色合成与真实地物色彩比较接近，同时波段 4 允许生物量检测和差分，而波段 3 能清晰地显示道路、城区和河流等重要边界特征，另外，TM 影像与雷达影像融合后，提高了地物分辨率和清晰度，因此，这里选用 TM(5,4,3=RGB) 假彩色合成影像与雷达影像融合后的影像来进行分类。 TM 图像与 SAR 影像的融合结果如图 2.1.3 (见插页)所示。

用监督分类法对融合后的影像进行分类，得到的分类图如图 2.1.4(见插页)所示。

在分类图上每隔五个像素取一个点，来计算多边形的对称中心，从而得到如图 2.1.5 所示的候选对称点与最后的对称点(其中小圆点代表候选对称点，小十字丝代表最后的对称中心)。(见插页)

上述过程是利用分类图来估算尺度因子，用航空相片的灰度值来计算 M 的值。。根据 $M(p,\varphi)(\varphi=0,\pi/4,\pi/2,3\pi/4)$的分布情况可估计地物的形状，比如，通过对图 2.1.5 上的某些图块进行计算可得到如表 2.1.1 所示的结果。

表 2.1.1　不同形状地物的 M 值

M / φ / 形状	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$
正方形	0.058	0.046 6	0.048 8	0.036 2
长方形	0.034	0.054	0.077	0.037
椭圆	0.107	0.112	0.062	0.044
圆	0.058 3	0.057	0.051 3	0.05

从上表可以看出,不同形状的 $M(p,\varphi)$ 在各方向所得值不同,而且每种形状 M 值的分布又具有一定的规律。如对于图 2.1.5上所示的某近似正方形区域,其 $M(p,\varphi)$ 在 $0,\pi/2$ 方向上大于在 $\pi/4$ 和 $3\pi/4$ 方向的值,同时,0方向的值稍大于 $\pi/2$ 方向的值,说明该正方形稍向右倾斜 某长方形的 $M(p,\varphi)$ 在 $0,3\pi/4$ 方向的值小于 $\pi/4$ 和 $\pi/2$ 方向的值，说明该长方形的水平方向是长边，而且整个长方形稍向右倾斜；对于某椭圆，$M(p,\varphi)$ 的分布情况是 0 和 $\pi/4$方向的值大于 $\pi/2$ 和 $3\pi/4$ 方向的值，从而得出该椭圆长轴方向在垂直方向且稍向左倾斜 对于某圆,其 $M(p,\varphi)$ 的值在四个方向近似相等,0 和 $\pi/4$ 方向的值稍大于 $\pi/2$ 和 $3\pi/4$ 方向的值，说明该圆水平方向稍窄。据此，可区分不同的形状，同时根据这些值还可确定多边形的倾斜方向。由于各类地物具有相应的形状特点，所以，可以依据形状的差别将光谱相似的地物区分开来。如湖水和小河流,裸露地和水泥地,农田和森林都可以区分开来,从而,减少了分类混淆，提高了分类精度。利用图像的对称性改进的分类结果如图 2.1.6(见插页)所示。

2.2　商结构下的融合

在遥感图像解译中常运用下面两个原则：

(1)“先宏观,后微观”。通常直接观察图像细节,不顾它的全貌或大部,则几乎无法辨认出它是什么，所以解译特别困难。如果先考察图像全貌，一步一步地深入它的细节，解译会变得容易得多。这是因为细节容易混淆我们的视线，使我们不易分析图像的本质特征。

(2)多角度地考察。当某些现象不易从图像上辨认时，解决的办法是采用不同季节、不同颜色，不同太阳高度角的图像进行对比，或从不同方向不同角度观察图像。

上述两个原则反映了从抽象到具体,从一般到个别,从侧面、局部到整体的思维过程,它是人类在创造活动中所表现出来的一种普遍现象，均可化为：已知若干商空间，如何合成出其原来空间的问题，也就是商结构下的融合问题。

关于商空间的合成,可以给出如下的原则[7]：

设(X_1,f_1,T_1)和(X_2,f_2,T_2)是对对象 $A=(X,f,T)$ 的两个不同层次的了解，则(X_1,f_1,T_1)与(X_2,f_2,T_2)的合成，定义为(X_3,f_3,T_3)，它是 A 的某一个层次，且满足如下条件：

(1)X_1,X_2 是 X_3 的商空间；

(2)T_1,T_2 是 T_3 对应于 X_1,X_2 上的商结构；

(3)f_1,f_2 是 f_3 在 X_1,X_2 上的投影，且(X_3,f_3,T_3)还满足某些最优准则。

这个原则可以分别用于论域 X、结构 T、属性函数 f。

2.2.1 论域的合成

设 (X_1,f_1,T_1)和(X_2,f_2,T_2)是(X_3,f_3,T_3)的商空间。

设 X_1,X_2 对应的等价关系分别为 R_1,R_2。

定义 X_1 与 X_2 的合成空间 X_3，其对应的等价关系为 R_3，且

$$xR_3y \Leftrightarrow xR_1y \text{ 且 } xR_2y$$

定义 2.2.1 设 R_1,R_2 是 X 上任意两等价关系，令 R_3 是 R_1 与 R_2 的最小上界，则 R_3 是 R_1,R_2 的合成。

用划分来表示合成，可表示为设划分 $X_1=\{a_i\}$，划分 $X_2=\{b_j\}$，则 X_1 与 X_2 的合成可表示成 $X_3=\{a_i\cap b_j \mid a_i\in X_1,b_j\in X_2\}$。

下面证明两者的等价性。

证明 若 $x\sim y(X_3)$则，$\exists a_i,b_j,x,y\in a_i\cap b_j,\Leftrightarrow x,y\in a_i$ 且 $x,y\in b_j\Leftrightarrow xR_1y$且 $xR_2y\Leftrightarrow xR_3y$ 证毕。

例 2.2.1设有三个波段的遥感图像 f_1,f_2和 f_3，现按 f_1上的阈值 a_1,a_2将 f_1 分成三类，按 f_2 上的阈值 b_1,b_2 将 f_2分成三类，按 f_3 上的阈值c_1,c_2 将 f_3 分成三类。它们的合成过程可以用特征空间来表示（见图 2.2.1(b)），其合成结果如图 2.2.1(c)所示。

在图 2.2.1(c)上，若像元 x与 y分成一类$\Leftrightarrow x$ 与 y在 f_1,f_2 和 f_3上同时具有相同的类别，也就是说 f_1,f_2 和 f_3上的分类结果 X_1,X_2,X_3 是 X_4(图 2.2.1(c)上的分类)的商空间，故满足商空间合成原则。

2.2.2 拓扑结构的合成

设(X_1,f_1,T_1)和(X_2,f_2,T_2)是(X,f,T)的两个商空间，定义 T_1 与 T_2 的合成 T_3：

定义 2.2.2 T_1与 T_2 的合成是 X 上所有拓扑构成的半序格中 T_1 与 T_2 的最小上界 T_3。T_3 的具体构成如下，令

$$B=\{w \mid w=u_i\cap v_j,u_i\in T_1,v_j\in T_2\}$$

然后以 B 为拓扑基，构成拓扑就是 T_3。

所谓 B 为拓扑基所构成的拓扑，是指由 B 中的元素经过任意的并得到的所有可能集合

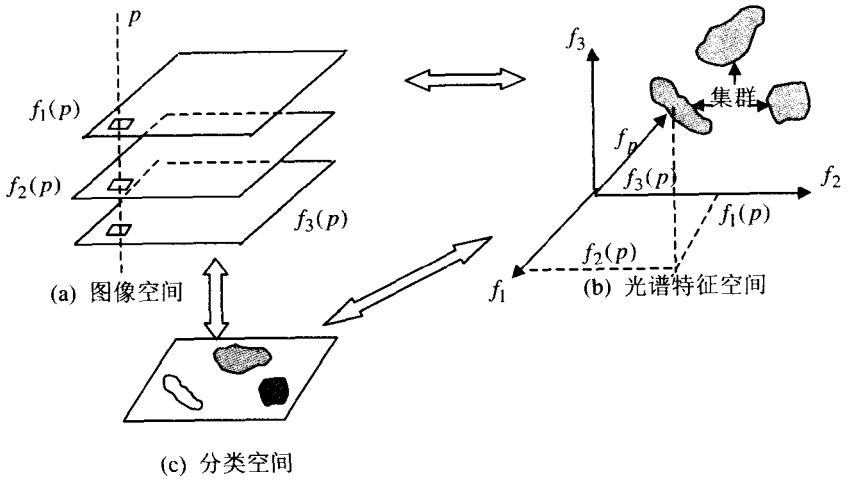


图 2.2.1 图像空间中的论域合成

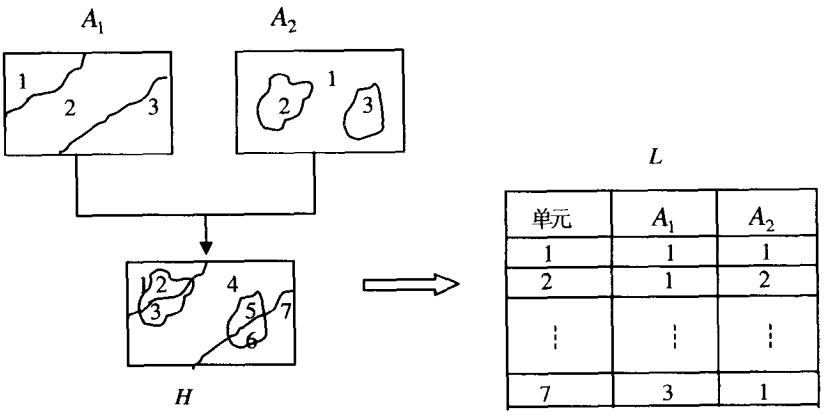


图 2.2.2 按照拓扑结构合成的土地单位元图及其数据格式

的全体就是 T_3。

例 2.2.2 在遥感图像分析中，经常先通过图像解译得到各种单要素分析图，然后将多种同比例尺的单要素图，应用图形叠置法产生一个新的多边形地图。这种多边形地图被称为综合土地单元图，每一个多边形称为一个土地单元（图 2.2.2）[8]。

综合土地单元图与类型图有着本质的不同：(1)综合土地单元图没有类型的概念，而是以

环境要素层次为特色;(2)综合土地单位元图主要是表达多种要素的联系。实际上，这两点正体现了论域的合成与拓扑结构的合成的不同。

设 X 为图像上全体像元的集合，T_1 为图 2.2.2 中 A_1 要素的拓扑，T_2 为图 2.2.2 中 A_2 要素的拓扑 则可令

$$B(\text{拓扑基}) = \{\{1\},\{2\},\{3\},\{4\},\{5\},\{6\},\{7\},\varnothing,X\}$$

在此，$\{1\},\{2\}$等代表图 2.2.2H 中土地单元号 1,2,…,7 所代表的土地单元。故可知 H 的拓扑 T_3 为所有土地单元经过任意的并得到的所有可能集合。显然 T_3 满足合成原则，即 T_1 (T_2)是 T_3 在商空间 X_1(对应 A_1)和 X_2(对应 A_2) 的商拓扑，而且是满足这个条件的最粗拓扑.

由此可见，土地单元可以构成拓扑基，它可以构成不同层次的拓扑，如 T_1,T_2,从而与不同要素层次发生联系 另一方面因 T_3 由 T_1 和 T_2 合成而得到,故可以反映 T_1 和 T_2 之间的关系。但不同标记的土地单元，可能在 A_1 和 A_2 上具有完全相同的类别,如 H 上的 3 和 5,所以土地单元不是关于类的一种划分，故不同于论域的合成。

2.2.3 属性函数的合成

设要研究的对象 A 表示为(X,f,T),及其两个商空间(X_1,f_1,T_1)和(X_2,f_2,T_2)。

若令其合成是 (X_3,f_3,T_3),令 $p_i:(X_3,f_3,T_3)\to(X_i,f_i,T_i),i=1,2$,那么至少有以下条件成立：

$$\begin{aligned} p_iX_3 &= X_i \\ p_iT_3 &= T_i, \quad i=1,2 \\ p_if_3 &= f_i \end{aligned} \tag{2.2.1}$$

一般地,满足(2.2.1)式的解不止一个,则为了要确定一个作为我们的解,通常需要提供一个判别准则，使解在这个判别准则下具有最优性。据此，可以进一步给出属性合成原则。

设已知$(X_1,f_1,T_1),(X_2,f_2,T_2)$,求其合成空间$(X_3,f_3,T_3)$,则要求属性函数满足下面条件：

(1)$p_if_3=f_i,\ i=1,2$ (2.2.2)

$p_i:(X_3,f_3,T_3)\to(X_i,f_i,T_i)$是投影；

(2)设 $D(f,f_1,f_2)$是某一给定的最优判别准则,则有

$$\begin{aligned} D(f_3,f_1,f_2) &= \min_f D(f,f_1,f_2) \\ \text{或} &\max_f D(f,f_1,f_2) \end{aligned} \tag{2.2.3}$$

其中 min(max) 是对一切满足式(2.2.3)的 X 上的一切属性函数 f取的。

例 2.2.3 在遥感多光谱图像中,第 i 个谱段的图像响应值可由下式给出：

$$f_i(x,y) = \int_0^\infty Q(x,y,\lambda)s_i(\lambda)\mathrm{d}\lambda$$

在此，$Q(x,y,\lambda)$为辐射能量，$s_i(\lambda)$是第 i 谱段传感器的光谱响应。若令其中的三个谱段的图像值为红、绿、蓝三基色 R,G,B，则可定义颜色 I 和 R,G,B 之和成正比，即，$I=K(R+G+B)$，当 $K=1/3$ 时，可得变换式：

$$I=\frac{1}{3}(R+G+B)$$

$$H=\frac{G-B}{3(I-B)}$$

$$S=1-\frac{B}{I} \tag{2.2.4}$$

式中 H 为色调，S 为饱和度，一般称式(2.2.4)为 IHS 变换。

由式(2.2.4)可知，饱和度 S 值在 0～1 之间变化，色调 H 在 0～1 之间变化，0 时为红，1 时为绿。故应用 IHS 值可以表示颜色，因而形成一个颜色空间。从这个空间的形成可以看出，三个谱段的图像是其商空间，图像值是其商属性，而 IHS 是由商空间的属性函数通过式(2.2.4)合成得到的。

由于从式(2.2.4)可求出

$$R=I(1+2S-3HS)$$

$$G=I(1-S+3HS)$$

$$B=I(1-S) \tag{2.2.5}$$

故在求谱段图像的合成空间(颜色空间)时，无需再给定最优判别准则。

从本节可以看出，商空间合成具有广泛的实际应用背景，特别值得指出的是，一切约束满足问题，一切推理过程都可以看成是合成的过程。

2.2.3 商空间合成实例

这一部分主要根据结构合成和属性合成原理，自动地寻找综合土地单元与多光谱图像数据之间存在的联系及其规律性。

从例 2.2.2 可以看出，综合土地单元图来自多种信息源，包含有丰富的信息，在计算机及相应软件的支持下，不但可以单独提取原有的单层次信息，而且可在数据分析的基础上，在一定模式的支持下，对不同层次进行多种组合，因而对分析地学规律很有用。而多光谱图像的不同组合，可以突出不同的地物特性，更有利于从图像上分析某些地物。故寻找二者之间的联系不仅便于从‘已知’到‘未知’的解译图像，而且有可能发现新的地学规律。

自动地寻找土地单元与多光谱图像数据之间的对应可按图 2.2.3 所示思路进行：

设 P^* 为多光谱图像按各种规则进行的组合，信息来自于图像 P；S^* 为综合土地单元图，它是单要素图 S 的组合，再根据 S^* 中不同层次的综合土地单元与 P^* 中不同方式的组合进行比较，得出综合土地单元图与多光谱数据之间的联系及其规律性。 P^* 与 S^* 之间可设置一个开关 K，它由教师来控制，表示学习过程中教师的指导(图 2.2.3)。

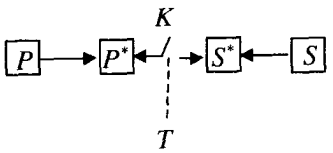


图 2.2.3　自动寻找土地单元与图像数据之间联系示意图

图 2.2.3 包含了两个重要的步骤 其一是从 $P \rightarrow P^*$,及从 $S \rightarrow S^*$ ，它体现了属性合成和结构合成,是用来寻找规律的根据 其二是 $P^* \leftrightarrow S^*$ ，它既表现了寻找综合土地单元与多光谱图像数据之间的对应，也表现了寻找这种对应的规律性。

关于 $P^* \leftrightarrow S^*$ 的对应，可以认为是事先制定一些规则，然后寻找在这些规则下的 P^* 与 S^* 的关系。

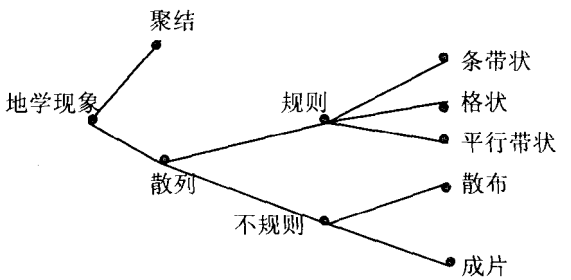


图 2.2.4　地学中常见现象的划分

根据地学中常见的现象,按照图 2.2.4 的划分,可制定区别聚结、条带状、格状、平行条带、散布和成片的规则。为了便于这些规则的实施，我们采用了矩形几何的方法。例如,图 2.2.5中分布有某种地物,若一片一片(或逐点)去调查这些地物,很难知道它们是聚结还是散列,至于是否是成片，还是条带状就更不易确定了。但若采用了矩形几何的技巧，就能很方便地知道图 2.2.5 上地物聚结成 a, b, c 三个子矩形。其中 a 矩形与 b 矩形构成一个条带，a, b, c 三个矩形从整体上表达了图 2.2.5 上的地物是成片分布的。

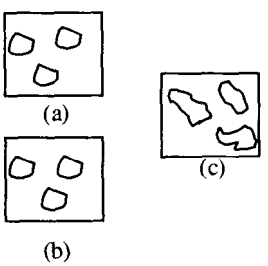


图 2.2.5　矩形几何应用示意

关于 $S \leftrightarrow S^*$,主要应用了图形叠置法,把单要素图叠置为综合土地单元图,本文选择了山体稳定性图、地质图和等高线图作为单要素图,并将其叠置为综合土地单元图,以便与同一区域的图像进行比较分析。这样，在综合土地单元图上就有了三种界限，我们用绿色线划代表等高线，蓝色线划代表地层线,红色线划代表山体稳定性分区界线(见插页 图 2.2.6)。试验区地层主要有 J_{2x}(侏罗系中统)，J_{1-2n}(侏罗系中下统)，J_{1x}(侏罗系下统)，T_{3s}(三迭系上统)，T_{2b}(三迭

系中统)，T_{1j}(三迭系下统)，T_{1d}（三迭系下统）等。它们的排列顺序如下：

$$J_{2x} \rightarrow J_{1-2n} \rightarrow J_{1x} \rightarrow T_{3s} \rightarrow T_{2b} \rightarrow T_{1j} \rightarrow T_{1d} \leftarrow T_{1j} \leftarrow T_{2b}$$

从地层的排列顺序可以看出，这是一个背斜褶皱地区。在山体稳定性图上，试验区内仅有两钟情况，一个是山体稳定性破坏强烈区，另一个是山体稳定性破坏轻微区。

关于 $P \rightarrow P^*$，主要应用了多重数据复合技术，包括四则运算、逻辑运算和彩色合成等。

图 2.2.3 的具体实施按下述步骤进行：

(1)检查图 2.2.2 上的表 L，选择其中的一行(A_{1i}, A_{2i}) 并与图像上相应区域构成对应 $f_i(A_{1i}, A_{2i}, C_i)$。在此，C_i 为图像上相应区域的某种属性。

(2)形成四个恒定的逻辑算子 F_1, F_2, F_3 及 F_4，它可根据对 C_i 的某种决策确定。

$$F_1H=\begin{cases}1,\text{若 } H \text{ 在某个矩形之内}\\0,\text{若 } H \text{ 不在某个矩形之内}\end{cases}$$

$$F_2H=\begin{cases}1,\text{若 } H \text{ 在某个直线上}\\0,\text{若 } H \text{ 不在某个直线上}\end{cases}$$

$$F_3H=\begin{cases}1,\text{若 } H \text{ 与某个直线平行}\\0,\text{若 } H \text{ 不与某个直线平行}\end{cases}$$

$$F_4H=\begin{cases}1,\text{若 } H \text{ 与某个直线垂直}\\0,\text{若 } H \text{ 不与某个直线垂直}\end{cases}$$

(3)组成映射函数 $f_i(A_{1i}, A_{2i}, C_i)$ 后得到的值经逻辑算子 F_1, F_2, F_3 及 F_4，将其转换为逻辑变量($a, b, c, \cdots$)。

(4)从所得逻辑变量的每对组成如 $a \vee b, a \vee b$ 等形式的逻辑函数。

图 2.2.2 上每两个综合土地单元可构成一个逻辑函数，全图的特征是所有由综合土地单元构成的逻辑函数的逻辑积（可分层递阶进行）。例如，判断若干个矩形是否成带状，可表示为：

$$\begin{aligned}x_i = {} & L_v(F_jf_i(A_{11}, A_{21}, C_1), F_jf_i(A_{12}, A_{22}, C_2)) \wedge \\ & L_v(F_jf_i(A_{11}, A_{21}, C_1), F_jf_i(A_{13}, A_{23}, C_3)) \wedge \\ & \cdots \quad \cdots \quad \cdots \\ & L_v(F_jf_i(A_{1n-1}, A_{2n-1}, C_{n-1}), F_jf_i(A_{1n}, A_{2n}, C_n))\end{aligned}$$

其中 v 为逻辑函数序号，n 为矩形个数，L_v 为逻辑函数，x_i 为第 i 个矩形串的逻辑特征。若 x_i 为真，则若干个矩形组成的串成带状。

根据图 2.2.6上的综合土地单元图与多光谱假彩色合成图像的叠合，运用矩形几何技巧及其逻辑特征，可以很容易地知道，图像上的地物(主要是草场)成平行带状分布，这主要是由地质构造控制的。

2.3 多源遥感数据的融合

多平台、多层面、多种传感器、多时相、多光谱、多角度和多种分辨力遥感影像数据随着21世纪的到来，以惊人的数量快速涌来，在同一地区形成多源的影像金字塔。如何将同一地区各种特性影像的有用信息聚合在一起是当前亟待研究的课题之一。遥感影像融合是解决多源海量数据集成表示的有效途径之一，它将有利于增强多重数据分析和环境动态监测能力，改善遥感信息提取的及时性和可靠性，有效地提高数据的使用率，为大规模的遥感应用研究提供一个良好的基础，使花费大量经费获得的遥感数据得到充分利用[5]。

这一节主要论述了多源遥感数据融合中的几种方法：以像元为基础的加权融合、IHS变换融合法、基于小波理论的特征融合、基于贝叶斯法则的分类融合以及以局部直方图匹配滤波技术为基础的影像数据融合。

2.3.1 基于像元的影像加权融合

两个不同特性影像融合时，像元对像元的加权融合可如下式：

$$I'_{ij} = A(P_i I_i + P_j I_j) + B \tag{2.3.1}$$

在此，权 P_i、P_j 可根据经验依据被融合影像 i 和 j 的强调程度确定；为减少冗余度，也可运用相关系数确定融合影像的权重，相关系数计算式为：

$$r_{ij} = \frac{\frac{1}{mn}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{n}(I_{ikl} - \overline{I_i})(I_{jkl} - \overline{I_j})}{\sqrt{\frac{1}{mn}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{n}(I_{ikl} - \overline{I_i})^2 \frac{1}{mn}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{n}(I_{jkl} - \overline{I_j})^2}} \tag{2.3.2}$$

在此情况下，$p_i = |r_{ij}| \times 0.5 + 0.5$，$p_j = 1 - p_i$ 或 p_i 与 p_j 互换，视具体处理方法而定。这种方法也适合多源影像融合，文献[5]列出了广东省某地区TM与侧视雷达和航片之间的相关系数(见表2.3.1)。

表2.3.1 TM与侧视雷达和航片之间的相关系数

影 像	r
TM3——侧视雷达	−0.758793
TM4——侧视雷达	−0.859111
TM5——侧视雷达	−0.823504
TM3——航 片	−0.698014
TM4——航 片	−0.602916
TM5——航 片	−0.637571

进行多时相影像融合时，可采用式(2.3.3)描述的差分法融合，以分析动态变化。

$$I'_{ij} = A(P_iI_i - P_jI_j) + B \tag{2.3.3}$$

2.3.2 IHS变换融合[9]

在色度学中，把彩色影像的红(R)、绿(G)、蓝(B)变换成亮度(I)、色度(H)、饱和度(S)，称为IHS变换，而把 I,H,S 变换成 R,G,B 称为反变换。由于IHS变换是一种图像显示增强和信息综合的方法，具有灵活实用的优点，因此产生了多种IHS变换式[10]。文献[9]采用IHS变换对SAR影像和TM的3个波段TM(3,4,5)影像进行了融合，融合方法如下。

(1)影像几何配准：SAR作为一种主动式遥感系统，具有全天候、全天时、穿透性强和分辨率高等优点。但SAR影像的主要缺点是不仅相干斑噪声大，而且SAR所记录的几何位置是根据斜射程确定的（即方位按雷达飞行中时间顺序，距离按回波的延时确定的），存在透视收缩、阴影、叠掩等多种畸变因素导致的几何失真，为了使航空SAR影像能与3个波段TM影像进行融合，对SAR影像的斑点噪声用 σ 滤波法加以去除或削弱。文献[10]认为这种滤波法效果比中值滤波、均值滤波、低通滤波更优越，尤其是在保留影像细节与分辨率上。对SAR影像几何失真的校正方法很多，归纳起来只有两种：多项式逼近法和几何模型校正法，其中多项式逼近法只适用于平坦地区，对于起伏大的地区则需采用几何模型校正法。

对于Landsat TM 3个波段影像可采用选择控制点的方法进行几何精校正，以便于后期测图。经几何校正后的SAR影像与TM影像通过少量的控制点就可以相互配准。几何配准是后续融合的基础，几何配准精度直接影响融合影像的空间分解力和清晰度。因此配准误差应控制在1个像素范围内。

(2)对3个波段TM影像进行IHS变换，得到代表空间和光谱信息的明度(I)、色别(H)和饱和度(S)影像。SAR影像同明度影像进行直方图匹配，生成具有和明度分量直方图相似的影像。它可用以减少SAR影像与明度影像因获取时太阳高度角和大气条件不同造成的差异。

(3)由于人眼对影像明度的空间分解力比色别、饱和度的空间分解力高，同时为了使融合影像与原TM影像光谱特征的差异尽可能小，以便融合影像更易用于影像判读和分类等后续处理，可用经直方图匹配生成的SAR影像代替明度分量，并同 H,S 进行IHS反变换，即可得到空间信息丰富、保留光谱特征的融合影像。

2.3.3 基于小波理论的影像融合

IHS变换融合法虽然使融合后影像具有原高分辨率SAR影像(或全色影像)的空间分辨率，但会产生光谱退化现象，不利于影像的分类，为此，可将小波的多分辨率分析与IHS变换相结合，如文献[11]提出的叠加融合法。

对于 $f(x)$，其经过一次滤波后得到 $f_1(x)$，$w_1(x) = f(x) - f_1(x)$ 包含这两个尺度之

间的信息,我们把它称为第一波面。一般情况下,影像 $f_i(x,y)(i=1,2,\cdots,n)$为原始影像在不同尺度下的逐个近似版本,因此,高分辨率 SAR 影像（或全色影像）的第一小波面具有在多光谱影像中所不含有的空间信息。叠加融合可以按以下方式进行，即将高分辨率 SAR 影像（或全色影像）经小波分解得到的各小波面直接叠加到多光谱影像中，叠加融合算法的具体步骤如下：

(1)分别对高分辨率 SAR 影像（或全色影像）与多光谱影像进行几何纠正，像航空影像、SAR 影像应采用共线方程严密纠正，TM,SPOT 等影像可采用多项式纠正。

(2）采用基于区域的几何配准方法，将多光谱影像配准到高分辨率 SAR 影像(或全色影像)上。

(3)对高分辨率 SAR影像(或全色影像)按小波算法进行小波分解,文献[11]认为分解层数一般为 3～5。

(4) 将高分辨率 SAR 影像（或全色影像）小波分解的小波面叠加至多光谱影像经 IHS 变换后的强度 I 影像中。

(5)对于影像中(x,y)位置上的像素，可以表示为该位置的各小波系数 $w_j(x,y)$的累加，再加上其近似信号,即

$$f(x,y)=\sum_{j=1}^{n}w_j(x,y)+f_n(x,y) \tag{2.3.4}$$

按此式进行小波逆变换得到新的强度影像 I'。

(6) 将 I',H,S进行 IHS逆变换,得到融合后的影像。

2.3.4 基于局部直方图匹配的融合

除了小波变换以外，还可以利用高通滤波将高分辨率影像中的几何信息逐像素地叠加到低分辨率影像频道中而进行融合。高分辨率影像的高通滤波对应于影像空间的高频分量，因此，将该滤波器叠加到低分辨率影像频道上，高分辨率影像的几何信息内容在融合结果中显而易见。高通滤波融合算法可按下式定义[12]：

$$F(i,j)=L(i,j)+[H(i,j)-\overline{H}(i,j,w,h)] \tag{2.3.5}$$

式中：$F(i,j)$为(i,j)位置上的融合值；$L(i,j)$和 $H(i,j)$分别为低分辨率和高分辨率频道上同名位置上的像素值；$H(i,j,w,h)$对应于以像素(i,j)为中心 $w\times h$ 窗口尺寸的高分辨率影像频道的局部均值。

从 2.3.2 和 2.3.3 小节我们已经看到，为了将高分辨率影像的结构信息叠加到低分辨率多光谱影像中，经典的方法是将高分辨率影像的高频分量叠加到多光谱影像的强度分量中，或用高分辨率影像替代多光谱影像的强度分量。这种方法虽然具有明显的效果，但仍会产生一定的光谱畸变，且其融合结果依赖于景物。为了减小融合影像与低分辨率多光谱影像频道的差别,文献[13]提出了以下的基于局部均值匹配的融合算法。

设尺寸为 $w\times h$ 的局部窗口中的融合影像像素值是高分辨率影像像素值的线性函数：

$$F(i,j) = kH(i,j) \tag{2.3.6}$$

式中 $F(i,j)$为(i,j)位置上的融合值；$H(i,j)$为高分辨率频道上同名位置上的像素值；k 为待定的权系数。

为了使融合影像尽可能保留原低分辨率多光谱影像的光谱信息，也就是说，融合影像中的低频成分应与原低分辨率多光谱影像的低频成分相同或非常接近，即对于尺寸为 $w\times h$ 的局部窗口，融合影像与低分辨率影像频道应满足以下条件

$$E[F(i,j,w,h)] = E(L(i,j,w,h)] \tag{2.3.7}$$

将式(2.3.6)代入上式得

$$E[kH(i,j,w,h)] = E[L(i,j,w,h)] \tag{2.3.8}$$

$$kE[H(i,j,w,h)] = E[L(i,j,w,h)] \tag{2.3.9}$$

$$k = \frac{E[L(i,j,w,h)]}{E[H(i,j,w,h)]} \tag{2.3.10}$$

式中，$E[L(i,j,w,h)]$，$E[H(i,j,w,h)]$ 分别表示以像素 (i,j)为中心 $w\times h$ 窗口尺寸的低分辨率影像频道和高分辨率影像频道的期望值(即局部均值)。

将式(2.3.10)代入式(2.3.6)中，并用 $\overline{L}(i,j,w,h)$，$\overline{H}(i,j,w,j)$分别代替 $E[L(i,j,w,h)]$，$E[H(i,j,w,h)]$，得到局部均值匹配融合算法：

$$F(i,j) = H(i,j)\frac{\overline{L}(i,j,w,h)}{\overline{H}(i,j,w,h)} \tag{2.3.11}$$

式中，$F(i,j)$为 (i,j)位置上的融合值，$L(i,j)$和 $H(i,j)$分别为低分辨率和高分辨率频道上同名位置上的像素值；$H(i,j,w,h)$，$L(i,j,w,h)$，分别对应于以像素 (i,j)为中心 $w\times h$ 窗口尺寸的高分辨率影像频道和低分辨率影像频道的局部均值。

2.3.5 基于类别的影像融合[5]

基于类别的影像融合是一种高层次的融合，它大致可分为三个步骤。首先可按应用的需要分类，但一般仅分大类，如植被、水体、城区、平原、山地等 其次是特征选择，以便对各大类中的细类进行分类；然后对以上各大类选择各自的特征影像进行融合。

1 分类

由计算机自动提取大的地物类型是不难实现的，一般使用统计模式识别就能实现。例如使用最小风险的贝叶斯决策分类，后验概率为：

$$P(\omega_i/x) = \frac{P(x/\omega_i)\cdot P(\omega_i)}{P(x)}, i = 1,2,\cdots,m \tag{2.3.12}$$

风险为：

$$r_j(x) = \frac{1}{P(x)}\sum_{i=1}^{m} L_{ij}P(x/\omega_i)\cdot P(\omega_i) \tag{2.3.13}$$

式中，L_{ij}为分类损失，当 $j=1,2,\cdots,k$，$r_k(x)=\min(r_j(x))$时，$x\in k$。

对于像平原、山区的区分可以采用结构模式识别方法或用 GIS 数据辅助区分，必须指出不管哪一种算法的计算机分类总有一些错误，适当的人工干预是弥补这种错误的较好方法。

2) 特征选择

分类后，每个大类选择哪些特征影像进行融合是分类融合中至关重要的一环，这是因为各大类中的细类的可分性对不同的特征影像往往有程度上的不同。一般可从以下几方面考虑特征选择问题：一是直接考虑多波段影像的组合，如水质细分的最佳波段是 TM4, TM3, TM2, TM1，植被是 TM5, TM4, TM3, TM2，岩石是 TM7, TM5, TM2，城区为 TM7, TM4, TM2, TM1；二是考虑结构特征，如雷达图像对植被、城区、山区的粗糙度显示较好；三是利用统计参数，如把特征影像的类内离散度和类间离散度作为类别细分的重要依据。

3) 分类融合

根据各个大类进行特征选择后，可形成一个最佳特征影像组合表(表 2.3.2)。

表 2.3.2 最佳特征影像组合

大类别	最佳特征影像组合
1 水体	TM4,TM3,TM2,航片
2 城区	TM7,TM4,TM2,雷达影像
3 植被	TM5,TM4,TM3,雷达影像

为了在分类的基础上进行分类，可根据特征组合表在程序中用逻辑判断语句打开最佳特征影像文件进行融合处理或用专家系统中最简单的正向推理法，依据专题选择特征进行融合。

2.3.6 质量评价[13]

为了考察融合影像光谱信息内容的质量，一些评价判据是利用融合影像与低分辨率光谱影像辐射值的比较来定义的。假若两影像相互匹配，那么说明它们的全局统计参数（如均值和标准差)应该非常相近。在此，给出两个有用的参数：平均梯度和偏差指数[14]。

1) 平均梯度

平均梯度反映影像中微小细节反差与纹理变化特征，同时也表达影像的清晰度，其公式如下：

$$\nabla\overline{G}=\frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}[\Delta_x f(i,j)^2+\Delta_y f(i,j)^2]^{1/2} \tag{2.3.14}$$

式中，$\Delta_x f(i,j)$，$\Delta_y f(i,j)$分别为像素(i,j)在 x，y 方向上的一阶差分值。

2)偏差指数

由 Costantin 等人定义的偏差指数，即融合影像与低分辨率影像差值的绝对值与其低分

辨率影像值之比，其公式如下：

$$DI = \frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\frac{|F(i,j)-L(i,j)|}{L(i,j)} \tag{2.3.15}$$

参考文献

[1] 罗志增,蒋静坪．基于D－S理论的多信息融合方法及应用．电子学报，1999,27(9)：100～102

[2] J.Killer, M.Hatef, R.P.W.Duin, J.Matas. On Combining classifier. IEEE Trans. PAMI, 1998 20(3):226～239

[3] 马继涌等．多通道信息融合的改进乘积规则．电子学报，1999,27(8):1～4

[4] 周杰等．基于方向对称变换的人脸定位方法．电子学报，1999,27(8):12～15

[5] 孙家柄,刘继林,李军．多源遥感影像融合．遥感学报,1998,2(1):47～50

[6] F. P. Preparate and M. I. Shamos. Computational Geometry: An Introduction. Springer－Verlag, 1985

[7] 张钹,张铃．问题求解理论及应用．北京 清华大学出版社,1990

[8] 戴旭．腾冲综合土地单元图的编制与编码的实验研究．地理学报，1989,44(1):94～100

[9] 贾永红,李德仁,孙家柄等．四种HIS变换用于SAR与TM影像复合的比较．遥感学报，1998,2(2):103～106

[10] Harris, J.R. Murray, T.Hirose. HIS Transformation for the Integration of Radar Imagery with Other Remotely Sensed Data. PE&RS, 1990,56(12):1631～1641

[11] 李军,周月琴,李德仁．小波理论用于高分辨率全色影像与多光谱影像的融合研究．遥感学报，1999,3(2):116～121

[12] R.A.Showenerdt. Reconstruction of Multi－spatial, Multi－spectral Image Data Using Spatial Frequency Content. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996 62 (9):1067～1074

[13] 李军,周月琴,李德仁．影像局部直方图匹配滤波技术用于遥感影像数据融合．测绘学报，1999,28(3):226～232

[14] M. Costantini, A. Farina, F. Zirilli. The Fusion of Different Resolution SAR Images. Proceedings of the IEEE, 1997,85(1):139～146

第 3 章　空间概念形成与概念的联想

凡是由感官可以获得的信息,如看到、听到、感觉到、尝到或嗅到,都可以把它们归为一种感性信息。对于由传感器获取的信息也可以把它们看成一种感性信息。在诸如模式识别、人工智能等研究领域通常把感性信息处理与模式信息处理和面向低层次信息处理相对应，而把建立在对事物的属性、特点、联系进行分析、综合、比较的基础上,去除其次要的非本质方面,提取出本质属性和联系所形成的概念与符号信息处理和面向高层次信息处理相对应。从空间信息处理的角度，我们也可以把上面的关系归结为空间信息、空间数据库和空间概念之间的关系。这种关系是空间信息系统集成中的重要研究内容。本章首先就这方面内容作了一些介绍。

随后介绍了形成概念的几种方法，并专门探讨了结构域中的概念形成以及与概念形成有关的空间数据索引和抽象。

本章的最后探讨了一个较为特别的论题即概念的联想，并给出了这方面研究的一些事例。

3.1　空间信息与空间概念

假如我们想试验一个人是不是理解一个空间概念的意义[1]。记试验对象为 H,而所论概念为 p≙针叶林,较为简单的方法是让 H 观看各种各样载有针叶林信息的图像 W(例如一些航空图像),请 H 给每个图像与他所感知的 p 的意义的符合程度打分,得分记为 $c(w)$。若 H 对每个 w 都能够给出正确的结果,即 H 能通过这个试验,那么就可以断定 H 明白 p 的意义。若 H 还能够言明他在 w 上做试验获得 $c(w)$的试验过程,那么 H 不但在直觉上了解了 p 的意义,而且把对 p 的意义的理解提高到了理性认识的高度，我们看到，正是 H 所言明的试验过程而不是别的什么东西代表了概念 p 的意义。

除了用图像作试验，对概念的意义的试验也可以在另一个更抽象的层次上进行。假设我们事先有一组描述景物或实际状态的特征如下：

(1)个体形状 {尖圆锥形—— 针叶林
　　棋盘形—— 灌丛

(2)阴影 {投影明显 —— 针叶林
　　不明显 —— 灌丛

(3)边界——成块状、带状交错分布

或者，假定事先已建立了一个数据库 D。在这种情况下，可以把概念 p 出示给 H，让 H 在 D 上做一组试验 T 以产生测分。写成式子，有

$$\tau = T(D) = \mathrm{Comp}(p, D), \qquad (3.1.1)$$

式中，试验 T 可以看作概念 p 的意义表达；测分 τ 是 p 与 D 符合程度的测度。如果 H 的测分值达到规定的标准，说明 H 根据景物或实际状态的特征可以明白 p 的意义。

我们注意到上述的过程是从两个途径开展的：其一是在非常直观的空间层面上直接对景物进行观察；其二是根据抽象的景物或实际状态特征，对命题的意义进行确认。事实说明，上述两个途径所采用的方法虽然不同，但在一般情况下可得到相同的结果。它给了我们很重要的启示，即在分析遥感图像时既可直接考察图像，也可间接考察从图像中提取的特征。几十年图像分析的发展历程已充分证实了这一点[2]。

20世纪 60年代初，图像分析的主要方法是模式识别早期发展阶段使用的直观的模板匹配方法。此法是将所要检测的景物的样板与像场中所有的未知景物进行比较。如果某一未知景物与该样板匹配，便将该景物记为样板景物。这一方法的实质就是直接考察图像或景物。

到了 60 年代的中后期，图像分析中出现了基于决策理论的模式识别方法，以及与形式语言有关的结构方法。这两种图像分析方法虽然在处理和识别图像的过程中有许多的不同，但有一点是共同的，即它们所分析的模式都不是原始数据，而是经过抽象的图像特征，也就是说，它们都属间接考察图像的范畴。不过，二者虽然都要提取图像特征，但方法是显然不同的。决策理论方法通常采用论域无结构情况下的特征提取，结构方法通常采用论域有结构情况下的特征提取。

遥感图像分析的经验表明，直接观察图像，易于获取关于景物的原始的空间、光谱、时间、视觉等方面的空间信息。它们是解决图像分析问题的基本依据，我们称此为图像的初始特性。直接考察图像的方法就是借助这些凭感觉得到的初始特性，用写实或模仿来表达模式，并在相似性基础上，对图像进行分析、比较和识别。不过，凭感觉得到的初始特性仅是一种感性认识，并不可靠。其实，某些初始特性是所观察景物可有可无的特性，在所有的特性中只有部分特性是景物所必须具备的特性。前一特性的有无，并不影响某种景物之所以为某种景物，因而这一类特性乃是这种景物的非本质的特性；后一类特性的有无，直接影响某种景物之所以成为某种景物，因而这类特性是这种景物的本质特性。这就需要我们依据已有的感性认识，对有关景物进行仔细比较和思考，逐步地从关于景物的各种不同特性中提取出关于景物的本质特征，尤其是一般特性，也就是同类景物之所以为同类景物的共同本质特征。这个过程也就是根据抽象的景物或实际状态特征，处理、识别和分析景物的过程。

若把不同的景物的本质特征关联的存贮。这样，我们可得到统一的记忆矩阵，它将全部记忆按内容保存住。当输入这类景物或其部分事项时就可以把本质特征想出 即使在‘ 想起 ’时，伴随着一些模糊不清的事物，重要的景物特征仍可由许多相关联的事项相互确认。再把这些

特征进行组合，就得到了景物的理性认识——表象与描述。所谓表象[3]是指一种能把某些实体或某几类信息表达清楚的形式化系统，以及说明该系统如何行使其职能的若干规则。使用某一种表象描述一个给定的实体所得到的结果，称之为该实体在这种表象下的一个描述。在此，我们寻求通过表象得到两种描述，一种是根据形式语言理论对本质特征进行组合得到与景物概念有关的描述；另一种是在本质特征组合的基础上，在新的层次上对景物进行写实或模拟。它与直接的写实或模拟的不同之处在于：前者是基于表象的描述，后者是初始特性的直接反映。也就是说，前者在再现景物的过程中，已去除了景物中的次要的或非本质的特征。例如,简图、草图、三维模型、等值线图等都属于模拟表象,是对各种景物的视觉化,但又不是景物本身或其图像，而是它们的抽象再现。

图3.1.1 直观地体现了上述的思路[4]。现结合该图给出其定量的说明。

有一个景物 x，设 x 包含 m 个特征 $\zeta=1,2,\cdots,m$，则 x 用向量形式可表示如下：

$$x=(\zeta_1,\zeta_2,\cdots,\zeta_m)^T,$$

$$\zeta=\begin{cases}1\\0\end{cases}\quad(i=1,2,\cdots,m)\tag{3.1.2}$$

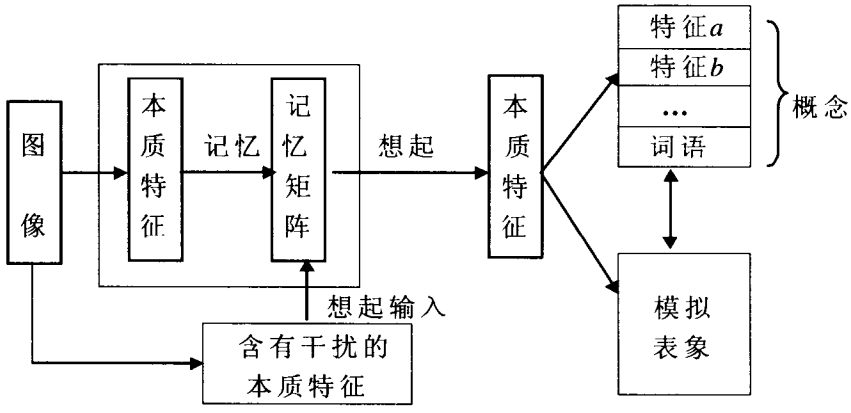


图3.1.1 概念与模拟表象的形成过程及其关系

现在考虑在记忆矩阵中发生重叠的情形，即一个特征不只是出现在一个景物中。设有两个分类(或叫两个本质特征类) A，B。某一景物 x 或属于 A 或属于 B。对一属于 A 的 x，特征 $\zeta_i=1$ 的概率为 p_i，$\zeta_i=0$ 的概率为 $1-p_i$。对一属于 B 的 x，特征 $\zeta_i=1$ 的概率为 q_i，$\zeta_i=0$ 的概率为 $1-q$。这里主要目的是不仅要由包含一般干扰信息的想起输入完成所要想起的本质特征，而且还要由包含其它景物的特征的想起输入来形成适当的概念和模拟表象。也就是说

在景物 x 中,包含着景物 y 的某些特征,若 x 的特征占 50% 以上,则想起 x 的概念或模拟表象 同样,在景物 y 中,若 y 的特征占 50% 以上,则想起 y 的概念或模拟表象。

3.2 形成概念的几种方法

概念形成过程通常包括从一般到特殊和从特殊到一般两个过程。上面的论述启发我们可以从两个角度来描述概念形成过程。

3.2.1 证据的数量

从人们通过观察各种景物得到某个概念的意义这一现象，我们很容易想到景物的多少与概念的概括程度是有关系的。事实上，如果某一概念与许多景物有关系，说明此概念得到了许多证据的支持,也就是说此概念是具有普遍意义的 反之,如果某一概念仅与少数景物有关系，说明支持此概念的证据很少，也就是说此概念较为特殊。概念与证据的数量的关系可用树结构来说明(见图 3.2.1)。在这个树中，低层次的节点证据较少，叶节点的证据最少。相对而言,高层次的节点证据较多,因为这些节点除了自身的证据以外,还包括了它们孩子的证据。

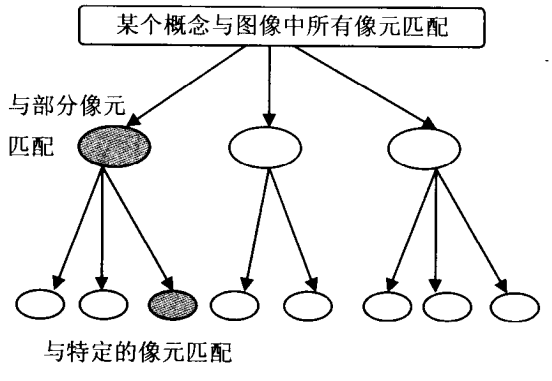


图 3.2.1 概念与证据数量的关系

3.2.2 特征的数量

根据景物或实际状态的特征可以明白概念的意义，说明特征的数量也与概念的概括程度有关系。通常情况下，如果某一概念仅与少数特征有关系，说明此概念可以在众多景物出现，即此概念是具有普遍意义的；反之，如果某一概念与较多的特征有关系，说明具有这些特征的

景物较少，即此概念较为特殊。假如一个模式由色彩、大小和位置三个特征定义，另一个模式仅由色彩和大小两个特征定义,那么,前一个模式显然更特殊,后一个模式应该更一般。

应用特征的数量可以说明概念的形成过程。当景物从匹配较多的特征过渡到匹配较少的特征，对应的概念将从特殊到一般；当景物从匹配较少的特征过渡到匹配较多的特征，对应的概念将从一般到特殊。这里的过程可用图 3.2.2来说明。图 3.2.2 由两个层次的特征集组成，对应概括程度不同的两个模式集。假定输入的景物在第一层可能对应四个模式：房屋、车道、草地和道路。其中房屋、车道和草地可组成住宅区,并与新的特征集相对应。很显然,在第一个层次上房屋、车道等模式所对应的特征相对较少,也就是说比较一般,而在第二个层次上，住宅区的特征包括了房屋、车道和草地的特征,因而对应的特征较多,故比较特殊。

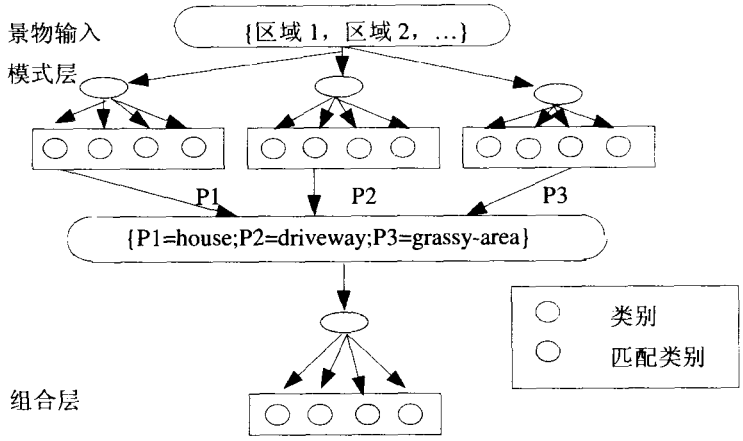


图 3.2.2 概念与特征数量的关系

3.2.3 两种概念形成方法的结合

以上表明，概念形成过程可以从证据的数量和特征的数量两个方面给予描述。这两种方法存在明显的差别，但也有共同的处理方法。以下就这方面问题加以讨论。

首先，假定各个类是可以区分的，我们能定义区分正确的类的概率 $P(\text{correct})$为与各个类有关的加权和

$$P(\text{correct}) = \sum_{k} P(C_k)P(\text{correct} \mid C_k) \tag{3.2.1}$$

如果进一步将类别的属性 A_j 与类别的正确值联系在一起，我们将能得到如下的区分正确的类的概率

$$P(\text{correct}) = \sum_k P(C_k) \sum_j P(a_{A_j} \mid C_k) P(\text{correct}_{A_j} \mid C_k) \tag{3.2.2}$$

式中，$P(a_{A_j} \mid C_k)$是正确类别下属性 A_j 的类条件概念密度。

我们还应该注意到每一个属性都可能有不同的值。考虑到这个问题，可进一步将(3.2.2)式改写为下式：

$$P(\text{correct}) = \sum_k P(C_k) \sum_j P(a_{A_j} \mid C_k) \sum_i P(A_j = V_{ij} \mid C_k)^2 \tag{3.2.3}$$

式中，$\sum P(A_j = V_{ij} \mid C_k)^2$ 表示获得属性 A_j 的某个正确值的类条件概念密度，其中 V_{ij}为属性 A_j 的第 i 个值。因为 $P(A_j = V_{ij} \mid C_k)$既可以表示 $A_j = V_{ij}$为真时的概率，也可以表示我们估计其为真时的概率，而这两个是互相独立的事件，故在(3.2.3)式中，$P(A_j = V_{ij} \mid C_k)$用平方表示。

在大多数场合下，都可以将(3.2.3)式作为一种工具用来对基于证据的数量的概念形成过程进行测度。但对于基于特征的数量的概念形成过程，用(3.2.3)式进行测度存在明显的缺陷。因为对于后一个过程，通常情况下需要把属性分为两种类型。第一种类型的属性一般被用做分类的依据，而第二中类型的属性仅需要对它们进行预测就可以了。为了达到这个目的，有必要将景物与类别之间的关系分为两种情况。一种情况是景物为某一类别中的元素。如果令 I 和 C_k 分别代表景物和类别，则这种情况可表示成 $I \in C_k$。另一种情况是从某一景物可推出某一类别，即 $I \rightarrow C_k$。可以看出 $I \in C_k$ 与证据的数量有关，$I \rightarrow C_k$ 与特征的数量有关。若把它们看成可能出现的状态 $P(I \in C_k)$和 $P(I \rightarrow C_k)$，并把它们引入到式(3.2.3)，则可对概念形成过程进行更具体的测度

$$P(\text{correct}) = \sum_k P(I \rightarrow C_k \wedge I \in C_k) \sum_j \sum_i P(a_{A_j} \mid C_k) P(A_j = V_{ij} \mid I \in C_k)^2 \tag{3.2.4}$$

式(3.2.4)包含了对证据的数量和特征的数量两个方面的描述，因而能较全面地反映某个层次上的某种概念出现的可能性。

3.3 结构域中的概念形成

在概念形成过程中，把对象与某些特定的属性联系在一起是必不可少的步骤，但若仅做到这一点，那还只是简单的概念形成过程。因为任一对象通常都具有结构，只有在结构域中来讨论概念形成过程，才能更好地反映对象的本质特征。

结构域中的对象与概念都具有属性，但对象所具有的属性是无序的，也就是说这些属性之间并没有什么特别的‘角色’意义，而且也缺乏特定的约束关系。概念所具有的属性就不同了，

这些属性不仅被约束在一定的关系之下，并且在统一的概念下各自扮演着独特的角色。以下以图 3.3.1 中房屋与道路之间的关系来说明结构域中的概念形成过程。

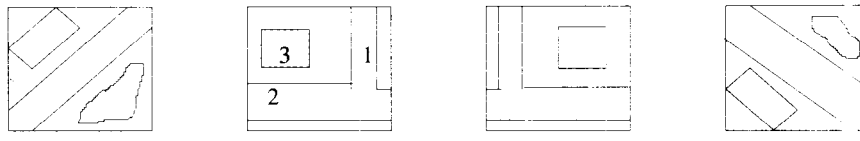


图 3.3.1　房屋与道路

首先让我们注意图 3.3.1(b) 中用方框框起的景物。在此景物中存在房屋与道路，它们基本上呈平行关系。对此景物可描述结构对象房屋一道路 b如下：

房屋一道路 b　　((成分 1(色调 :浅白)(形状 :长条))
(成分 2(色调 :浅白)(形状 :长条))
(成分 3(色调 :灰)(形状 :长方))
(垂交成分 1 成分 2)
(平行成分 3 成分 1)
(平行成分 3 成分 2)).

在以上关于结构对象的描述中，整体和部分的关系被隐含在表达式中，并被作为对象组织的前提条件之一。

在此，我们需要区分两种不同类型的对象。一种称为简单对象，如房屋一道路 b 中的成分 1 成分 2 和成分 3，它们的属性来自对景物的直接观察和测度。另一种称为结构对象，如上面给出的描述房屋一道路 b。结构对象由简单对象（或其它结构对象）以及它们之间的关系组成。在房屋一道路 b 中存在相交和平行两种关系，它们可被看成附加的属性。

对应简单对象和结构对象，可得到简单概念和结构概念。从简单对象到简单概念，主要是将与简单对象有关的属性有序化（或特征化），也就是将所有来自对景物的直接观察和测度的属性根据其在概念形成中所起的作用，赋予不同的角色标记。从结构对象到结构概念，除了将有关的属性有序化，还要对所涉及的关系进行约束。例如，由前面的结构对象房屋一道路 b 可得到如下的结构概念：

房屋一道路平行（（成分 1(形状 :长条)
(成分 2(形状 :长条))
(成分 3(形状 :长方))
(平行　成分 3　成分 1)
(平行　成分 3　成分 2)).

在上面的结构概念中，成分 1、成分 2 和成分 3 为简单概念，它们分别来自简单对象成分 1、成

分 2 和成分 3，但对相关的属性进行了排序，去除了其中的次要属性。由简单概念以及它们之间的平行关系，可得到结构概念房屋一道路平行，并通过对关系的约束去除了次要的垂交关系。

对于图 3.3.1 中的景物，为了使其中的对象更易于描述，我们认为可以首先设置用于分析的窗口，然后对其进行模式化处理。假定已经存在了某个窗口，我们可以把它分成四个部分，并分别用 1,2,3 和 4 标号(见图 3.3.2 (a))，并认为四个部分中的每一个都对应一种成分，这样整个窗口构成了一个由四个成分组成的结构对象。根据灰度图像的实际情况，窗口中的每一个成分都包含两方面的属性 色调与形状，它们可以写成 $Attr_{11}$，…，$Attr_{42}$。在此，Attr 的第一个下标代表窗口中成分的序号，第二个下标代表属性的序号(如色调为 1，形状为 2)。其中，$Attr_{i1}$(色调)有两种可能的状态 深和浅，即 $Attr_{i1}=\{1=$ 深，$2=$ 浅$\}$；$Attr_{i2}$(形状)有三种可能的状态 长方、长条和任意，即 $Attr_{i2}=(1=$ 长方，$2=$ 长条，$3=$ 任意$)$。这样，对应窗口中每一个成分所在的位置，其属性值可能出现 6 种不同的组合，具体情况参见图 3.3.2(b)。

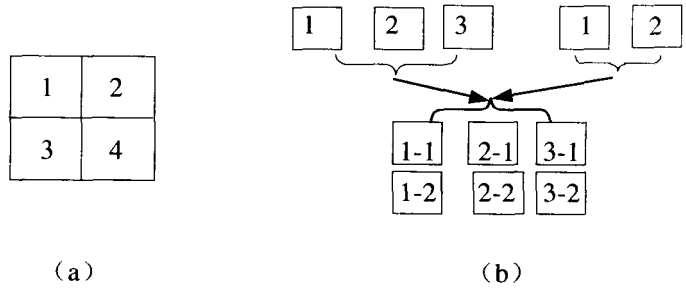


图 3.3.2 窗口对象的模式化

现在，结合图 3.3.3 让我们用窗口对象的描述方式来说明结构概念房屋一道路平行、房屋一道路垂交平行和房屋一道路对角平行的形成。首先，选择了 15 个事例，其中 9 个事例与平行有关，出现频率为 9/15。在 9 个事例中，有 4 个与垂交平行有关，另外 5 个与对角平行有关，出现频率分别为 4/9 和 5/9。其次，不论是平行还是垂交平行或对角平行，都用窗口对象的描述方式，分别考察成分 1、成分 2、成分 3 和成分 4 的特征化属性的出现频率。例如，在房屋一道路垂交平行中，成分 1 出现长条形有三次，其出现频率为 3/4；出现长方形有一次，其出现频率为 1/4。依次考察成分 2、成分 3 和成分 4 可以得到每一成分下各个特征化属性的出现频率。然后再对成分之间的关系进行分析，这是结构概念形成中的重要组成部分。例如，在房屋一道路垂交平行中，共得到四个关系，其中两个为平行关系，两个为垂交关系。类似于前面对成分的考察，也可以得到每一种关系的出现频率。最后，再利用抽象(见 3.4)建立概念之间的一般和特殊的关系。例如，在图 3.3.3 中，通过去除房屋一道路垂交平行和房屋一道路对角平行中的垂交和对角关系，可以得到更一般的结构概念房屋一道路平行。

结构概念名称：= 房屋—道路平行
出现频率：= 9/15

成分序号	特征化属性	出现频率
1	长条形= (1,2,3,7,9)	5/9
	长方形= (4,5,6,8)	4/9
2	长条形= (4,5,6,8)	4/9
	长方形= (1,3,7)	3/9
	任意形状= (2,9)	2/9
3	长条形= (1,3,4,5,6,7,8)	7/9
	长方形= (2,9)	2/9
4	长条形= (1,2,3,7,8,9)	6/9
	任意形状= (4,5,6)	3/6
关系序号	关系类型	出现概率
1	平行-1= (成分 1,成分 2+3)	1/9
	平行-2= (成分 2,成分 1+4)	3/9
	平行-3= (成分 1/4,成分 3)	2/9
	平行-4= (成分 2/3,成分 1)	3/9

结构概念名称：= 房屋—道路垂交平行
出现频率：= 4/9

成分序号	特征化属性	出现频率
1	长条形= (1,3,7)	0.75
	长方形= (8)	0.25
2	长条形= (8)	0.25
	长方形= (1,3,7)	0.75
3	长条形= (1,3,7,8)	1.00
4	长条形= (1,3,7,8)	1.00
关系序号	关系类型	出现概率
1	垂交-1= (成分 1,成分 3)	0.75
	垂交-2= (成分 2,成分 4)	0.25
2	平行-1= (成分 1,成分 2+3)	0.25
	平行-2= (成分 2,成分 1+4)	0.75

结构概念名称：= 房屋—道路对角平行
出现频率：= 5/9

成分序号	特征化属性	出现频率
1	长方形= (4,5,6)	0.60
	长条形= (2,9)	0.40
2	任意形状= (2,9)	0.40
	长条形= (4,5,6)	0.60
3	长方形= (2,9)	0.40
	长条形= (4,5,6)	0.60
4	任意形状= (4,5,6)	0.60
	长条形= (2,9)	0.40
关系序号	关系类型	出现概率
1	平行-1= (成分 1/4,成分 3)	0.40
	平行-2= (成分 2/3,成分 1)	0.60

图 3.3.3 通过事例将结构对象转变成结构概念

3.4 空间数据索引与抽象

为了将一个对象（包括简单对象和结构对象）纳入到一个概念中，一般要按照属性的概括程度将对象分成不同的层次。这涉及到自一给定的对象集合构造新的对象的处理，它可以被看成是抽象的过程，或者是产生空间数据索引的过程。在这一节中，我们将介绍以某一水平的

抽象操作为前提，自一给定对象集合构造新的对象并产生空间数据索引的过程。同时，依据3.3的思想,将这样的过程与概念形成相联系。

假设存在结构对象 $v_i(a_1,\cdots,a_n,x_{i1},\cdots,x_{im})$,其中 a_j 对同一层次所有的结构对象都相同，x_{ij}则不同。我们可以执行称为抽象的操作来产生更高层次的结构对象集合 $V_{1n}=(v_1,\cdots,v_n)$,其中 $a_1,\cdots,a_n$ 称为这些结构对象的公共属性。从结构对象集合 $V_{1n}=(v_1,\cdots,v_n)$ 出发，可得到称作空间数据索引的结构对象 $v_{1n}(a_1,\cdots,a_n,b_1,\cdots,b_m)$,其中 $a_1,\cdots,a_n$ 称作空间数据索引的公共属性，$b_1,\cdots,b_m$ 是自 $v_1,\cdots,v_m$ 抽出的其它属性，它们是空间数据索引的非公共属性。

由此可见，空间数据索引是指在空间数据库中的一索引对象，即一关联空间对象类的关联对象。同时可以看出，通过抽象可以得到空间数据索引。常用的抽象方法有两种。一种叫分支法或分枝结构[5],把一个问题分成子问题,子问题又分为更小的子问题或者将一部机器分为部件,将图像分为水域、道路和商业用地等,均属于分枝法。当分枝法各部分互相不相交时，为树形结构，否则是图结构。另一种称嵌套法或嵌套结构，即把一个问题按不同的细节程度加以分层。例如，在小比例尺卫星图像上，由区域地质构造形成大范围地表形态的特征非常明显,可开展区域地质研究;在中比例尺航片上,随着空间分辨率提高,由水文地质、地层岩性等因素影响而发育的地貌形态表现较好，可对局部的地貌特征开展研究。这种不同比例尺的图像,形成了嵌套式的层次结构,层次越低具有更多的细节。

对于分枝结构，可按如下方法进行抽象操作并得到相应的空间数据索引[6]:

步骤 1　对空间对象进行分类，并将该类号加入该对象的属性表列。

步骤 2　将空间对象 $v(a_1,\cdots,a_n,b_1,\cdots,b_m,c_1,\cdots,c_k)$ 分解为两个对象 $v_1(a_1,\cdots,a_n,b_1,\cdots,b_m)$和 $v_2(a_1,\cdots,a_n,c_1,\cdots,c_k)$。属性 $a_1,\cdots,a_n$ 至少包含原始对象 v 的名称。

步骤 3　新对象 v_1 和 v_2 通过产生索引对象而相互联系在一起。该索引对象是一关系对象 r_{12},它的名称是 v_1 和 v_2 的类型和名称的组合。r_{12}的类型是一新产生的类型码。

对于嵌套结构,我们假设对象 $v_1,\cdots,v_n$ 共享共同的属性 $a_1,\cdots,a_n$,若 $v_1,\cdots,v_n$ 并不共享共同属性，而是被给定了一个新的共同标号，该标号可被认为是对象属性的扩展。在这两种情况下可进行如下的抽象操作：

步骤 1　给空间对象集合赋予公共标号。这可用两种方法之一来完成：(1)用相等的值来等同公共属性;(2)用一公共标号属性来扩展对象属性。

步骤 2　将具有相同标号的空间对象聚集在一起形成一新的空间对象类，以公共标号作为其类型。

步骤 3　产生一新关系对象,称为索引对象,它包括(1)由步骤 2产生的空间对象类的类型;(2)自同样空间对象类中的空间对象的属性中抽出的其它属性。

图 3.4.1按照某个农业区数据的详细程度分成了四个层次，显然属嵌套结构。这个嵌套结构的最底层是田块，若干个田块构成地块，每一个农户可能管理几个地块，最后由若干个农

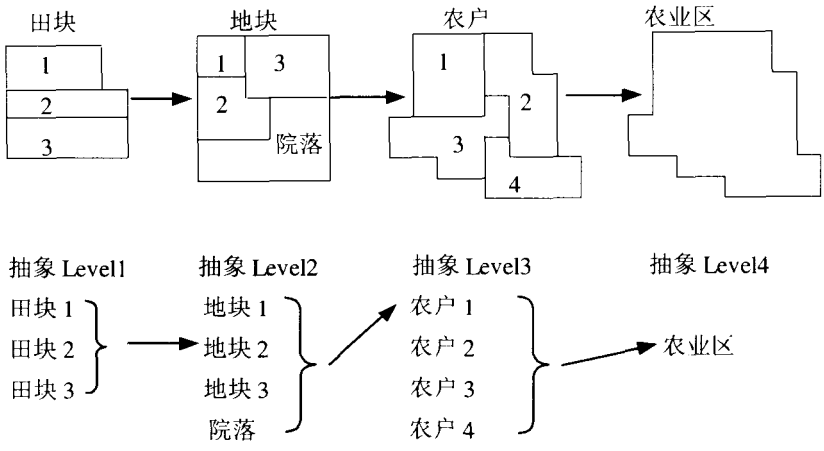


图 3.4.1　一个聚集和抽象的例子

户形成相对独立的农业区。值得注意的是，地块 2 由田块 1、田块 2 和田块 3 构成，按照其形成过程，地块 2 通常包含了田块 1、田块 2 和田块 3 中的共同属性。与此形成差别的是，农户 1 虽由地块 1、地块 2、地块 3 和院落组成，但这四个空间对象并不共享共同的属性。农户 1 实际上只是这四个空间对象的新的共同标号。由此可见，聚集虽然在概念上类似于嵌套结构中的抽象，但在聚集中，通常仅保留公共属性，而在抽象中主要是省去特别属性，不仅如此，它还允许任何抽取操作，因而较聚集更为一般。

聚集和抽象的过程可以和 Marr 的表象理论相联系。Marr 认为视觉是通过一系列不同层次的表象进行的[7]。第一层被称为“ 要素图 ”；它包含有意义的局部图像结构的描述，如边缘、线性或流场向量，以保留图像局部二维几何特征的特征描述，并以数组的形式表达。第二层叫做“2.5 维图 ”旨在描述局部表面性质(如颜色、朝向)和在以观测者为中心的坐标框架中的不连续点。另外的一个层次是“ 三维模型 ”，也就是将恢复的局部表面性质放入与原始图像配准的一系列数组中。从这点出发，计算一个以物体为中心的体积表达。从原始图像到要素图，从要素图到 2.5 维图，以及从 2.5 维图到三维模型，在某种意义上都可以看成是聚集和抽象的过程。在图 3.4.1 中，获取田块的过程实际上就是从原始图像到要素图的过程。以下我们结合图 3.4.2 来说明要素图中几何对象的聚集和抽象过程。

在图 3.4.2 中定义了两个函数[8]。一个称为距离函数，它用来度量边缘片段 e 和已知边界 b 之间的距离，并被表示为 $d(e,b)$。另一个称为角度函数，它用来度量边缘片段 e 和已知边界 b 之间的角度，并被表示为 $a(e,b)$。图 3.4.2 中 $d(e,b)$ 和 $a(e,b)$ 的应用分两种情形。在第一种情形下，已知两条互相平行的边界 b_1 和 b_2 待推测的边缘片段 e_1 介于二者之间(见图 3.4.2 (a))。在第二种情形下，已知两条互相垂直的边界 b_3 和 b_4，待推测的边缘片段 e_2 自身构成近于直角的关系并与 b_3 和 b_4 形成对角关系(见图 3.4.2 (b))。在每种情形下都存在

两个距离函数和角度函数，它们是判定待推测的边缘片段 e 是否为田块的边界的主要依据。

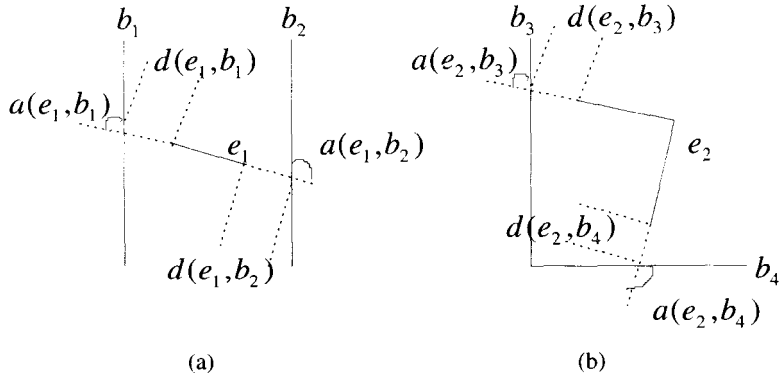


图 3.4.2　距离和角度函数被用于几何对象的聚集和抽象

从原始图像获得边缘片段并将它们置入由已知的边界构成的空间中，可以得到多种属性，其中上面提到的距离函数和角度函数应该是所有能成为田块的边界的边缘片段的共同的几何特征。因而利用这些共同几何特征也就可以实现从边缘片段到田块的边界的聚集和抽象过程。

从上面的介绍可以看出，空间数据索引与抽象密切相关。抽象可以看做自一给定的对象集合构造新的对象，同时，它也可以被看作自一给定的概念集合构造新的概念。两者的差别在于前者的抽象过程是对非特征化的(即无序的)属性进行的,后者的抽象过程是对特征化的(即有序的）属性进行的，二者之间存在一个如何将一个空间对象转变成一个空间概念的过程。就这个过程做一些探讨对寻找合适的空间数据索引形成途径是有益的。以下结合图 3.3.1 中道路与房屋的例子，说明如何在抽象过程中将一个空间对象转变成一个空间概念。

首先对图 3.3.1 中的景物进行分析，找出每一个结构对象的特征化属性。其次根据从一般到特殊的原则将特征化属性分层,并确定它们之间的联系,从而得到类似于图 3.4.3 中的属性结构。第三，当结构概念的某一成分的特征化属性的所有现实有相同的祖先时，用其祖先的特征化属性代替。例如,在图 3.4.3 中,结构对象房屋一道路垂交平行的成分 1 的特征化属性的四个现实有相同的祖先长条形，因而可用此属性来代替其四个更具体的属性。第四，若结构概念的所有成分的特征化属性为同一祖先，则可以把它们归入更上层的祖先，如在图 3.4.3 中可把它们归入图块。最后，若结构概念的不同成分的特征化属性为不同的祖先，则它们更上层的祖先为某种空间关系,如在图 3.4.3 中可把它们归入多边形关系。

为了说明所选取的特征化属性及其值与概念之间的关系，可用式（3.4.1)进行评价：

$$\sum^{\text{Atts}}\sum^{\text{Values}} P(A_i = V_{ij} \mid C_k)^2 \qquad (3.4.1)$$

式中,C_k 为 C 类的第 k 个结构概念(子类);A_i 为结构概念的 i 个属性;V_{ij} 是 A_i 的第 j 个值；

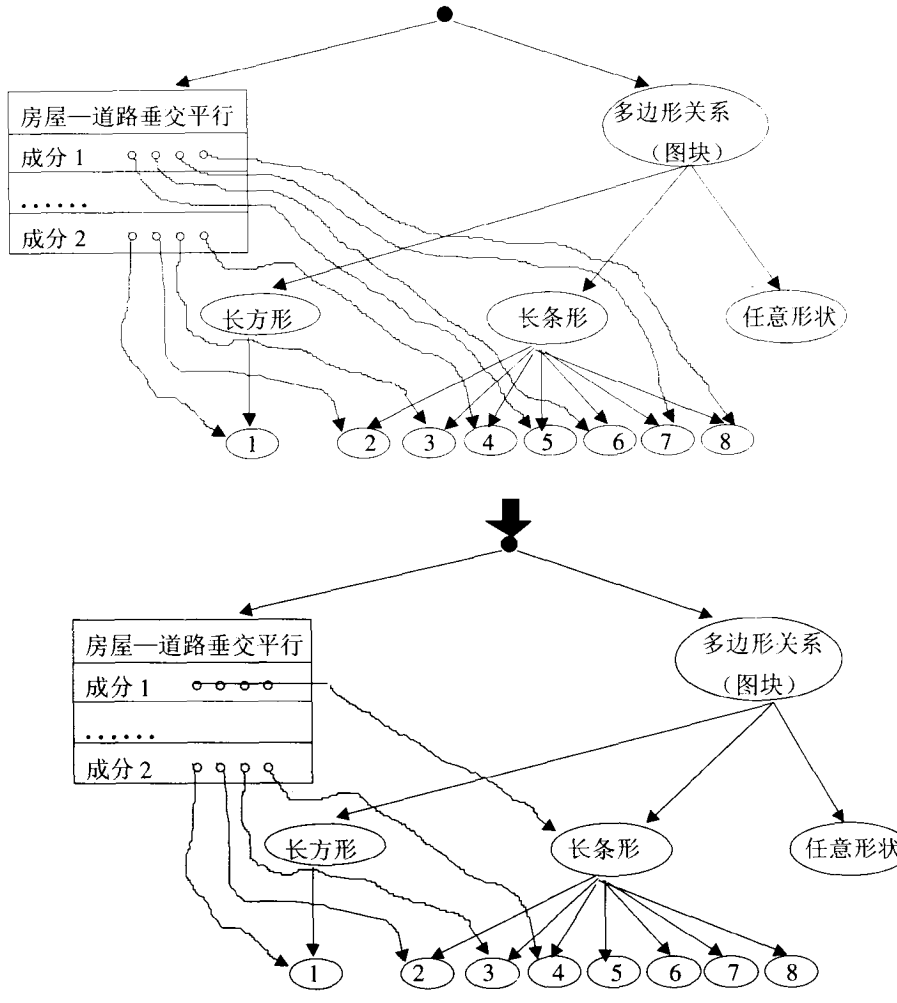


图 3.4.3 通过抽象修正结构概念的特征

$P(A_i = V_{ij} | C_k)$是条件概率。式 (3.4.1)的基本特点是,当属性仅具有少数的值,并且这些值具有较高的概率时，式(3.4.1)会有更高的得分。这个特点使得每个属性趋向一个值，同时，概率趋向于 1。其结果虽然越来越确定，但会导致越来越概括的属性被使用，这将使得许多经过这样处理的概念难以区分。例如，当我们借助色扇区分青冈栎和银木荷两种树木时，通过精确的分析知道青冈栎的色调处于紫红的范围，银木荷的色调处于橙红的范围，但概率都不等于 1 若青冈栎的色调概括为红，其概率将趋向于 1 同样,银木荷的色调也可概括为红,而且概率也趋向于 1。虽然当属性确定为红时，青冈栎和银木荷两个类别都能以近似 1 的概率与此

属性对应，但青冈栎和银木荷二者之间却很难区分了。

以上说明有必要对式（3.4.1)进行改进，方法之一是在属性概括时充分考虑信息量的变化。具体的计算可按式（3.4.2)进行：

$$\sum_{l\in W_i}[P(A_i = W_{il} \mid C_k)^2 - P(A_i = W_{il} \mid C)^2] \geq$$

$$\sum_{j\in V_i}[P(A_i = V_{ij} \mid C_k)^2 - P(A_i = V_{ij} \mid C)^2] \qquad (3.4.2)$$

式中，W_i 为属性值集 V_i 的子集；A_i 为结构概念的 i 个属性；V_{ij}是 A_i 的第 j 个值；W_{il}是 A_i 的第 l 个值，它通过对 V_{ij}的抽象而得到；C_k 为类 C 的子类。式（3.4.2)含义为：如果我们考虑用更小的属性值集 W_i 代替原来的属性值集 V_i，首先应该按一定的要求计算属性值集 W_i 和属性值集 V_i 相对子类 C_k 和类 C 的信息量变化，只有计算结果满足要求时才用属性值集 W_i 代替原来的属性值集 V_i。这样在对某些属性进行抽象和概括时，仍能有足够的信息量用以区分子类之间的差别。

3.5 概念的联想[9]

联想是由某人或某事物而想起其它相关的人或事物，或由于某概念而引起其它相关的概念。从信息处理的角度可以认为联想是人脑把各类事项（被记忆的片段内容）关联地存贮，并且以关联的方式想起的过程。其特点为：在“想起”时，还伴随着一些模糊不清的事物。重要的事情由许多相关联的事项相互确认、记忆，使这一重要事物的可靠性大大提高，而绝不会对外界事物产生一个毫无关联的反映。因此，联想记忆是人类处理信息的重要基础[4]。鉴于联想记忆的特点，它为我们将不完整的、污损的、畸变的输入样本恢复成完整的原型，使之适合于识别、分类等用途提供了新的思想方法。而模式的缺损、畸变这类复杂、多变的问题依赖传统的处理方式是难以解决的。

在此，我们将把注意力主要集中在概念的联想问题上。针对遥感图像分析，综合各种情况可得到概念联想的一般想法[10] 给定一个空间数据库 D，求出所有满足最小支持度和最小可信度的联想规则。该问题可以分解为两个子问题：(1)求出 D 中满足最小支持度的所有经常出现的空间模式；(2)利用经常出现的空间模式生成满足最小可信度的联想规则。对于子问题(1)，我们参照中国的汉字书法，对九宫格进行了特别的研究，认为九宫格是一种很好的记忆模式。这是因为九宫格可把记忆模式排列在九个小方格中不同的方位上，既有规律又简明，并且一些经常出现的局部空间模式大多可用它来表示，因而对分析图像的局部结构特征很有用。至于在九宫格中哪些空间模式满足最小支持度，我们在 3.5.3 中直接给出了一些例子。对于子问题(2)，针对输入模式不确定这类情况，文中提出了使概念激活的联想记忆表方法。

除了上面两个问题，这一部分还将涉及概念联想中的一些准备工作，如对较低级的、不确定的图像信息进行处理和表达，以及将它们转换成记忆模式等。

3.5.1 记忆模式及其表达

在与信息处理有关的领域中，通常把空间上和时间上相邻的信号值考虑为某种模式，也可理解为有序的实数值。在模式识别的理论中，这些实数集作为空间几何的一般化可被描述为向量。如果存在 n 个独立实数值 $\xi_1,\xi_2,\cdots,\xi_n$，它们可被理解为 n 维空间中的坐标。这个空间称作 R^n，它是所有来自区间$(-\infty,+\infty)$的 n 元实数的集合。一个向量 x 是 R^n 中的点（表示为 $x\in R^n$），它的坐标为 $\xi_1,\xi_2,\cdots,\xi_n$。

用来代表图像的向量通常可看成是由基本元素构成的镶嵌图形，每个基本元素具有一个实数值。这些元素可根据需要选取任意形式。图 3.5.1 是三种不同形式的向量，这三种向量都可以形式化为$(\xi_1,\xi_2,\cdots,\xi_n)$。可知，即使原始图像是 2 维的，形式向量仍是数字线形阵列[11]，并可用一维向量表示如下：

$$x=(\xi_1,\xi_2,\cdots,\xi_n)^T \tag{3.5.1}$$

它被称作记忆模式，而 xx^T 叫做自相关矩阵：

$$xx^*=\begin{bmatrix}\xi_1^2 & \xi_1\xi_2 & \cdots & \xi_1\xi_n\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \xi_n\xi_1 & \xi_n\xi_2 & \cdots & \xi_n^2\end{bmatrix}=(\xi_i\xi_j),1\le i,j\le n \tag{3.5.2}$$

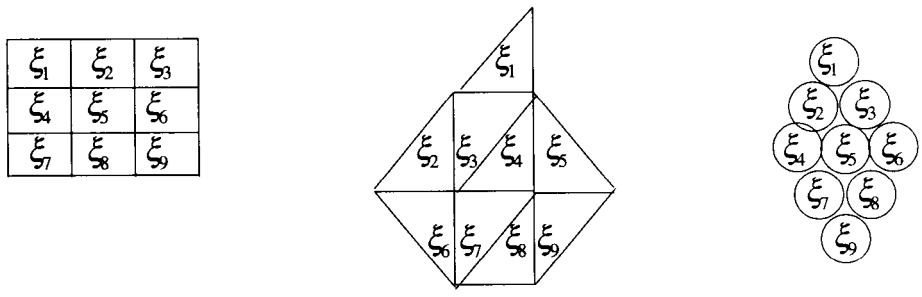


图 3.5.1 向量示例

用相关矩阵实现联想记忆功能，可以采用把每个记忆模式的相关矩阵都存起来的方法，但所占用的存储空间较大，通常还要涉及地址访问存取。若采用把各个相关矩阵相加的方法，这样最后只要保存一个矩阵，就可以将全部记忆内容保存住。若每个相关矩阵如式（3.5.2)所示，可得 k 个记忆模式的记忆矩阵：

$$M=\sum_{i=1}^{k}x_ix_i^T=(m_{lh}),\quad 1\le l,h\le n \tag{3.5.3}$$

其中，k 表示记忆模式的个数，而 $x_i=(\xi_{i1},\xi_{i2},\cdots,\xi_{in})^T$。

采用相关矩阵相加的方法，虽然可以减少存储空间，但若记忆模式的个数太多，会使记忆矩阵的记忆效果越来越差。作为一种折衷的方案，作者提出了如后文提到的表 3.5.1 和表 3.5.2形式的联想记忆表。它把记忆模式集中在一个表内，但不对记忆模式进行类似式(3.5.3)的运算，只施加简单的叠合。不过，在实现联想记忆的过程中，不单独就某一个记忆模式进行联想，而是利用联想记忆表对所有模式进行联想。

对任一给定的输入向量，通过 M 就可以在精度允许的范围内联想起所要想起的结果。

进一步，再使用量子化方法

$$\sigma_0(\xi)=\begin{cases}1,\text{当 }\xi>0\text{ 时;}\\0,\text{当 }\xi=0\text{ 时;}\\-1,\text{当 }\xi<0\text{ 时}\end{cases}\tag{3.5.4}$$

其中，σ_0 称为量子化函数。它对向量及矩阵同样适用，即若向量 $x^T=(\xi_1,\xi_2,\cdots,\xi_n)$，则有

$$\sigma_0(x^T)=(\sigma_0(\xi_1),\sigma_0(\xi_2),\cdots,\sigma_0(\xi_n))\tag{3.5.5}$$

若矩阵 $M=(m_{ij})1\leq i,j\leq n$ 则有

$$\sigma_0(M)=(\sigma_0(m_{ij})),1\leq i,j\leq n\tag{3.5.6}$$

设 y 是与 x(x 为某类物体的标准记忆模式)类型相同的向量，即 x 的一个具体事例，当输入 $y=(\eta_1,\eta_2,\cdots,\eta_n)^T$ 时，输出向量可表示为

$$z=\sigma_0\{\sigma_0(M)y\}\tag{3.5.7}$$

这里 z 是 n 元一维向量，其元素取值为 1,0,−1 三个值。式(3.5.7)的含义就是由具体事例 y 经联想机制所进行的联想。

一个记忆模式可以用向量 x_l 表示，由若干这样的向量可构成更复杂的记忆模式

$$x=(x_1,x_2,\cdots,x_m)^{\mathrm{T}}\tag{3.5.8}$$

其中 $x_1,x_2,\cdots,x_m$ 为部分向量。

若 x 中存在不确定的部分模式时，例如 x_m，则令 $x_m=0$(零向量)，于是有

$$\tilde{x}=(x_1,x_2,\cdots,x_{m-1},0)^{\mathrm{T}},\tag{3.5.9}$$

这时 x 由 $x_1,x_2,\cdots,x_{m-1}$想起。

3.5.2 指标向量与九宫记忆模式

为了对任意向量 x 规定其输入向量，需确定指标向量

$$v=(\xi_1,\xi_2,\cdots,\xi_n)^T,$$

$$\zeta_i=\begin{cases}1,\text{第 }i\text{ 个部分模式激活;}\\0,\text{其他}\end{cases}$$

指标向量的获取可采用多种不同方式，例如，对灰度图像可采用颤动模板，即将二值化阈

值矩阵 τ 依次叠加到灰度图像 f 上,用对应的阈值 $\tau(i,j)$ 对 $f(i,j)$ 取值,把 f 变成模拟灰度的二值图像,它可看做是输入向量 $\tilde{x}$。

图 3.5.2 是另一种指标向量获取方式。(见插页)其过程为:首先,提取不同地物的边界(在图 3.5.2 上为红色或蓝色)其次,规定边缘之间水平间距小于 5 个像元为阈值 a,5~10 个像元为阈值 b,大于 10 个像元为阈值 c 然后把此阈值阵列叠加到假彩色图像 f 上,用对应的阈值 τ 对 f 取值,其结果即为输入向量 x。

对于指标向量 v 与向量 x 可以定义乘法

$$v^* x = (\xi_1\zeta_1, \xi_2\zeta_2, \cdots, \xi_n\zeta_n)^T. \tag{3.5.10}$$

$v^* x$ 的含义就是对任意向量 x 用指标向量 v 规定其取值。

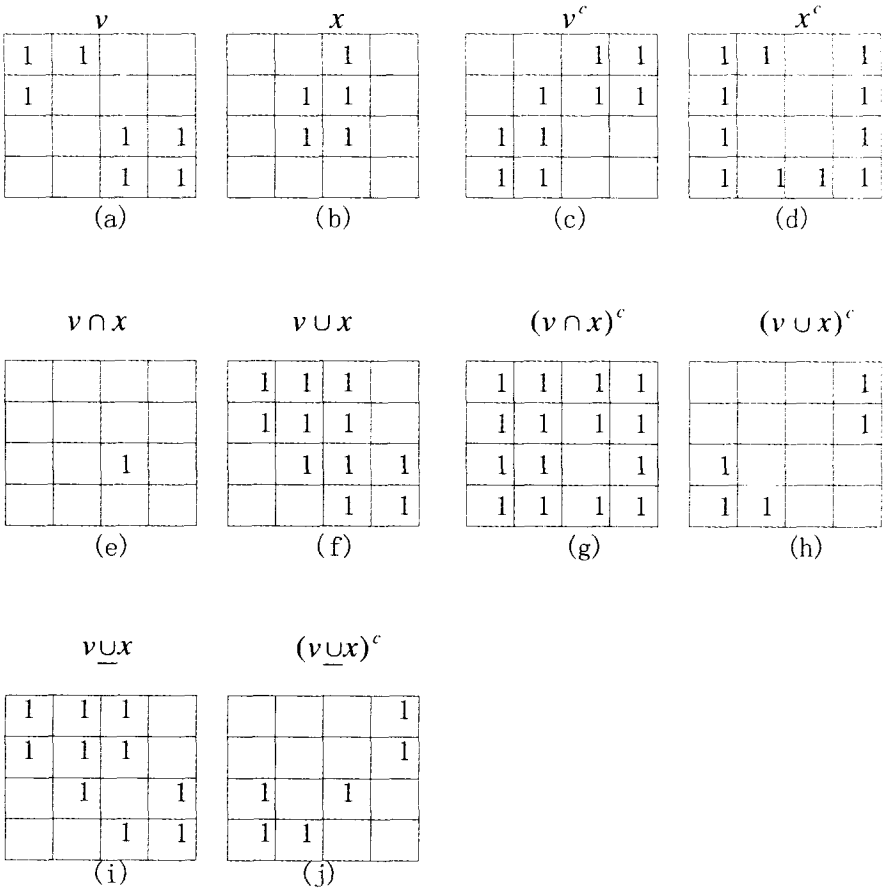


图 3.5.3 指标向量 v 与向量 x 之间可能的逻辑运算

如果把 v 和 x 都看成是像元的集合，则由式(3.5.10)定义的 v 和 x 之间的乘法可采用如下的逻辑运算：

(1) v^c ,·NOT·v （图 3.5.3(c)）；

(2) x^c ,·NOT·x （图 3.5.3(d)）；

(3) $v \cap x$, v·AND·x （图 3.5.3(e)）；

(4) $v \cup x$, v·OR·x （图 3.5.3(f)）；

(5) $(v \cap x)^c$, ·NOT·(v·AND·x) （图 3.5.3(g)）；

(6) $(v \cup x)^c$, ·NOT·(v·OR·x) （图 3.5.3(h)）；

(7) $v \cup x$, v·XOR·x) （图 3.5.3 (i)）；

(8) $(v \cup x)^c$, ·NOT·(v·XOR·x （图 3.5.3(j)

在以上运算中，$v \cap x$ 较为常见，以下 v 与向量 x 之间的乘 $*$ 主要指此运算。

若用 S 表示所有记忆模式 $x=(\xi_1, \xi_2, \cdots, \xi_n)^T$ 的集合，当 $x, y \in S$，如果有

$$v * x = v * y \tag{3.5.11}$$

则可以说 x, y 在 v 上有相同的规定。进一步还可定义记忆模式的指标向量的长度如下

$$l(v) = \sum_{i=1}^{n} \xi_i$$

$l(v)$ 表示任何向量 x 在 v 上的任何规定 $v * x$ 的“清晰度”。

为了验证上述的联想记忆方法的有效性，本文把图像上的 63×63(像元) 的区域划分成九宫的形式(图 3.5.4(a))，每宫的大小为 21×21 个像元。

在此基础上，根据遥感图像解译的经验，认为图 3.5.4(b), (c), …, (i) 等各记忆模式满足最小支持度原则，即它们都是经常出现的空间模式。这些模式中，有些是完全不重叠的，如图 3.5.4(b)与(h), (c)与(i)等，而大多数都有部分重叠，如图 3.5.4(c)与(d), (f)与(g)等，但完全重叠的模式是没有的。

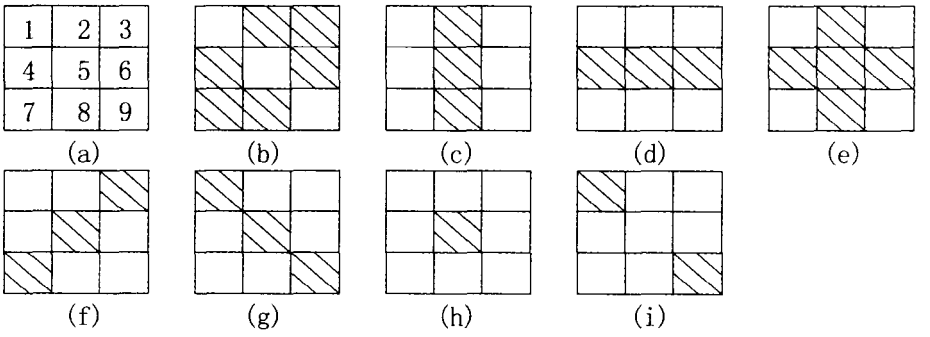


图 3.5.4 九宫记忆模式

在九宫内,指标向量是这样设计的:

$$\zeta_i = \begin{cases} 1, \text{经检测为边界的像元;} \\ 0, \text{其它,} i = 1,2,\cdots,63 \times 63 \end{cases}$$

实验过程为 根据 63×63 内边界点的分布状况,按照前述联想记忆原理,看其最终能趋向于图 3.5.4 中那一种记忆模式。

由图 3.5.4 可以看出,九宫是用‘井’字形交叉的线将矩形区域分成九个小格。当矩形区域对应的范围较小时,它可用来检测小范围的局部邻域结构特征;当矩形区域对应的范围较大时,它可用来检测大范围的局部邻域结构特征。正因为如此,存在不同大小的九宫记忆模式问题,它的确定与地学现象的空间变异尺度有关。本文主要是利用 TM(Thematic Mapper)图像,研究由水文地质、地层岩性等因素影响而发育的中等尺度的地貌形态邻域结构特征,因而所选择九宫记忆模式也与此尺度的地貌形态相对应。对于大尺度的地貌形态邻域结构特征,需选择更精细的九宫记忆模式;对于小尺度的地貌形态邻域结构特征,需选择更粗略的九宫记忆模式。

图 3.5.4 中的记忆模式类型是根据图像分析需要确定的。本文主要研究由层状碳酸盐岩与软弱 –半坚硬岩类影响而发育的地貌形态的不同,经认真考察,认为以上几种记忆模式就可以对二者的差异作较好的分析。如图 3.5.4 中的(c)、(d)、(f)、(g) 与由层状碳酸盐岩形成的地貌形态关系密切。当然,若要对这两个区域的地貌形态邻域结构特征作更多的比较,就需要更多的九宫记忆模式,甚至其它形式的记忆模式,如 5×5 的记忆模式。

3.5.3 实验与结论

在图 3.5.5(见插页)中,呈蓝色的像元为边界,它们是用模板边缘检测算法得到的(后面的图 3.5.7 中的呈红色的边界也由该算法得到)。用九宫格内每个小格中的边界像元数除以九宫格内一个小格的像元数(21×21),可得到每个小格的边界像元指数。然后,再用此指数与所有小格的平均边界像元指数(所有小格的边界像元指数之和除以小格的总数)进行比较,若某个小格的边界像元指数大于所有小格的平均边界像元指数,则认为该小格边界指标值为 1,否则,边界指标值为 0。这样由图 3.5.5 可得到图 3.5.6(a)。然后再由每个小格进行概念联想,表 3.5.1 是其结果。其上的“×”号代表由此小格不能联想与此列所对应的模式;“√”号代表由此小格可联想所对应的模式。最后根据九个小格的总体联想状况,确定与该输入对应的输出概念。由表 3.5.1 可以看出,根据图 3.5.5,最终可获得两个输出概念,它们分别对应模式(d)与(g)。这说明输入的清晰度不够,要有进一步信息,才能区分模式(d)与(g)。不过,(d)、(g) 都与由层状碳酸盐岩形成的地貌形态关系密切。在这种情形下,裸露岩石沿岩层走向断续延伸,在 TM 图像上表现为条状暗色影像,只是局部地段的裸露岩石的延伸方向略有差别,这种差别就表现为(d)和(g)两种不同的记忆模式。因而,即使不能区分模式(d)与(g),也对利用遥感图像分析层状碳酸盐岩分布及与其有关的地貌形态有实际价值。

表 3.5.1　根据图像在九宫格内的规定（见图 3.5.6(a)）进行联想的结果

出现状况 / 模式 / 九宫序号	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)
1	×	×	×	×	×	√	×	√
2	×	×	√	×	√	√	√	√
3	×	√	√	√	×	√	√	√
4	√	×	√	√	×	×	×	×
5	×	√	√	√	√	√	√	×
6	√	×	√	√	×	×	×	×
7	×	√	√	√	×	√	√	√
8	×	×	√	×	√	√	√	√
9	×	×	×	×	×	√	×	√
总计	2	3	7	5	3	7	5	6



(a)　　(b)

图 3.5.6　图像在九宫格内的规定

在图 3.5.7(见插页）中，呈红色的像元为边界。按照同样的方法，可从图 3.5.7 得到图 3.5.6(b)。根据图 3.5.6(b),最终可获得一个输出概念(e)(见表 3.5.2)。图 3.5.7 为软弱一半坚硬岩类分布区域，主要河流顺软弱的层面发育，支流短而多，格状结构是其发育的地貌形

表 3.5.2　根据图像在九宫格内的规定(见图 3.5.6(b))进行联想的结果

出现状况 / 模式 / 九宫序号	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)
1	×	×	×	×	×	√	×	√
2	√	√	×	√	×	×	×	×
3	√	×	×	×	√	×	×	×
4	√	×	√	√	×	×	×	×
5	×	√	√	√	√	√	√	×
6	√	×	√	√	×	×	×	×
7	×	√	√	√	×	√	√	√
8	√	√	×	√	×	×	×	×
9	√	√	√	√	√	×	√	×
总计	6	5	5	7	3	3	3	2

态特征之一。而图 3.5.4(e)主要用来从遥感图像上检测具有格状结构的沟谷系统，因此，上述的输出结果一方面再次说明图 3.5.4中的记忆模式对分析遥感图像是有效果的，同时也说明即使输入呈一定的模糊性，但由于上述的联想方法分离能力较强，仍能想起较符合实际的输出概念。

以上的实验表明，按九宫方式对输入模式进行简化和抽象，可以较好地对复杂图像进行结构化，有益于获取图像上的正交、包含、平行、对称等空间关系，并可利用它们对遥感图像进行分析，以及进行关联的存贮和关联的访问。同时也说明，在具体实现联想记忆的过程中，采用如表 3.5.1 和表 3.5.2 的内部结构，可以从不完整的或有畸变的输入图像得到较符合实际的输出概念。

参考文献

[1] 陈国权．知识工程中自然语义的模糊表达．北京 科学出版社，1991

[2] [美] K. S. Fu. 模式识别与计算机视觉．见：计算机技术最新发展动向，哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1988, 305～510

[3] D. Marr. Vision. First Edition, San Francisco, W.H. Freeman and Company, 1982

[4] 李盘林，卫作人，姜克隽．第六代计算机信息处理基础．大连：大连理工大学出版社，1991

[5] 张钹，张铃．问题求解理论及应用．北京 清华大学出版社，1990

[6] 张系国．图像信息系统设计原理．北京 科学出版社，1990

[7] 吴健康，肖锦玉．计算机视觉基本理论和方法．合肥：中国科学技术大学出版社，1993

[8] L. L. F. Janssen, M. Molenaar. Terrain objects, their dynamics and their monitoring by the integration of GIS and remote sensing. IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(3)

[9] 关泽群，李德仁．导致整体联想激活的一种局部图像组合方式．测绘学报，1998, 27(3):238～245

[10] 史忠植．高级人工智能．北京 科学出版社，1998

[11] T. Kohonen. Self－organization and associative memory. Third Edition, Berlin: Springer－Verlag, 1989

第 4 章　空间数据挖掘与知识发现

20 世纪 90 年代以来，新的探测器和成像技术为遥感获取适当比例尺的空间信息进一步创造了条件，同时也使数据管理问题变得更加复杂，因而越来越依赖于地理信息系统(GIS)技术。这个过程促进了人们积极地探讨遥感与 GIS 的一体化 增强 GIS 获取、存贮、分析和显示图像数据的能力 寻找有效途径使 GIS 把各种来源的空间数据集成为一种公共操作。

可是,一个重要的事实多年来一直未受重视,即 GIS不仅是一个管理空间数据的系统，还包括信息量十分庞大的数据库。这些数据库中的数据涉及环境、资源、土地、地形、军事、农业、城市等多方面信息，它们是自然、社会和经济现象或实体的客观反映，显然其中隐含着关于地物及其相互关系的知识,例如地物的位置、形状、属性、状态以及空间分布、空间关联、空间聚类和空间演变等方面的知识。仅其中空间环境诸要素之间存在着的互相制约、互相依赖的紧密关系，就对遥感图像理解有着至关重要的作用。但由于目前对空间知识的认识主要还停留在直观理解阶段,并没有令人信服的理论,因而空间知识怎样从 GIS 数据库中被自动发现，怎样作为依据被应用于遥感图像理解过程还存在许多值得探讨的问题。

从 GIS 数据库中发现空间关系及其它知识，是从数据库中发现知识(KDD)研究的一个重要方向，不仅对正处于萌芽状态的智能 GIS 系统很重要，而且对遥感与 GIS 的一体化也很重要。因为遥感与 GIS 的一体化迫切需要对遥感图像的理解，即要求实现遥感图像解译的自动化，但由于同物异谱和同谱异物的存在，使得单纯依靠光谱值进行统计分类的方法难以实现全自动化，而依靠人工智能中的专家系统来进行遥感图像解译又苦于无法建立专家知识库。这里提出的 KDD 技术恰好能为图像理解过程提供丰富的知识，并有助于建立知识库。因而可以预见,具备 KDD 功能的 GIS 系统,其能力和应用效益都会超过目前的 GIS 系统。

围绕着从 GIS数据库中发现知识的问题，本章提出了空间知识发现与数据挖掘的框架，包括空间数据挖掘和知识发现的定义与描述、从空间数据库可发现的知识类型、知识发现与数据挖掘方法、空间知识发现系统的结构及开发方法等[1]。

作为空间知识发现与数据挖掘的具体方法，本章的第二部分介绍了从空间数据库发现聚类；探讨了如何利用数学形态学，从空间数据库中直接发现一些有意义的聚类结构，而不像归纳学习等方法需要背景知识[2]。

本章的第三部分就数据挖掘的的数学工具——Rough 集进行了讨论，并将其引入 GIS 领域,归纳整理出了 Rough 集理论用于 GIS 中属性分析和知识发现的一些方法[3]。

4.1 空间数据挖掘与知识发现的框架

数据挖掘(Data Mining,简称 DM),或称从数据库中发现知识(Know1edge Discovery from Databases,简称 KDD),定义为"从数据库中发现隐含的、先前不知道的、潜在有用的信息"[4,5]。KDD侧重于目的和结果,DM侧重于处理过程和方法,研究者们经常把它们等同起来,或放在一起使用。DM和 KDD 的定义还有一些不同的表达形式,但其本质是一样的,即从数据库中提取隐含的、感兴趣的、高水平的模式。

随着计算机信息处理技术的进步,数据和数据库急剧膨胀,而数据库中隐藏的丰富的知识远远没有得到充分的挖掘和利用,数据库急剧增长与人们对数据库处理和理解的困难之间形成了强烈的反差。DM 和 KDD技术就是在这种状况下应运而生的,也是人工智能、机器学习技术发展的结果,其目的是为数据库应用提供自动化、智能化的手段。尽管这项技术刚刚起步,但已显示了诱人的前景。同时,它有着相当大的难度,是一项极具挑战性的课题。

空间数据库是一类重要的、特殊的数据库,GIS 是空间数据库发展的主体,另外还有图像数据库、CAD 数据库等。GIS 中含有大量的空间和属性数据,有着比一般关系数据库和事务数据库更加丰富和复杂的语义信息,隐藏着丰富的知识。空间数据挖掘和知识发现技术,一方面可使 GIS查询和分析技术提高到发现知识的新阶段,另一方面从中发现的知识可构成知识库用于建立智能化的 GIS 系统,同时也将促进遥感、GIS 和 GPS 的智能化集成。

4.1.1 空间数据挖掘和知识发现的定义与描述

空间数据挖掘(Spatial Data Mining ,简称 SDM),或称从空间数据库中发现知识(Knowledge Discovery from Spatial Databases) ,是指从空间数据库中提取用户感兴趣的空间模式与特征、空间与非空间数据的普遍关系及其它一些隐含在数据库中的普遍的数据特征[6,11]。

从数据库中发现知识是一个在数据库中进行机器学习的过程。李德毅[8]将此问题抽象为一个五元组$\{T,D,C,L,K\}$,其中 T表示某种学习任务,D表示存储在数据库中的大量数据,C 表示一组有助于发现特定知识的基本概念和背景知识, L 是指用来形成各种发现的语言,K是通过学习发现的知识。Han[6]提出了 KDD 的三要素 与任务相关的数据、学习要求(包括要学习的知识类型、所需阈值、知识表达方式等)和背景知识(以概念树的形式给出)。上述两种对 KDD问题的描述本质上是一致的,它们同样适用于对空间数据挖掘和知识发现的描述。

知识发现和数据挖掘的目的是把大量的原始的数据转换成有价值的知识,用于描述过去的趋势和预测未来的趋势,它可以看成是决策支持过程。同数据库管理系统检索和查询出的信息相比,KDD 系统挖掘出的知识是隐含、精练和高水平的,数据、信息、知识构成了金字塔结构,如图 4.1.1[5]所示。

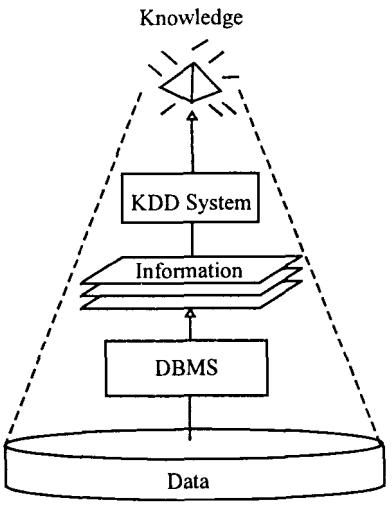


图 4.1.1 数据—信息—知识金字塔

4.1.2 空间数据挖掘的理论框架

研究者们从不同的角度研究 KDD，因而提出了不同的理论框架。有的学者提出用证据理论、Rough 集理论等作为 KDD 的理论框架，李德毅[9]提出了以发现状态空间理论作为 KDD 的总体框架，这里作一基本介绍。

发现状态空间是一个三维立体空间，是发现系统实施多种算法的运作空间。在一个二维的平面基底——知识基上逐步抽象，关系数据库可以抽象地看成一个二维通用大表，纵向为属性（Attributes 或 Fields），横向为元组（Tuples 或 Records）。根据知识发现任务，在原始的数据库经过查询、选择（或抽样）、统计和压缩等数据聚焦处理后，形成宏元组（Macro Tuples），是发现状态空间的基底，也可以认为是初始的知识模板。在发现状态空间进行的多种知识汇集和发现操作分成三个方向：属性方向（Attribute Oriented），即面向属性的操作，是对属性之间关系的认识和发现活动。宏元组方向（Macro Tuples Oriented），即面向宏元组的操作，是对各种宏元组之间一致性和差异性的认识和发现活动。以上两个方向的操作都是对特定知识模板的操作。模板方向（Template Oriented），即面向知识模板的操作，是从微观到宏观的发现知识的操作。由一块知识模板上升到抽象级别更高的另一块模板，是提高知识抽象度的操作，是以归纳为核心的知识发现活动。

针对空间数据的特点，可以在三维发现状态空间的基础上增加一维一尺度（scale）维，形

成空间数据挖掘的四维发现状态空间。在尺度维上，表达了空间数据由细至粗多比例尺或多分辨率的几何变换过程。尺度越小(即比例尺越大),对空间目标表达得越精细、越微观;尺度越大(即比例尺越小),对空间目标表达得越概括、越宏观。例如,在大比例尺数据库中的单个房屋是面状目标，在小比例尺数据库中变为点状目标；在大比例尺数据库线状目标中的细小弯曲在小比例尺数据库中被综合掉。面向尺度的（Scale Oriented)操作,是对空间数据由细到粗的计算、变换、概括、综合过程,地图制图学中的制图综合技术就是典型的面向尺度的操作。

4.1.3 从空间数据库可发现的知识及应用

由于 GIS数据库是空间数据库的主要类型,并且从 GIS 数据库中可发现的知识类型及知识发现方法可以涵盖其它类型的空间数据库，在下文中，我们把 GIS 数据库与空间数据库等同起来,并认为从 GIS数据库中发现知识(简称 KDGD)与 SDM有相同的内涵。

从 GIS 数据库可以发现的主要知识类型有[6,10~12].

(1)普遍的几何知识

它是指某类目标的数量、大小、形态特征等普遍的几何特征。计算和统计空间目标几何特征量的最小值、最大值、均值、方差、众数等,还可统计出特征量的直方图。在足够多的样本的情况下，直方图数据可转换为先验概率使用。在此基础上，可根据背景知识归纳出高水平的普遍几何知识。

(2)空间分布规律

它是指目标在地理空间的分布规律，分成在垂直向、水平向以及垂直向和水平向的联合分布规律。垂直向分布即地物沿高程带的分布，如植被沿高程带分布规律、植被沿坡度坡向分布规律等；水平向分布指地物在平面区域的分布规律，如不同区域农作物的差异、公用设施的城乡差异等；垂直向和水平向的联合分布即不同的区域中地物沿高程分布规律。

(3)空间关联规则

它是指空间目标间相邻、相连、共生、包含等空间关联规则。例如,村落与道路相连,道路与河流的交叉处是桥梁等。

(4)空间聚类规则

空间聚类规则，或空间分类规则，是指特征相近的空间目标聚类成上一级类的规则，可用于 GIS 的空间概括和综合。例如，将距离很近的散布的居民点聚类成居民区。

(5)空间特征规则

它是指某类或几类空间目标的几何和属性的普遍特征，即对共性的描述。普遍的几何知识属于空间特征规则的一类，由于它在遥感影像解译中的作用十分重要，所以分离出来单独作为一类知识。

(6)空间区分规则

它指两类或多类目标间几何的或属性的不同特征，即可以区分不同类目标的特征。

(7)空间演变规则

若 GIS 数据库是时空数据库或 GIS 数据库中存有同一地区多个时间数据的快照（Snapshot)，则可以发现空间演变规则。空间演变规则是指空间目标依时间的变化规则，即哪些地区易变，哪些地区不易变，哪些目标易变及怎么变，哪些目标固定不变。

(8)面向对象的知识

它是指某类复杂对象的子类构成及其普遍特征的知识。

可用的知识表达方法有 特征表、谓词逻辑、产生式规则、语义网络、面向对象的表达方法、可视化表达方法等，应根据不同的应用选用不同的表达方法。各种表达方法之间也可以相互转换。

从 GIS数据库发现的知识，可有下面两大方面的应用：①GIS智能化分析。SDM 获取的知识同现有 GIS 分析工具获取的信息相比更加概括、精练，并可发现现有 GIS分析工具无法获取的隐含的模式和规律，因此 SDM本身就是 GIS 智能化分析工具,也是构成 GIS 专家系统和决策支持系统的重要工具。②在遥感影像解译中的应用。用于遥感影像解译中的约束、辅助、引导,解决同谱异物、同物异谱问题,减少分类识别的疑义度,提高解译的可靠性、精度和速度。SDM 是建立遥感影像理解专家系统知识获取的重要技术手段和工具，遥感影像解译的结果又可更新 GIS 数据库。因此,SDM 技术将会促进遥感与 GIS 的智能化集成。

4.1.4 空间数据挖掘与知识发现方法

DM 和 KDD 是多学科和多种技术交叉综合的新领域,它综合了机器学习、数据库、专家系统、模式识别、统计、管理信息系统、基于知识的系统、可视化等领域的有关技术,因而数据挖掘与知识发现方法是丰富多彩的。针对空间数据库的特点，存在下列可采用的空间数据挖掘与知识发现方法[6,10~12]：

(1)统计方法

统计方法一直是分析空间数据的常用方法。有着较强的理论基础，拥有大量的算法，可有效地处理数字型数据。这类方法有时需要数据满足统计不相关假设，但很多情况下这种假设在空间数据库中难以满足。另外，统计方法难以处理字符型数据。应用统计方法需要有领域知识和统计知识，一般由具有统计经验的领域专家来完成。

(2)归纳方法

即对数据进行概括和综合，归纳出高层次的模式或特征。归纳法一般需要背景知识，常以概念树的形式给出。在 GIS 数据库中，可有属性概念树和空间关系概念树两类。背景知识由用户提供，在有些情况下也可以作为知识发现任务的一部分自动获取。

(3)聚类方法

聚类分析方法按一定的距离或相似性测度将数据分成一系列相互区分的组，它与归纳法不同之处在于不需要背景知识而直接发现一些有意义的结构与模式。经典统计学中的聚类分

析方法对属性数据库中的大数据量存在速度慢、效率低的问题，对图形数据库应发展空间聚类方法。

(4)空间分析方法

空间分析方法可采用拓扑结构分析、空间缓冲区及距离分析、叠置分析等方法，旨在发现目标在空间上的相连、相邻和共生等关联关系。

(5)探测性的数据分析

探测性的数据分析（简称 EDA)，采用动态统计图形和动态链接窗口技术将数据及其统计特征显示出来，可发现数据中非直观的数据特征及异常数据[16,17]。EDA 与空间分析(Spatial Analysis 相结合，构成探测性的空间分析（简称 ESA)。EDA 和 ESA 技术在知识发现中用于选取感兴趣的数据子集，即数据聚焦(Data Focusing)，并可初步发现隐含在数据中的某些特征和规律。

(6)Rough 集方法

Rough集理论(Rough Sets Theory)是波兰华沙大学 Z. Pawlak教授在 1982 年提出的一种智能数据决策分析工具[13]，被广泛研究并应用于不精确、不确定、不完全信息的分析和知识获取[14]。

Rough集理论为 GIS 的属性分析和知识发现开辟了一条新途径，可用于 GIS数据库属性表的一致性分析、属性的重要性、属性依赖、属性表简化、最小决策和分类算法生成等[12]。

Rough集方法与其它知识发现方法相结合，可以在 GIS 数据库中数据不确定情况下获取多种知识。例如，在经过统计和归纳从原始数据得到普遍化数据的基础上，Rough 集用于普遍化数据的进一步简化和最小决策算法生成，使得在保持普遍化数据内涵的前提下最大限度地精练知识。

(7)云理论

这是由李德毅博士提出的用于处理不确定性的一种新理论，由云模型（cloud model)、不确定性推理(reasoning under uncertainty)和云变换(cloud transform ）三大支柱构成。云理论将模糊性和随机性结合起来，解决了作为模糊集理论基石的隶属函数概念的固有缺陷，为 KDD 中定量与定性相结合的处理方法奠定了基础[15]。

(8)图像分析和模式识别

空间数据库中含有大量的图形图像数据，一些行之有效的图像分析和模式识别方法可直接用于发现知识，或作为其它知识发现方法的预处理手段。

另外，决策树(Decision Tree)、神经网络(Neural Network)、证据理论(Evidence Theory)、模糊集(Fuzzy, Sets)理论、遗传算法(Genetic Algorithms ）等也可用于空间数据挖掘和知识发现。

当然，这些方法不是孤立应用的，为了发现某类知识，常常要综合应用这些方法。知识发现方法还要与常规的数据库技术充分结合。例如，在时空数据库中挖掘空间演变规则时，可利用空间数据库的叠置分析等方法首先提取变化了的数据，再综合统计方法和归纳方法得到空

间演变规则。又如，我们把面向属性的归纳方法（Attribute Oriented Induction）与探测性的数据分析和 Rough 集方法结合起来，构成探测性的归纳学习方法(Exploratory Inductive Learning)，可用于发现空间特征规则、空间区分规则、普遍的几何知识、空间演变规则、空间分布规律等多种知识。

4.1.5 空间知识发现系统的结构及开发方法

借鉴有关专家提出的 KDD 系统的结构[4,6,7]，文献[1]提出一种空间知识发现系统的结构(见图 4.1.2)。图中单线箭头方向为控制流，实心箭头方向为信息流。从图中可以看出，知识发现同空间数据库管理是密切联系的。用户发出知识发现命令，知识发现模块触发空间数据库管理模块从空间数据库中获取感兴趣的数据，或称为与任务相关的数据；知识发现模块根据知识发现要求和领域知识从与任务相关的数据中发现知识；发现的知识提供给用户应用或加入到领域知识库中，用于新的知识发现过程。一般说来，知识发现要交互地反复进行才能得到最终满意的结果，所以，在启动知识发现模块之前，用户往往直接通过空间数据库管理模块交互地选取感兴趣的数据，用户看到可视化的查询和检索结果后，逐步细化感兴趣的数据，然后再开始知识发现过程。

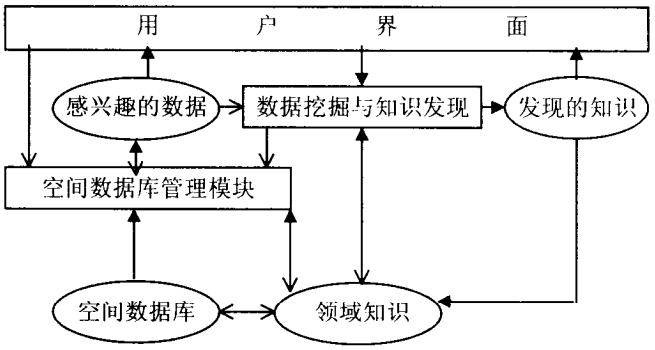


图 4.1.2 空间知识发现系统的结构

在开发知识发现系统时，有两个重要的问题需要考虑和作出选择：(1) 自发地发现还是根据用户的命令发现。自发地发现会得到大量不感兴趣的知识，而且效率很低，根据用户命令执行则发现的效率高、速度快，结果符合要求。一般应采用交互的方式，对于专用的知识发现系统可采用自发的方式。(2)KDD 系统如何管理数据库，即 KDD 系统本身具有 DBMS 功能还是与外部 DBMS 系统相连。KDD 系统本身具有 DBMS 的功能，系统整体运行效率高，缺点是软件开发工作量大，软件不易更新。KDD 系统与外部 DBMS 系统结合使用，整体效率稍低，但开发工作量小，通用性好，易于及时吸收最新的数据库新技术成果。由于 GIS 系统本身比较复杂，在开发 SDM 工具时应在 GIS 系统之上进行二次开发。

根据对上述两个问题的考虑，提出下列开发空间知识发现系统的建议：(1)用通用 GIS 的二次开发工具及 Visual Basic 或 visual C++ 在 Windows95/98 环境下开发，采用 ODBC 标准及 OLE、DLL 编程技术提高软件的通用性和开放性，支持常用的标准数据格式。(2)SDM 系统可单独使用，也可作为插件式(Plug In)软件附着在 GIS 系统之上使用，或者 SDM 系统本身就是未来智能化 GIS 系统的有机组成部分。(3)知识发现算法可自动地执行，又要有较强的人机交互能力。(4)用户可定义感兴趣的数据子集，提供背景知识，给定阈值，选择知识表达方式等。若不提供所需参数，则自动地按缺省参数执行。

4.1.6 空间数据挖掘发展方向探讨

在 SDM 的理论和方法方面，重要的研究方向有[11,12]：背景知识概念树的自动生成；不确定性情况下的数据挖掘；递增式数据挖掘；栅格矢量一体化数据挖掘；多分辨率及多层次数据挖掘；并行数据挖掘；新算法和高效率算法的研究；空间数据挖掘查询语言；规则的可视化表达等等。在 SDM 系统的实现方面，要研究多算法的集成、SDM 系统中的人机交互技术和可视化技术、SDM 系统与地理信息系统、遥感解译专家系统、空间决策支持系统的集成等。

4.2 从空间数据库发现聚类

聚类分析是统计学的一个分支，聚类算法能从空间数据库中直接发现一些有意义的聚类结构，而不像归纳学习等方法需要背景知识，因而作为一种重要的数据挖掘方法应用于空间数据库中。本节在分析已有聚类算法的基础上，提出了一种基于数学形态学的聚类算法。该算法能处理任意形状的聚类，采用启发式方法自动确定最优聚类数，适用于点状、线状和面状目标。

4.2.1 已有聚类算法的分析

已有的聚类算法多数是为模式识别而设计的，将目标用其特征来表示，一个目标表达为多维特征空间的一个点，在特征空间中聚类。空间数据库中的聚类是对目标的图形直接聚类，空间目标有点状、线状、面状等多种类型，有时聚类形状复杂，同时数据量庞大，这就使空间数据挖掘对聚类算法提出了更高的要求：能处理任意形状的聚类；适用于点状、线状、面状等多种目标类型；处理大型空间数据库时效率较高；算法需要的参数能自动确定或用户容易确定。下面对有代表性的算法根据上述要求作一简单分析和评述。

聚类算法主要分为两类：分割算法（partitioning algorithm）和层次算法（*hierarchical* algorithm)。分割算法将 n 个目标划分到 k 个聚类中去，k 为输入的参数。首先选择 k 个代表点，其余目标根据到各类代表点的距离划分到 k 个聚类中；然后用每个类的重心(k-mean 算

法)或离重心最近的点(k-medoid 算法)代表这个聚类,将目标重新分割 这一过程迭代进行,直到收敛。分割算法适用于聚类为凸形状、各类相距较远且直径相差不悬殊的情况，否则就可能产生错误的分割[18]。Ng和 Han[19]提出了一个称为 CLARANS 的改进的 k-medoid 算法,用随机搜索的方法提高了聚类的效率，从而适用于大型空间数据库中的聚类，然而仍然具有分割算法的上述缺陷。Ester 等提出用基于 R^*-tree 的数据聚焦方法进一步提高 CLARANS 算法的效率[20]。

层次算法将数据集分解成树状图，即循环地将数据集分裂成子集，直到每一个子集只包含一个目标。树状图可采用分裂或合并的方法构建。层次算法不像分割算法那样需要聚类数 k 这个参数，但需要定义停止条件。层次算法的难点在于确定最优停止条件，同时也难以处理聚类形状复杂的情况。

Ester[18]等提出了一种基于密度的聚类算法，称为 DBSCAN。其基本思想是认为在一类中的任一点一定半径的范围内有足够的相邻点，即邻域密度超过某一阈值。该算法需要 2 个参数 邻域半径 Eps和邻域内点数阈值 MinPts 参数 Eps采用启发式方法交互地确定，在二维数据的试验中将 MinPts,设为 4。算法采用 R^*-tree 方法检索相邻点，对全部数据只需搜索一次即可得到最终结果，因而速度很快，同时它能处理任意形状的聚类，根据阈值 MinPts ,还可以去除噪音，是一种较好的空间数据库聚类算法。然而，在实际的空间数据库中，并不总是存在 R^*-tree 索引结构。R^*-tree 的构建是十分耗时的，若将该算法用于没有索引结构的空间数据库中,其效率就会大大降低。

通过上面的分析可知，多数聚类算法不能处理非凸的、复杂的聚类形状，速度较慢，只能处理点状目标，因此当其应用于大型空间数据库时受到限制。DBSCAN 算法也只能处理点状目标,同时要求具有 R^*-tree 索引结构。另外,在 GIS 系统中常见的栅格数据结构，上述算法无法处理。由此，我们提出了下面的基于数学形态学的聚类算法。

4.2.2 基于数学形态学的聚类算法

数学形态学(Mathematical Morphology) 是研究数字影像形态结构特征与快速并行处理方法的理论，它是通过对目标影像的形态变换实现结构分析与特征提取的目的，形态变换是通过选择称为结构元的较小特征影像集合与目标影像相互作用来实现。最基本的形态运算是膨胀和侵蚀,它们在二值图像中的定义如下 设 X 为目标图像,B 为结构元,膨胀 $X \oplus b = \bigcup_{b \in B} X_b$,其中 X_b 表示 X 相对于原点沿向量 b 的平移 ;侵蚀 $X \ominus B = \bigcap_{b \in B} X_{-b}$。根据膨胀和侵蚀运算可以定义多种多样的运算,如开运算 $X \circ B = (X \ominus B) \textcircled{1} B$,闭运算 $X \cdot B = (X \oplus B) \ominus B$,等等[21,22]。

在图 4.2.1空间数据库的模拟例子中，数据库(a)中聚类的直径相差悬殊且彼此间距离较近,数据库(b)和(c)为凹形聚类,数据库(d)为在(c)上加上了噪音，均为比较复杂的情况，用常规的分割算法以及 CLARANS算法均不能得到正确的结果[18]。我们可以容易地看出聚类情

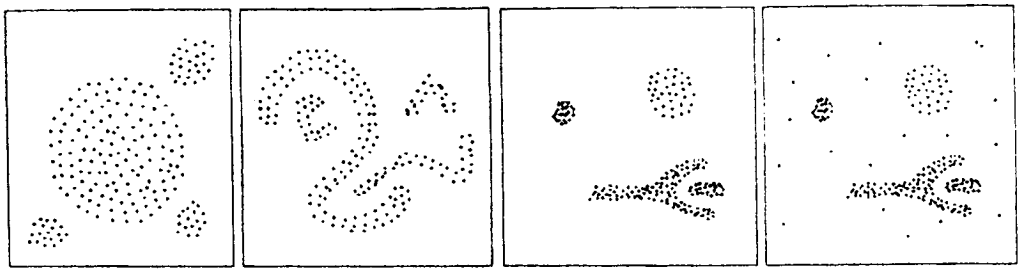


图 4.2.1　空间数据库例子

况，这是由于属于一类的目标在空间分布上比较集中，即任一点到同一类中相邻点的距离大于它到其它类中任意点的距离。需要注意的是，任一点到本类重心的距离未必会小于它到另一类重心的距离，在聚类的大小相差悬殊或聚类形状非凸时就可能出现这种情况，这也就是 k-mean 和 k-medoid 等分割算法缺陷之根源。基于这种认识，文献[2]提出一种基于数学形态学的聚类算法(Mathematical Morphology based Clustering algorithm)MMC,该算法循环地用由小到大的圆形结构元对空间目标进行闭运算连接相邻的目标，连通区即为聚类，开始每个目标为一类,随着结构元由小到大变化,聚类数逐渐减少,到最后用足够大的结构元进行闭运算时,所有的目标连接成一类。每一次闭运算后，用连通区着色方法统计连通区数即聚类数，根据结构元由小到大得到聚类数由多到少的变化规律，提出了一个启发式方法确定最优聚类数。

在参考文献[21]中，作者在理论上研究了数学形态学用于聚类的问题，归纳提出了八种基本运算。其基本思想是根据样本分布的形状来区分不同的样本集，比如区分团状分布与线状分布的样本，这与我们所指的空间数据库聚类的要求并不一致，其所列方法是对理论上可能性的探讨，无法直接应用于空间数据库聚类中。而本文提出的 MMC算法是一个面向实际应用的算法。

数学形态学算法是针对栅格图像的，若空间数据库为栅格型的，可直接应用 MMC 算法，若空间数据库为矢量型的，可将矢量转换成栅格，转换时可采用较大的采样间距，只要能保持目标间邻接的拓扑关系不变即可。由于是在栅格图像中处理，对于点状、线状和面状目标的处理是一样的,一个算法能同时适用于所有的目标类型,这是 MMC算法的优越性之一。

MMC 算法采用一系列由小到大的圆形结构元，在离散空间中用多边形来迫近。图 4.2.2 自左至右依次是半径为 1,2,3,4,5 的圆形结构元,结构元的原点在中心,像元值均为 1。



图 4.2.2　圆形结构元

MMC算法描述如下：

输入 空间数据库中感兴趣的数据 X(背景为 0,目标为 1)。

输出 聚类结果 Y(同一类中值相同,不同类值不同)。

过程 初始化 $i=1$;

(1)建立圆形结构元 B,其半径为 i;

(2)闭运算：$Y_i=X\cdot B_i$;

(3)统计的连通区数即聚类数 n_i,如果 $n_i>1$,则 $i=i+1$,转(1),否则继续(4);

(4)根据 n_i 计算最优聚类数 n_i,得到对应的结构元半径 k;

(5) $Y=X\cdot B_k$;

(6)对 Y 的连通区着色,不同聚类着不同色。

连通区着色方法可采用条件序贯膨胀的形态学方法，或常规的种子蔓延填充方法。由于采用闭运算，按最优聚类数得到的结果为聚类的凹包，可方便地应用于后续的形状分析与识别中。

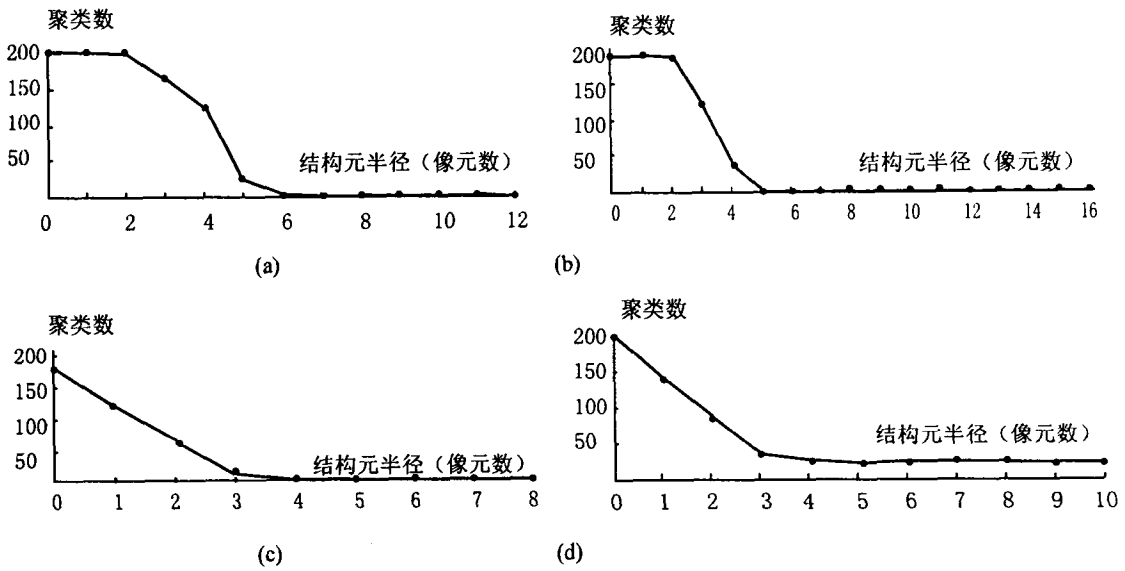


图 4.2.3　聚类状态图

最优聚类数的确定是 MMC算法的关键。在对图 4.2.1 的试验中,我们将聚类数随结构元变化情况绘于图 4.2.3 ,称为聚类状态图,从图中我们观察到与最优聚类数对应的点位于图形中由多到少变化的腰部，其左边变化显著，右边变化平缓或不变。在聚类状态一阶导数图 4.2.4上,最优聚类点在局部极大值右部相邻点,在聚类状态二阶导数图 4.2.5上对应极大值点。根据这一启发式信息，搜索聚类状态二阶导数的极大值就可以得到最优聚类数。值得注

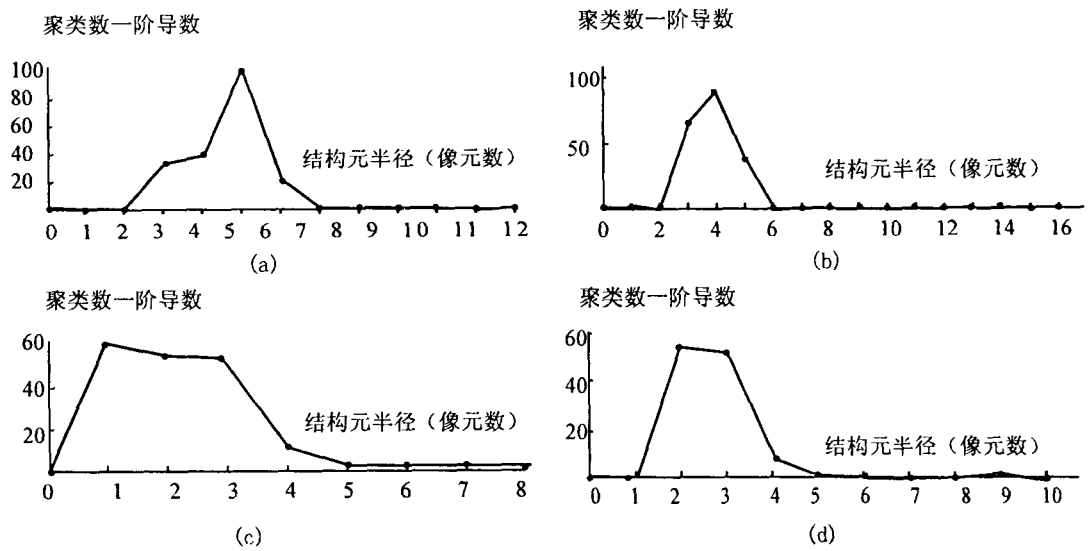


图 4.2.4　聚类状态一阶导数图

意的是,对于数据库 d 中有噪音的情况,MMC算法也能得到正确的结果，可以根据预先设定的聚类点数阈值滤除噪音点。

MMC算法是根据距离来聚类的，其基本假设是任一点到同一类中相邻点的距离大于它到其它类中任意点的距离，即属于一类的目标在空间分布上比较聚集。这一假设在空间数据库中是普遍满足的。至于聚类中不同形态的聚类的区分问题，可以在聚类完成以后根据形态特征加以区分和识别。

上面的算法是针对二维空间的。由于绝大多数空间数据库中的数据是分层以二维形式存贮的，因此算法有广泛的适用性。该算法也可以将其扩展成三维形式，应用于三维空间数据库的聚类中。

4.2.3　MMC算法在矢量型空间数据库中实现的探讨

上述的 MMC 算法主要针对栅格型空间数据库，对于大量的矢量型空间数据的聚类分析，可以将感兴趣的矢量数据转换成栅格形式处理，但这毕竟增加了工作量，这里我们探讨 MMC 算法在矢量型空间数据库中实现的可能性与方法。

缓冲区(buffer)分析是地理信息系统中常用的空间分析方法,它与数学形态学的膨胀与侵蚀运算是一致的，缓冲区的大小对应于圆形结构元的半径，当缓冲区为正时相当于膨胀，缓冲区为负时相当于侵蚀。数学形态学的平移和反射在矢量 GIS 系统中更易实现。这几种基本运算都能在矢量形式下实现,所以,在矢量型 GIS 中实现数学形态学中圆形结构元的算法是完全可行的。其它形状结构元的算法原则上也可以实现，在此不再展开论述。

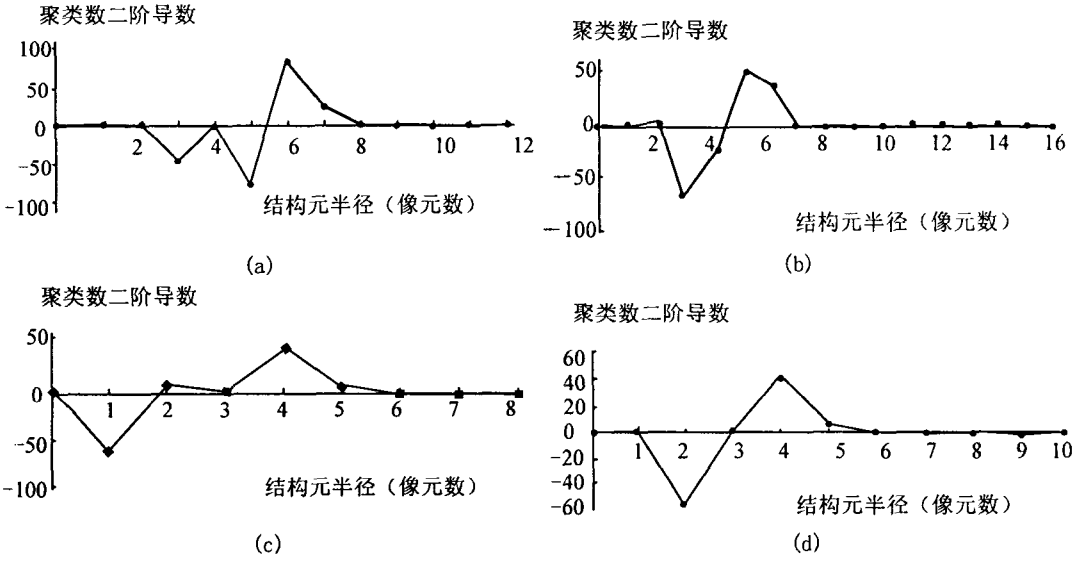


图 4.2.5　聚类状态二阶导数图

设空间数据集为 X,缓冲区半径为 r, $r>0$,buffer(X, r) 为对 X 进行缓冲区操作的结果，另设 B 为半径为 r 的圆形结构元,则 buffer(X, r) 和 buffer(X, $-r$)分别等同于膨胀 $X\oplus B$ 和侵蚀 $X\ominus B$,开 $X\circ B$ 和闭 $X\cdot B$ 分别用 buffer(buffer(X, $-r$), r)和 buffer(buffer(X, r), $-r$)来实现。用由小到大变化的 r 对空间目标进行正负缓冲区操作（即先做正缓冲区紧接着做负缓冲区），统计包含原始目标的多边形数即聚类数。根据聚类数随缓冲区半径由小到大而由多变少的规律，用同样的启发式方法自动确定最优聚类数，用聚类点数阈值去除噪音。不包含原始空间目标的小多边形为空洞，对聚类而言是无效的，聚类的结果为有效的聚类多边形，每个多边形有着不同的标识,这些多边形即为聚类的凹包。同样地,矢量 MMC 算法同时适用于点状、线状和面状目标。

MMC 的矢量算法与栅格算法完全对应，在栅格算法中圆形结构元的半径大小即为迭代次数 i;在矢量算法中可定义初始缓冲区半径 r_1 及半径随迭代次数的递增量 Δr,在第 i 次迭代时缓冲区半径 $r_i=r_1+(i-1)\cdot\Delta r$. Δr 应根据空间数据库的比例尺和精度来确定，它相当于栅格数据的像元大小。Δr 太小则算法迭代次数增加，速度降低;Δr 太大则可能会得不到合适的聚类数。

MMC 的矢量算法可在现今流行的矢量型 GIS 平台上进行二次开发实现,例如用 MapInfo 的 MapBasic 语言，在开发语言中有进行缓冲区操作和判断多边形包含其它目标的命令或语句,可以比较方便地实现 MMC 算法,在其它商用的 GIS 平台上均可通过二次开发实现 MMC 算法。

4.2.4 试验及结论

文献[2]用 Microsoft C 语言在 MS-DOS 下编程，用串行的方法实现 MMC 算法，用图 4.2.1 的数据进行了试验，对于数据库 a,b,c,d, MMC算法自动确定的最优聚类数均为 4类(对于 d用 3,4 或 5 作为聚类点数阈值将噪音滤掉)，对应的闭运算结构元半径分别为 6,5,4,4，聚类结果见图 4.2.6。灰色的连通区即为聚类，用不同浓淡的灰色表示不同的聚类，与人眼的观察完全一致。另外，按照 4.2.3 中的设想，文献[2]用 MapInfo 4.0，对 MMC算法在矢量型 GIS 中的实现方法进行了简单的试验，得到了完全相同的聚类结果，说明设想是正确的，也证明了数学形态学算法可以在矢量系统中实现。

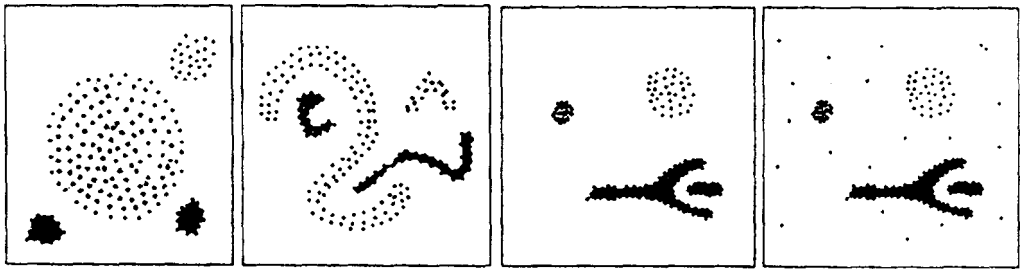


图 4.2.6 聚类结果图

由算法分析和试验结果可知，MMC 算法在理论上是合理的，在实践上是可行的。该算法可以处理任意形状的聚类；用启发式方法自动确定最优聚类结果，在存在噪音的情况下仍能得到最优结果，具有稳健性 适用于点状、线状和面状目标 可以在矢量系统中实现，在空间数据挖掘和知识发现中具有实用价值。同时数学形态学算法本质上是并行的，便于并行高速处理，应用于未来的并行空间数据库时更具有优越性。

由于 MMC 算法通过迭代计算确定最优聚类数，本身比较耗时，同时由于我们是用串行方式实现该算法，当感兴趣的空间数据规模不是很大时效率尚可，而当算法用于大型空间数据库时整体效率还不够高。因此，MMC 的并行算法、能够减少迭代次数的快速算法、在串行条件下 MMC 的快速算法、在实际的大型空间数据库中的应用以及与其它算法的深入比较等，是值得进一步研究的内容。

4.3 Rough集理论及其在GIS属性分析和知识发现中的应用

GIS中数据的精度和不确定性问题是地理信息理论的重要内容之一，前人的研究主要集中在几何信息和定量数据的精度和不确定性问题方面，而对于属性数据，特别是其中的定性数据的研究很少。在现有的GIS中，属性数据只是用于检索和查询，或进行简单的统计，难以进行深入的分析，难以挖掘隐含在其中的模式和规律。

Rough集理论是一种智能决策分析工具[23]，被广泛研究并应用于不精确、不确定、不完全信息的分类分析和知识获取，在医疗诊断、决策分析、机器学习、信息检索、近似推理等领域都获得了成功的应用，成为知识发现的重要工具[13,14]。本节将介绍这一理论，并将其全面引入GIS领域。

4.3.1 Rough集理论中的基本概念

由于研究者的背景和研究角度不同，对Rough集的表示方法和记号也不尽相同。本文以Pawlak教授的方法和记号为主[23,13]，同时借鉴其他专家的表示方法[14]，并整理使其简明易懂。

1) **Rough集的基本概念**

设 U 是非空的论域；R 是一个等价关系；$A=(U,R)$ 称为一个近似空间；U/R 表示 R 中所有等价类的集合，或称 U 的分类；$[X]_R$ 表示 R 中包含 x 的等价类；R 中的等价类称为基本集；基本集的有限并集称为可定义集，或称合成集。

设 X 是 U 的子集，$X\subseteq U$，则 X 可用可定义集的术语在 A 中定义：

A 中包含在 X 中的最大可定义集称为 A 中 X 的下近似，

$$\underline{R}X=\{x\in U\mid [x]_R\subseteq X\}$$

A 中包含 X 的最小可定义集称为 A 中 X 的上近似，

$$\overline{R}X=\{x\in U\mid [x]_R\cap X\neq\emptyset\}$$

下近似和上近似还可以表达为：

$$\underline{R}X=\bigcup\{Y\in U/R\mid Y\subseteq X\}$$

$$\overline{R}X=\bigcup\{Y\in U/R\mid Y\cap X\neq\emptyset\}$$

定义，$\mathrm{BND}(X)=\overline{R}X-\underline{R}X$，称为 X 的边界或边界区；$\mathrm{POS}(X)=\underline{R}X$ 称为 X 的正区域，NEG

$(X)=U-RX$,称为 X 的反区域。

若把 R 看成分类的知识，X 正区域中的目标可以确定地分类为 X 的成员；反区域中的目标可以确定地判断不属于 X ,即属于 X 的补集 $-X$ 边界区中的目标无法确定地判断属于 X 或 $-X$。

X 是 R 可定义的，简称可定义的，当且仅当 $RX=RX;X$ 对于 R 是粗略的,当且仅当 $RX\neq RX$。

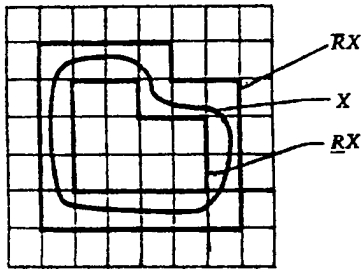


图 4.3.1 Rough集基本概念图示

一个用下近似和上近似定义的子集称为 Rough 集(粗略集)。图 4.3.1 形象地说明了粗略集的基本概念。图中，曲线所包含部分为集合 X ,由矩形单元构成二维近似空间，其中每个单元均为基本集,X 的下近似和上近似如图 4.3.1 所示。

2) 不精确性的数字表征

集合的不确定性来自于边界区的存在，边界区域越大，集的精度越低。定义精度测度为：

$$\alpha_R(X)=\mathrm{card}R\ X/\mathrm{card}R\ X$$

其中 card为集的基数。显然,$0\leq\alpha_R(X)\leq1;\alpha_R(X)=1$ 表示不存在边界区域。另外，定义粗略度 $\rho_R(X)=1-\alpha_R(X)$。

3) 不精确性的拓扑特征化

(1)如果 $RX\neq\varnothing$,且 $RX\neq U$,则称 X 粗略地可定义；

(2)如果 $RX=\varnothing$,且 $RX\neq U$,则称 X 内部不可定义；

(3)如果 $RX\neq\varnothing$,且 $RX=U$,则称 X 外部不可定义；

(4)如果 $RX=\varnothing$,且 $RX=U$,则称 X 完全不可定义。

集合 X 粗略地可定义，表示可以确定 U 中的一些元素是否属于 X 或 $-X;X$ 内部不可定义,表示可以确定 U 中的一些元素是否属于 $-X$,但不能指出 X 中的元素;X 外部不可定义，表示可以确定 X 中的一些元素是否属于 X ,但不能指出 $-X$ 中的元素;X 完全不可定义,表明不能确定 U 中的任何元素是否属于 X 或 $-X$。

4)属性值系统

一般地，研究对象用一系列特征的集合来表达，即用属性和属性值来表达。一个属性值系统(或称信息系统或知识表达系统)是一个三元组 $S=(U,A,V)$,其中：U 是对象的有限集合；A 是属性的有限集合；$V=\bigcup_{a\in A}V_a$,V_a 是属性 $a\in A$ 的定义域。

任一属性子集 $B\subseteq A$ 定义了一个等价关系：

$$\mathrm{IND}(B)=\{(x,y)\in U\times U\mid \forall a\in B, a(x)=a(y)\}$$

IND(B)中所有等价类集合表示为 $U/\mathrm{IND}(B)$。对于任一 $X\subseteq U, B\subseteq A$,,赋予两个集合：

$$BX=\bigcup\{Y\in U/\mathrm{IND}(B)\mid Y\subseteq X\}$$

$$BX=\bigcup\{Y\in U/\mathrm{IND}(B)\mid Y\cap X\neq\varnothing\}$$

分别称 X 的B-下近似和 B-上近似。$\mathrm{NBD}_B(X)=RX-RX$ 称为 X 的 B-边界。

可以看出，属性值系统中的等价关系以及下近似和上近似的概念是 Rough 集基本概念在属性值系统中的具体化。

4.3.2 适用于 GIS属性分析和知识发现的 Rough 集理论和方法

按照上述定义,GIS 中的属性数据是一种属性值系统。在 GIS中,属性数据一般用关系数据库来管理,属性数据可以表达为表格的形式,表格的行表示对象,列表示属性。显然,Rough 集理论和方法可应用于 GIS 中属性处理和分析，下面整理归纳适用于 GIS 属性分析和知识发现的 Rough 集理论和方法,包括 GIS 数据库属性表的一致性分析、属性的重要性、属性依赖、属性表简化、最小决策和分类算法生成等。其中属性依赖、最小决策算法生成等是从属性表中发现隐含的规律与模式，即从属性库中发现知识。

需要说明的是,在 Rough 集方法中，所有的属性值均看成定性数据，若定量数据要和定性数据综合处理，则需将定量数据转换成定性数据。可行的转换方法是根据定量数据的统计分布自动分段，每一段作为定性数据。若定量数据的值很少，则可直接作为定性数据进行处理。

1) 属性的依赖

设 $S=(U,A,V)$为属性值系统，$A=C\cup D, C$和 D 分别称为条件属性和决策属性，$B\subset C$,定义 D 的B-正区域为：

$$\mathrm{POS}_B(D)=\bigcup\{BX\mid X\in \mathrm{IND}(D)\}$$

正区域 $\mathrm{POS}_B(D)$是 U 中可用 IND(B)中的分类信息分类到 IND(D) 的等价类中的对象的集合。

定义属性集 D 与 B 的依赖程度为：

$$k=\gamma_B(D)=\mathrm{card}\mathrm{POS}_B(D)/\mathrm{card}U$$

式中，card表示集的基数。

显然，$0\leq k\leq 1, B\Rightarrow_k D$,表示 D 在 k 程度上依赖于 B。若 $k=1, D$ 完全依赖于 B;若 $0<k<1, D$ 粗略地(部分地)依赖于 B 如果 $k=0, D$ 完全不依赖于 B。若 $B\Rightarrow_k D$,则可以写作 $B\Rightarrow D$。可以证明，$B\Rightarrow D$ 当且仅当 :$\mathrm{IND}(B)\subseteq\mathrm{IND}(D)$。此时，$\mathrm{POS}_B(D)=U$。

2) 属性的简化与属性的核

设 B 为属性集,属性 $a\in B$,如果 $\mathrm{IND}(B-\{a\})=\mathrm{IND}(B)$,则 a 在 B 中可省去,否则，a 在 B中是必需的。如果所有的 $a\in B$ 在 B 中都是必需的,则称 B 是无关的或正交的,否则 B

是相关的。

子集 $B' \subseteq B$ 是 B 的一个简化，当且仅当 B' 是无关的且 $\mathrm{IND}(B) = \mathrm{IND}(B')$。属性集的简化是属性集的一个子集，它对论域中对象的分类能力与原始的属性集相同。一般而言，属性集可能有多个简化。可以证明，若 B' 是 B 的简化，则 $B \Rightarrow B - B'$。

B 中所有必需的属性的集合称为 B 的核，表示为 $\mathrm{CORE}(B)$。属性集的核是属性集的本质部分，从中去掉任何一个属性都将影响属性集对论域中对象的区分能力。核是所有简化的交集，即 $\mathrm{CORE}(B) = \bigcap \mathrm{RED}(B)$，其中 $\mathrm{RED}(B)$ 是 B 的所有简化构成的族。

3 属性的相对简化与相对核

用正区域的概念，还可以定义属性的相对简化与相对核。

设 $a \in C$，若 $\mathrm{POS}_C(D) = \mathrm{POS}_{C-\{a\}}(D)$，则称 a 在 C 中相对于 D 是可省去的，或称为 D 一可省去的，否则称 a 在 C 中相对于 D 是必需的，或称 D - 必需的。如果所有的 $a \in C$ 在 C 中相对于 D 是必需的，则称 C 相对于 D 是无关的，否则 C 相对于 D 是相关的。

C 中所有相对于 D 必需的属性的集合称为属性集 C 相对于 D 的核，或称 C 的 D - 核，表示为：

$$\mathrm{CORE}_D(C) = \{a \in C \mid \mathrm{POS}_C(D) \neq \mathrm{POS}_{C-\{a\}}(D)\}$$

设 $B \subset C$，若 B 相对于 D 无关且 $\mathrm{POS}_C(D) = \mathrm{POS}_B(D)$，则称：$B$ 是 C 的相对于 D 的简化，或称 B 是 C 的相对于 D-简化，同样，相对核是所有相对简化的交集，即

$$\mathrm{CORE}_D(C) = \bigcap \mathrm{RED}_D(C)$$

其中 $\mathrm{RED}_D(C)$ 是 C 的所有 D-简化构成的族。

4 属性的重要性

针对某一具体问题，各属性的重要性是不同的。为了检查某个属性的重要性，从表中去掉这个属性后来看分类是否变化。如果分类发生了显著变化，则这个属性的重要性是大的，否则是小的。

属性集 $B' \subset B$ 相对于由属性 C 引起的分类的重要性测度可表示为：

$$\gamma_B(C) - \gamma_{B-B'}(C)$$

测度值越大，B' 的重要性越高。

5) 决策表分析与简化

(1) 决策表的定义及一些特性

具有明确的条件属性和决策属性的属性值系统称为决策表。$A = C \cup D$，C 和 D 分别称为条件属性和决策属性。$\mathrm{IND}(C)$ 和 $\mathrm{IND}(D)$ 中的等价类分别称为条件类和决策类。决策表表示为 $T = (U, A, C, D)$。

对于每一个 $x \in U$，赋予一个函数 $d_x: A \to V$ 对于每一个 $a \in C \cup D$，函数 $d_x(a) = a(x)$，函数 d_x 称为决策规划。

若 d_x 是一个决策规划，d_x 对 C 的限制表示为 $d_x|C$，d_x 对 D 的限制表示为 $d_x|D$，分别称

为 d_x 的条件和决策，若任一 $y \neq x, d_x | C = d_y | C$ 蕴含 $d_x | D = d_y | D$，则这一决策规则是一致的，否则是不一致的。如果一个决策表中的所有决策规则都是一致的，则决策表是一致的，否则是不一致的。

定理：决策表 $T=(U,A,C,D)$ 是一致的，当且仅当 $C \Rightarrow D$。

该定理为检查决策表的一致性提供了一个简便实用的方法。计算条件属性和决策属性的依赖程度可判定决策表的一致性，若依赖程度为 1，则决策表是一致的，否则是不一致的。

若决策表不一致。则可以惟一地分解成两个子表，一个是完全一致，一个是完全不一致。

(2)决策表的简化与最小决策法的生成

决策表简化的目的是用最少量的条件辨别每一个决策类，即将决策表中包含的决策知识精练。决策表的简化方法由 3 步构成：①条件属性的简化，即从决策表中删去一些列；②删去重复的行；③删去多余的属性值。前两步是对决策表进行整体简化，第三步是对每一条决策规则（每一行）进行进一步简化，使得在一行中去掉某些属性值后仍能划分到原来的决策类中。与整个决策表的属性的简化和核的概念类似，也有决策规则的条件属性的简化和核的概念。

决策表的简化一般是对一致性决策表而言，若决策表不一致，则将其分解为两个决策表，仅对其中的一致决策表进行简化。

简化的决策表可以转换为产生式规则或谓词逻辑的形式来表达决策知识，或者简化的决策表本身就可以作为决策知识的表达形式。由简化的决策表产生的所有规则或逻辑表达式的组合称为决策算法。由于属性的简化可能有多个，决策表的简化形式也会有多个，从而决策算法也会有多个，可以从中选择最小的决策算法。决策算法最小的判据可根据具体情况选定，比如，可以选择规则数量少的算法为最小决策算法。

4.3.3 *Rough* 集方法在 *GIS* 属性分析和知识发现中的应用

下面的两个例子说明了 Rough 集方法在 GIS 属性分析和知识发现中的应用。

例 4.3.1 在中国大陆范围内根据经过归纳的位置、地势及公路网密度的关系，来分析属性依赖和属性的重要性。

表 4.3.1 一个属性类的例子

U	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
位置(a)	北部	北偏东	东北	东北	东南	东南	南部	南部	西北	西北	西南	中部	中部
地势(b)	中	低	低	中	低	中	低	中	高	中	高	低	中
公路网密度(c)	中	高	高	低	高	高	高	高	低	低	低	高	高

表 4.3.1 中，论域 U 由 13 个对象组成 1,2…13，属性集是 $A=\{a, b, c\}$。对象 3、4 对属性 a 是不可辨别的，对象 9、11 对属性 b 是不可辨别的，……。由属性产生的划分如下：

$$U/\mathrm{IND}\{a\} = \{\{1\},\{2\},\{3,4\},\{5,6\},\{7,8\},\{9,10\},\{11\},\{12,13\}\}$$
$$U/\mathrm{IND}\{b\} = \{\{1,4,6,8,10,13\},\{2,3,5,7,12\},\{9,11\}\}$$
$$U/\mathrm{IND}\{c\} = \{\{1\},\{2,3,5,6,7,8,12,13\},\{4,9,10,11\}\}$$
$$U/\mathrm{IND}\{a,b\} = \{\{1\},\{2\},\{3\},\{4\},\{5\},\{6\},\{7\},\{8\},\{9\},\{10\},\{11\},\{12\},\{13\}\}$$

因此,有:

$$\mathrm{POS}_a(c) = \{1,2,5,6,7,8,9,10,11,12,13\},$$
$$\gamma_a(c) = 11/13$$
$$\mathrm{POS}_b(c) = \{2,3,5,7,9,11,12\},$$
$$\gamma_a(c) = 7/13$$
$$\mathrm{POS}_{\{a,b\}}(c) = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13\},$$
$$\gamma_{\{a,b\}}(c) = 13/13 = 1$$

由于 c 对 $\{a,b\}$ 的依赖程度为 1,因而有依赖关系 $\{a,b\}\Rightarrow\{c\}$。

$$\gamma_{\{a,b\}}(c) - \gamma_{\{a,b\}-\{a\}}(c) = \gamma_{\{a,b\}}(c) - \gamma_{\{b\}}(c) = 6/13$$
$$\gamma_{\{a,b\}}(c) - \gamma_{\{a,b\}-\{b\}}(c) = \gamma_{\{a,b\}}(c) - \gamma_{\{a\}}(c) = 2/13$$

所以,属性 a 比属性 b 重要。

例 4.3.2　本例是对中国主要城市气温数据归纳结果进一步分析得到的区分规则。给定如表 4.3.2 所示的决策表。

下面用 Rough 集方法得到区分规则,把春、夏、秋、冬和年平均气温作为条件属性,把位置作为决策属性,即根据气温特点判断所在位置。表中每一个记录看作一条决策规则,我们的任务是求出最小决策规则。由于决策表中所有规则的条件都不同,所以每一条决策规则都是一致的,因而整个决策表是一致的。分别去掉每一个条件属性,看得到的决策表是否仍然一致,来判断该条件属性相对于决策属性是否可省去。首先,所有记录的'春季''秋季'和'年平均'的属性值是相同的,只留下一个即可,决策表简化为表 4.3.3。在表 4.3.3 中去掉属性'冬季'后,决策表仍然是一致的,因此属性'冬季'可省去,而分别去掉属性'春季'和'夏季'后,决策表将不一致,即相同的条件对应不同的决策,因此'春季'和'夏季'是不可省去的。然后,将各个条件属性的属性值进一步简化,去掉可省去的属性值,用'—'表示,最终简化结果见表 4.3.4。

表 4.3.4 对应的最小决策规则(区分规则)为:

(春季,中低)∧(夏季,高)→(位置,北方);(春季,低)→(位置,东北);(春季,中高)→(位置,南方);(夏季,中高)→(位置,西部)。

可见,Rough 集方法使决策表得到了充分的精练并保留了用于决策的关键内容,决策结果不变,而决策速度会明显加快。

表 4.3.2　中国主要城市气温归纳结果

位置	春季	夏季	秋季	冬季	年平均
北方	中低	高	中低	低	中低
东北	低	高	低	低	低
南方	中高	高	中高	中低	中高
西部	中低	中高	中低	低	中低

表 4.3.3　简化的属性表

位置	春季	夏季	冬季
北方	中低	高	低
东北	低	高	低
南方	中高	高	中低
西部	中低	中高	低

表 4.3.4　最终简化结果

位置	春季	夏季
北方	中低	高
东北	低	—
南方	中高	—
西部	—	中高

Rough集方法除了上述介绍的用于 GIS属性分析和知识发现外,在 GIS和遥感中还有着潜在的、广泛的应用可能。探讨如下：

(1)Rough 集方法与其它知识发现方法相结合,在 GIS 数据库中发现知识。例如我们提出了一种探测性归纳学习方法，该方法集成了面向属性的归纳、探测性的数据分析和空间分析以及 Rough 集方法，在由统计和归纳得到的一般化的数据库的基础上做属性的依赖分析和最小决策算法生成,获得精练的、高水平的知识。

(2)将某一论域的多个专家用 GIS 解决这一领域特定问题的方法表达为决策表的形式，用 Rough 集方法将决策表简化,形成综合的 GIS应用模型,提供综合应用和决策知识,并可分析不同专家观点的差异及其对应用模型的影响。

(3)在 GIS 与遥感的结合中,把从 GIS 数据库中获取的知识用于辅助遥感图像解译，减少遥感解译疑义度，提高解译的准确度和速度。还可以将从 GIS数据库中获取的知识与遥感解译时操作员或专家提供的监督知识结合起来，用 Rough集方法生成最小决策(分类)算法,即语义分类规则，输入到遥感图像解译专家系统中去。

Rough 集理论为 GIS 的属性分析和知识发现开辟了一条新途径，具有重要的理论和实用价值。同时,Rough集理论与方法本身也在不断丰富和发展，很有必要对其进行深入的研究和应用,并与其它方法相结合,提高 GIS分析和遥感图像解译的理论和技术水平。

参考文献

[1] 邸凯昌,李德仁,李德毅．空间数据挖掘和知识发现的框架．武汉测绘科技大学学报，1997,22(1):328～332

[2] 邸凯昌,李德仁,李德毅．从空间数据库发现聚类：一种基于数学形态学的算法．中国图像图形学报，1998,3(3):173～178

[3] 邸凯昌,李德仁,李德毅．Rough 集理论及其在 GIS 属性分析和知识发现中的应用．武汉测绘科技大学学报，1999, 24(1):6～10

[4] W．Frawley, G．Piatesky－Shapiro, C. MaTheus．knowledge Discovery in Databases: An Overview. In: Discovery in Databases, AAAI/MIT Press. 1991

[5] G．Piatesky－Shapiro. An Overview of Knowledge Discovery in Databases Recent Progress and Challenges. In: Rough Sets, Fuzzy Sets and Knowledge Discovery, Springer－Verlag, 1994

[6] J. Han. Data Mining Techniques. ACM－SIGMCD'96 Conf. Tutorial, 1996

[7] C. Matheus, P. K. Chan, G. Piatesky～Shapiro. System for Knowledge Discovery in Databases. IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 1993, 5(6)

[8] 李德毅．归纳学习：从数据库中发现知识．第十届全国数据库学术会议，沈阳，1992

[9] 李德毅．发现状态空间理论．小型微型计算机系统，1994,15(11)

[10] 李德仁,程涛．从 GIS 数据库中发现知识．测绘学报，1995,24(1)

[11] 邸凯昌,李德仁．KDD 技术及其在 GIS 中的应用与扩展．中国 GIS 协会第二届年会,北京，1996

[12] K. Koperski, J. Adhihary, J. Han. Spatial Data Mining: Progress and Challenges. SIGMOD'96 Workshop on Research Issues on Data Mining and knowledge Discovery(DMKD '96), 1996, Canada Montreal

[13] Z. Pawlak. Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data. Kluwer Academic Publishers, 1991

[14] W. Ziarko. Rough Sets, Fuzzy Sets and knowledge Discovery. Springer－Verlag 1994

[15] Li Deyi. Knowledge Representation in KDD Based on Linguistic Atoms. Singapore: 1st Pacific－Asia Conf. on KDD&DM, 1997

[16] J. Haslett j.. SPIDER－An Interactive Statistical Tool for the Analysis of Spatially Distributed Data. Int. J. GIS, 1990, 4(3)

[17] M. Batty, Y. Xie. Modeling Inside GIS Part 1, Model Structures, Exploratory Spatial Data Analysis and Aggregation. Int. J. GIS, 1994, 8(3)

[18] M. Eater et al. A Density – Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. Proc. 2nd Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining, 1996, Portland, USA

[19] R. T. Ng, J. Han. Efficient and Effective Clustering Methods for Spatial Data Mining. Proc. of the 20th VLDB Conf., 1994, Santiago, Chile

[20] M. Ester, et al. A Database Interface for Clustering in Large Spatial Databases. Proc. 1st Int. Conf on Knowledge Discovery and Data Mining, 1995, Montreal, Canada

[21] 唐常青等．数学形态学方法及其应用．北京科学出版社，1990

[22] 陈晓勇．数学形态学与影像分析．北京测绘出版社，1991

[23] Z. Pawlak. Rough Sets. Int. Journal of Computer and Information Sciences, 1982, 11 (5)

第 5 章　全球定位系统与地理信息系统的集成

全球定位系统(Global Positioning System)是一种可供全球享用的空间信息资源。陆地、海洋和空间的广大用户只要持有一种能够接收、跟踪和测量 GPS信号的接收机就可以进行全球性、全天候和高精度的导航和测量[1,2]。利 用 GPS 既可直接获取地理信息也可用于确定各种传感器如 CCD 相机等的位置，从而成为空间信息集成系统中的一个重要组成部分。本章将介绍 GPS 的观测量和数据处理方法、GPS 与 GIS 中的集成以及车载 GPS 道路信息采集系统。

5.1　GPS 的观测量

5.1.1　基本观测量

不同类型的 GPS 信号接收机提供的观测量多少亦不相同。对于测地型接收机，一般可以得到以下两类观测量:伪距和载波相位,有的接收机(如 Trimble4000 系列)还提供多普勒观测量(载波相位变化率)。

1)伪距

伪距观测量按精度可分为精码(P 码或 Y 码)伪距和粗码(C/A)码伪距,其中 P(Y)码码长为 29.3m,C/A 码码长为 293m。

伪距观测量是通过测量卫星信号从发射时刻到接收机接收时刻的时延，然后乘以光速得到的距离观测量。传播时延是由接收机内部码跟踪环路通过比较卫星时钟产生的测距码和接收机复制的结构完全一致的测距码而在相关系数达到最大值时得到的。由于两个测距码是根据卫星时钟和接收机时钟而分别产生的，接收机和卫星时钟又不可避免地存在时钟误差，另外由于电离层、对流层延迟等影响,伪距观测量不等于卫星和接收机之间的几何距离,其关系为:

$$p_k^p = \rho_k^p + (\mathrm{d}t^p - \mathrm{d}t_k) \cdot C + I_k^p + T_k^p + \varepsilon \tag{5.1.1}$$

式中:p_k^p 为卫星 p 到接收机 k 的伪距;

$\mathrm{d}t_k$ 为接收机钟差;

$\mathrm{d}t^p$ 为卫星钟差;

ρ_k^p 为卫星发送信号时刻到接收机接收信号时刻的几何距离;

I_k^p, T_k^p 分别为电离层、对流层延迟；

C为真空中光速。

ρ_k^p 可表示为：

$$\rho_k^p = \sqrt{(x^k - x_p)^2 + (y^k - y_p)^2 + (z^k - z_p)^2} \tag{5.1.2}$$

式中（x^p, y^p, z^p)为信号发送时刻卫星 p 的位置，(x_k, y_k, z_k) 为信号接收时刻接收机 k 的位置。

2 载波相位

载波相位观测量分为 L_1、L_2 两个频率的载波相位（$\lambda_{L_1} = 19.03\text{cm}$，$\lambda_{L_2} = 24.2\text{cm}$）。载波相位测量的精度可达毫米级至亚毫米级，因而在高精度导航定位中应用十分广泛。

载波相位观测量是接收机测量得到的卫星信号载波与测量时刻接收机产生的本振载波相位的差值。由于相位测量只能测量不足一周的小数部分。历元间整周部分通过多普勒积分得到。而历元 1 的整周部分未知，因而载波相位测量只相应于卫星和接收机间的部分距离观测量。

设在 GPS 标准时间为 τ^s 卫星钟读数为 t^s 的瞬间，卫星发送的载波相位为 $\varphi^p(t^s)$，该信号在 GPS 标准时间 τ_r 到达接收机，设在该时刻接收机钟读数为 t_r，接收机产生的基准信号相位为 $\varphi_k(t_r)$，则载波相位为

$$\varphi_k^p = \varphi^p(t^s) - \varphi_k(t_r) + N_k^p + \varepsilon_\varphi \tag{5.1.3}$$

式中：N_k^p 为整周模糊度。

该式可写为：

$$\lambda\varphi_k^p = \rho_k^p + C \cdot (\mathrm{d}t^p - \mathrm{d}t_k) - I_k^p + T_k^p + \lambda N_k^p + \varepsilon_\varphi \tag{5.1.4}$$

式中：λ 为载波波长。

比较（5.1.1)与(5.1.4）可知，在载波相位观测值中除增加整周模糊度项且电离层延迟与伪距观测方程大小相等，符号相反外，其余部分与伪距观测方程相同。

5.1.2 观测量的线性组合

在 GPS导航定位中存在大量的误差源，如卫星钟差、接收机钟差、对流层延迟、电离层延迟、卫星轨道误差等，特别是 SA 政策，人为地降低了 GPS单机导航的精度。通过对观测量进行线性组合，即对观测量在卫星、测站、历元间求差可以大大地消除或削弱各种系统误差从而提高导航定位的精度。常用的线性组合有单差、双差和三差。

单差是指对同一卫星在不同测站的观测值间求差。通过单差可消除卫星钟差的影响。电离层、对流层延迟在方程中以站间差值的形式出现，大大削弱了电离层和对流层延迟的影响。双差是指对单差观测值进一步在卫星间求差，通过双差可消除单差中的接收机钟差项，电离层、对流层延迟以单差之差的形式出现，进一步削弱了电离层对流层延迟的影响。三差是指对

双差观测值进一步在历元间求差，通过三差可消除载波相位模糊度，但由于多次差分后观测值为小量，定位精度较低，因而三差观测量一般用于在定位解算之初求解初始值和进行初步的周跳检测。

双差观测量是 GPS定位数据处理中最常用的观测量，下面给出其观测方程：

(1)伪距双差

$$\nabla\Delta P_{ij}^{pq} = \nabla\Delta\rho_{ij}^{pq} + \nabla\Delta T_{ij}^{pq} + \nabla\Delta I_{ij}^{pq} + \nabla\Delta\varepsilon \tag{5.1.5}$$

式中：$\nabla\Delta$ 为双差算子。i,j 分别为基准站和流动站，p 为参考卫星，q 为另一卫星。

(2)载波相位双差

$$\lambda\nabla\Delta\varphi_{ij}^{pq} = \nabla\Delta\rho_{ij}^{pq} + \nabla\Delta T_{ij}^{pq} - \nabla\Delta I_{ij}^{pq} + \nabla\Delta N_{ij}^{pq} + \nabla\Delta\varepsilon_{\varphi} \tag{5.1.6}$$

式中：$\nabla\Delta$ 为双差算子。i,j 分别为基准站和流动站，p 为参考卫星，q 为另一卫星。

(3)观测量的线性化

方程(5.1.5)、(5.1.6) 是非线性方程，移动接收天线的三维位置(x_j,y_j,z_j)隐含在站星双差距离 $\nabla\Delta\rho_{ij}^{pq}$ 中。分别将方程(5.1.5)、(5.1.6) 在近似移动接收天线位置(x_j^*,y_j^*,z_j^*)处线性化，可以得到线性化的伪距、载波相位双差观测方程。

线性化伪距双差：

$$\nabla\Delta P_{ij}^{pq} = \nabla\Delta P_{ij}^{pq\,*} + \frac{\partial P_{ij}^{pq}}{\partial x_j}\mathrm{d}x_j + \frac{\partial P_{ij}^{pq}}{\partial y_j}\mathrm{d}y_j + \frac{\partial P_{ij}^{pq}}{\partial z_j}\mathrm{d}z_j + \nabla\Delta\varepsilon \tag{5.1.7}$$

线性化载波相位双差：

$$\nabla\Delta\varphi_{ij}^{pq} = \nabla\Delta\varphi_{ij}^{pq\,*} + \frac{\partial\varphi_{ij}^{pq}}{\partial x_j}\mathrm{d}x_j + \frac{\partial\varphi_{ij}^{pq}}{\partial y_j}\mathrm{d}y_j + \frac{\partial\varphi_{ij}^{pq}}{\partial z_j}\mathrm{d}z_j + \nabla\Delta\varepsilon_{\varphi} \tag{5.1.8}$$

式中：

$$\nabla\Delta P_{ij}^{pq\,*} = (\rho_j^p - \rho_j^{p\,*} - \rho_i^q + \rho_j^{q\,*}) + \nabla\Delta T_{ij}^{pq} + \nabla\Delta I_{ij}^{pq} \tag{5.1.9}$$

$$\nabla\Delta\varphi_{ij}^{pq\,*} = \frac{f}{C}(\rho_i^p - \rho_j^{p\,*} - \rho_i^q + \rho_j^{q\,*}) + \nabla\Delta T_{ij}^{pq} - \nabla\Delta I_{ij}^{pq} \tag{5.1.10}$$

$$\rho_j^{p\,*} = \sqrt{(x^p - x_j^*)^2 + (y^p - y_j^*)^2 + (z^p - z_j^*)^2} \tag{5.1.11}$$

$$\rho_j^{q\,*} = \sqrt{(x^q - x_j^*)^2 + (y^q - y_j^*)^2 + (z^q - z_j^*)^2} \tag{5.1.12}$$

$$\frac{\partial P_{ij}^{pq}}{\partial x_j} = \frac{x^p - x_j^*}{\rho_j^{p\,*}} - \frac{x^q - x_j^*}{\rho_j^{q\,*}} \tag{5.1.13}$$

$$\frac{\partial P_{ij}^{pq}}{\partial y_j} = \frac{y^p - y_j^*}{\rho_j^{p\,*}} - \frac{y^q - y_j^*}{\rho_j^{q\,*}} \tag{5.1.14}$$

$$\frac{\partial P_{ij}^{pq}}{\partial z_j} = \frac{z^p - z_j^*}{\rho_j^{p\,*}} - \frac{z^q - z_j^*}{\rho_j^{q\,*}} \tag{5.1.15}$$

$$\frac{\partial \varphi_{ij}^{kq}}{\partial x_j} = \frac{f}{C}\frac{\partial P_{ij}^{kq}}{\partial x_j};\quad \frac{\partial \varphi_{ij}^{kq}}{\partial y_j} = \frac{f}{C}\frac{\partial P_{ij}^{kq}}{\partial y_j};\quad \frac{\partial \varphi_{ij}^{kq}}{\partial z_j} = \frac{f}{C}\frac{\partial P_{ij}^{kq}}{\partial z_j}; \tag{5.1.16}$$

$$\mathrm{d}x_j = x_j - x_j^*;\quad \mathrm{d}y_j = y_j - y_j^*;\quad \mathrm{d}z_j = z_j - z_j^* \tag{5.1.17}$$

5.1.3 伪距与载波相位观测量的组合

伪距与载波相位观测量的组合通常也称为相位平滑伪距。一般而言，载波相位测量的精度比伪距测量精度高 2～3个数量级。由(5.1.1)与(5.1.4)可知，在载波相位观测值中除增加整周模糊度项且电离层延迟与伪距观测方程大小相等、符号相反外，其余部分与伪距观测方程相同。当载波相位观测值与伪距观测值同时使用时，载波相位的量测误差几乎可以忽略不计。通过在不同历元间的载波相位求差可以把不同历元的伪距观测精确地联系起来，从而实现单点伪距的“重复观测”，达到提高伪距观测精度的目的。其数学模型为：

$$\hat{\rho}(k) = \frac{1}{k}\rho(k) + \frac{k-1}{k}[\hat{\rho}(k-1) + (\bar{\rho}(k) - \bar{\rho}(k-1))] \tag{5.1.18}$$

式中，$\hat{\rho}(k)$为历元 k 的平滑伪距，$\rho(k)$为历元 k 的伪距观测值，$\hat{\rho}(k-1)$为历元 $k-1$ 的平滑伪距，$\bar{\rho}(k) - \bar{\rho}(k-1)$为历元 k 和历元 $k-1$ 间的载波相位差值。

$$\bar{\rho}(k) - \bar{\rho}(k-1) = [\varphi(k) - \varphi(k-1)]\lambda \tag{5.1.19}$$

只要给定初始条件 $\hat{\rho}(1) = \rho(1)$便可进行递推计算。

按误差传播率可得到平滑伪距的方差为：

$$\hat{\sigma}^2(k) = \frac{(k-1)\bar{\sigma}^2 + \sigma^2}{k} \approx \frac{\sigma^2}{k} \tag{5.1.20}$$

式中，σ^2为伪距观测值的方差，$\bar{\sigma}^2$为载波相位观测值的方差。由于载波相位的量测精度大大高于伪距，因而可忽略不计。由上式可知，平滑后伪距的精度可大大提高，进一步可提高伪距差分定位的精度。

5.2 GPS 数据处理方法

载体的运动可以用两种模型来表示，一种称为动力模型(Dynamic Modeling)，它根据作用于载体上的作用力由牛顿第二运动定律来表示。另一种称为动态模型（Kinematic Modeling），它基于对运动载体进行观测由动态位置、速度或加速度来表达。确定运动载体的位置常需混合运用动力模型和动态模型。对 GPS 而言，GPS 卫星轨道用动力模型来描述，当将卫星轨道视为已知值时(利用广播星历或精密星历计算卫星位置、速度)，利用伪距、载波相位观测值可以直接求解运动载体的三维位置和速度而无需任何作用于载体上作用力的信息。此时利用 GPS 确定运动载体的位置是单纯的动态定位问题。

根据导航和定位精度要求的不同、观测量类型选择的不同，GPS 动态定位的作业模式有单点定位、伪距差分定位、伪距和载波相位组合相对定位、载波相位相对定位以及将 GPS 与其它定位系统如惯性导航系统等组合的集成定位等。作业方式虽多，但其数据处理一般都采用最小二乘法或卡尔曼滤波技术。利用最小二乘法处理 GPS 动态定位数据的特点是模型简单、无需了解动态接收机的动力学特征，从根本上讲是一种静态函数模型。在 GPS 动态定位中，动态接收机天线的运动是一个遵循一定规律不断变化的动态系统，不同时刻对该系统的状态所进行的观测存在一定的相互联系，最小二乘法难以充分利用这些规律和相互联系。卡尔曼滤波是在线性无偏最小方差估计原理下推得的一种递推滤波方法。它引入了状态空间的概念，借助系统的状态转移方程根据前一时刻的状态估值和当前时刻的观测值递推估计新的状态估值。与最小二乘法相比，卡尔曼滤波更适合于 GPS 动态定位数据处理。实际上早在 1978 年帕金森就已将卡尔曼滤波技术引入了 GPS 单机导航定位的数据处理，其后许多学者又将它引入了差分 GPS 动态定位数据。

本节将主要研究利用卡尔曼滤波进行高精度 GPS动态定位的数据处理方法以及建立在卡尔曼滤波基础上的整周模糊度的在航解算(OTF)方法[3]。

5.2.1 附加模糊度参数滤波模型

在载波相位整周模糊度已知时，仅利用双差载波相位观测值，采用最小二乘或卡尔曼滤波处理就可以获得很高的动态定位精度。在整周模糊度未知时，可以将双差载波相位的模糊度作为状态向量的一部分，同时利用伪距、载波相位双差观测值，在滤波估计动态接收机天线位置、速度的同时估计双差载波相位模糊度，这里称之为附加模糊度参数滤波模型。由于在滤波计算模糊度参数时，不仅利用了伪距双差所提供的距离信息，而且还利用了卫星星座所提供的几何图形信息，在滤波充分多步后，模糊度往往极为接近正确的整周数，从而也可获得较高的动态定位精度。

附加模糊度参数模型即在状态向量中除包括运动状态向量（指动态接收天线的三维位置，速度等）之外还包括双差载波相位的模糊度参数。从而卡尔曼滤波的状态向量为 $X_k = \{x_k, y_k, z_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k, \nabla\Delta N^{12}, \nabla\Delta N^{13}, \cdots\cdots, \nabla\Delta N^{1n}\}^T$。$\nabla\Delta N$ 表示双差载波相位模糊度，n 为卫星数,状态向量中包含 $n-1$ 个模糊度参数。

状态方程为：

$$X_k = \Phi_{k-1}X_{k-1} + \Gamma_{k-1}W_{k-1}W_k \sim N(0, Q_k) \tag{5.2.1}$$

式中：

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} I_3 & \Delta T \cdot I_3 & 0 \\ 0 & I_3 & 0 \\ 0 & 0 & I_{n-1} \end{bmatrix} \tag{5.2.2}$$

$$\Gamma_{k-1}=\begin{bmatrix}\Delta T^2/2\cdot I_3 & 0\\ \Delta T\cdot I_3 & 0\\ 0 & I_{n-1}\end{bmatrix} \tag{5.2.3}$$

观测方程为：

$$\begin{bmatrix}Y_{kp}\\ Y_{k\varphi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}B_p(X_k)\\ B_\varphi(X_k)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}V_{kp}\\ V_{k\varphi}\end{bmatrix} \tag{5.2.4}$$

式(5.2.4)为非线性方程，Y_{kp}、$Y_{k\varphi}$分别表示双差伪距、载波相位观测向量。令(5.2.4)围绕参考估计

$$X_k^*=\{x_k,y_k,z_k,\dot{x}_k,\dot{y}_k,\dot{z}_k,\nabla\Delta N^{12^*},\nabla\Delta N^{13^*},\cdots,\nabla\Delta N^{1n^*}\}^T$$

线性化，可得到线性化观测方程：

$$\begin{bmatrix}Z_{kp}\\ Z_{k\varphi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Y_{kp}\\ Y_{k\varphi}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}B_p(X_k^*)\\ B_\varphi(X_k^*)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H_{kp}\\ H_{k\varphi}\end{bmatrix}\mathrm{d}X_k+\begin{bmatrix}V_{kp}\\ V_{k\varphi}\end{bmatrix} \tag{5.2.5}$$

$$\mathrm{d}X_k=\{x_k-x_k^*,y_k-y_k^*,z_k-z_k^*,\dot{x}_k-\dot{x}_k^*,\dot{y}_k-\dot{y}_k^*,\dot{z}_k-\dot{z}_k^*,\nabla\Delta N_k^{12},\nabla\Delta N_k^{13},\cdots,\nabla\Delta N_k^{1n}\}^T \tag{5.2.6}$$

在假设伪距观测与载波相位观测不相关时，可以采用如下分步滤波方法：

$$X_{k,k-1}=\Phi_{k,k-1}X_{k-1,k-1} \tag{5.2.7}$$

$$P_{k,k-1}=\Phi_{k,k-1}P_{k-1,k-1}\Phi_{k,k-1}^T+\Gamma_{k-1}Q_{k-1}\Gamma_{k,k-1}^T \tag{5.2.8}$$

双差伪距更新

$$X_{k,kp}=X_{k,k-1}+K_{kp}[Z_{kp}-H_{kp}(X_{k,k-1}-X_k^*)] \tag{5.2.9}$$

$$K_{kp}=P_{k,k-1}H_{kp}^T(H_{kp}P_{k,k-1}H_{kp}^T+R_{kp})^{-1} \tag{5.2.10}$$

$$P_{kp}=(I-K_{kp}H_{kp})P_{k,k-1} \tag{5.2.11}$$

双差载波相位更新

$$X_{k,k\varphi}=X_{k,kp}+K_{k\varphi}[Z_{k\varphi}-H_{k\varphi}(X_{k,kp}-X_k^*)] \tag{5.2.12}$$

$$K_{k\varphi}=P_{k,kp}H_{k\varphi}^T(H_{k\varphi}P_{k,k-1}H_{k\varphi}^T+R_\varphi)^{-1} \tag{5.2.13}$$

$$P_{k,k\varphi}=(I-K_{k\varphi}H_{k\varphi})P_{k,k\varphi} \tag{5.2.14}$$

以上附加模糊度参数模型提供了一种在模糊度无法固定为整周时的一种较高精度的解算方法。随滤波的递推流动站位置的估计越来越准确，与相位平滑伪距相比较，附加模糊度参数模型无需根据不同卫星参与滤波的次数重新设计量测噪声矩阵。另外，相位平滑伪距是基于单个卫星或单差的，即平滑只是针对于单个观测值。附加模糊度参数模型则充分利用了所有观测量的信息，即滤波是相对于所有观测值的，这导致附加模糊度参数模型所解算的模糊度估值及流动站位置精度比相位平滑伪距略高。更为重要的是在此模型的基础上可以构造模糊度在航解算算法。

5.2.2 基于附加模糊度参数滤波的 OTF 算法

整周模糊度的正确解求是利用载波相位进行高精度 GPS 动态定位最关键的问题。一旦整周模糊度正确固定，载波相位观测值即可转换为高精度的测相伪距，从而实现厘米级的动态定位精度。由于连续跟踪（无失锁，无周跳）的载波相位观测值均含有相同的整周模糊度 N。在传统的载波相位 GPS动态定位中往往采用在动态定位前进行一段时间的静态测量或从已知基线上进行短时间的静态测量的方法来确定整周模糊度，这一过程称为静态初始化。 1985年，Remondi 提出了一种天线交换的方法来解求初始整周模糊度，这一方法无需从已知基线开始动态测量也无需进行较长时间的静态定位，只需在基准站附近(3～5m)选择一临时站，分别架高 GPS 接收机采集几个历元的静态数据。然后进行天线交换，再采集几个历元的静态数据。最后再交换回去即可，这一天线交换的方法实施简单而且软件设计也不复杂，在传统的高精度动态定位软件中得到了广泛应用。

无论是静态初始化还是天线交换技术，都是利用动态定位实施之前的一段数据来确定整周模糊度，即在动态定位之前确定整周模糊度，然后根据载波相位在无失锁、无周跳时整周模糊度不变的特性进行高精度的动态定位解算。这几种传统方法在许多情况下是难以适用的，例如对于海上的动态定位以及飞机的精密进场着陆等。另外，即使可以在动态定位之前采用上述几种方法确定整周模糊度，由于动态定位的环境是复杂的，失锁和周跳难以避免。一旦在动态定位过程中出现失锁和周跳，使定位过程某一时间段内连续跟踪的卫星数少于 4颗，即使后来又重新锁定 4颗以上的卫星，重新锁定卫星的整周模糊度仍无法解求，导致动态定位精度的降低。基于以上原因，近年来国内外学者开始着手研究在动态定位过程中解算整周模糊度的方法一整周模糊度的在航解算(Ambiguty Resolution on the Fly) ，简称 OTF 或 AROF，并取得了丰硕的成果，导出了多种 OTF 解算方法。

以下在附加模糊度参数卡尔曼滤波动态定位模型基础上结合几种 OTF 方法的优点，建立一种稳健可靠的 OTF方法。

基于附加模糊度参数卡尔曼滤波的 OTF方法采用附加模糊度参数模型所提供的双差模糊度浮点估值及其协方差阵作为模糊度在航解算的初值。整周模糊度搜索方法采用优化 Cholesky 分解算法。并选择了更为合乎实用的模糊度搜索空间，以及保证 OTF 解算正确性的 RATIO 检验和 OVT 检验。基于附加模糊度参数卡尔曼滤波的 OTF 方法分为两个步骤 正确整周模糊度的搜索和整周模糊度固定后的滤波处理。

1)正确整周模糊度的搜索

正确整周模糊度的搜索可分为三个步骤：

(1)确定双差模糊度初值及搜索空间

每历元滤波计算（采用附加模糊度参数卡尔曼滤波模型），可得到相应的模糊度参数的浮点估值亦即模糊度初值 $D\hat{N}=(\mathrm{d}\hat{n}_1,\mathrm{d}\hat{n}_2,\cdots,\mathrm{d}\hat{n}_n)^T$ 及其相应的协方差阵 Q_N。搜索空间中每

个双差模糊度的搜索范围按如下方式定义：

搜索范围为：

$$|\mathrm{d}n_i - \mathrm{d}\hat{n}_i| \leq \max(d, 3\sqrt{Q_{ii}}) \tag{5.2.15}$$

上式中，d 为一给定的正整数，Q_{ii} 为该模糊度的方差，$\mathrm{d}n_i$ 为待检测的整周模糊度数值。上式定义的单边搜索范围为一个给定正整数和该模糊度3倍标准差的最大值。定义适当搜索范围有两个目的，一是不至于因搜索范围过大而浪费搜索时间，二是不至于因搜索范围过小而使正确模糊度落在搜索范围之外。按上式定义搜索范围，一方面在 Q_{ii} 较大时（$3Q_{ii} > d$）以3倍标准差为标准，使搜索范围不至于过大，另一方面在 Q_{ii} 较小时（$3Q_{ii} < d$）以固定正整数 d 为标准，使搜索范围不至于过小，而失去正确整周模糊度，实用中，可取 $d=1$，即搜索范围不小于 ± 1 周。这样定义搜索空间完全是出于实用的考虑，虽然从某种意义上讲，它所定义的搜索范围有时会偏大，但良好的搜索方法可以弥补这一不足。

(2)优化 Cholesky 分解整周模糊度搜索

根据模糊度协方差法的思想，搜索正确整周模糊度的过程如以下二次型的最小化表示：

$$\Omega''_{k/k} = (DN - D\hat{N})^T Q_N^{-1} (DN - D\hat{N}) \quad DN \in Z^n \tag{5.2.16}$$

式中，DN 为从搜索空间中选取的一组模糊度参数组，n 为模糊度参数的数目，Z^n 为 n 维整数空间。

对每组模糊度参数进行式(5.2.16)的二次型计算是十分费时的。若定义每个模糊度参数的搜索范围为 ± 10 周，对于同步观测 6 颗卫星，则需检核 $21^5 = 4\,084\,101$ 个不同的模糊度组，由式(5.2.16)计算往往需要花费数十秒的 CPU 时间。这样长的计算时间显然无法用于实时动态定位，即使对于后处理也是难以忍受的。为了提高计算效率，Euler 和 Landu 提出了优化 Cholesky 分解算法。将正定对称阵 Q_N^{-1} 进行 Cholesky 分解，即

$$Q_N^{-1} = C \cdot C^T \tag{5.2.17}$$

式中，C 为一个 $n \times n$ 维的下三角矩阵，n 为模糊度参数的个数。Cholesky 分解在一历元解算中只需进行一次。并将式(5.2.16)表示为：

$$\begin{aligned} \Omega''_{k/k} &= (DN - D\hat{N})^T C \cdot C^T (DN - D\hat{N}) = f^T f \\ f^T &= (DN - D\hat{N})^T \cdot C \\ \Omega''_{k/k} &= \sum_{i=1}^{n} f_i^2 \end{aligned} \tag{5.2.18}$$

将 f^T 表示为分量形式，即

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \mathrm{d}n_1 - \mathrm{d}\hat{n}_1 \\ \mathrm{d}n_2 - \mathrm{d}\hat{n}_2 \\ \mathrm{d}n_3 - \mathrm{d}\hat{n}_3 \\ \vdots \\ \mathrm{d}n_n - \mathrm{d}\hat{n}_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1n} & C_{2n} & C_{3n} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \tag{5.2.19}$$

由于矩阵 C 的下三角特性，f 分量的计算可以从最后一个元素 f_n 开始，计算量由 $f_n \rightarrow f_1$ 递增。由于 f_i^2 总大于或等于零，计算中式(5.2.18)和式(5.2.19)的计算可以交替进行。当某一整周模糊度组合中部分模糊度计算得到的平方和已超过前面计算的某一最优或次优 Ω_k 时，所有包括该部分模糊度的组合都将被排除，从而大大提高搜索速度。表 5.2.1 给出了对 6 个双差模糊度分别采用优化 Cholesky 分解和不分解搜索在 586－60 计算机上进行单历元搜索所用的 CPU 时间。由表列数据可知，优化 Cholesky 分解算法对搜索速度的提高是十分显著的。

表 5.2.1 搜索时间对比

搜索区间	模糊度组合数	搜索所用 CPU 时间		
		不分解	Cholesky 分解	优化 Cholesky 分解
±5	1 771 561	147.5s	60.97s	0.035s
±10	85 766 121	1.98h	0.82h	0.18s
±20	4 750 104 241	4.58d	1.89d	0.54s
±50	$1.0615e^{12}$	1023d	422d	1.42s

(3)正确整周模糊度的检验

从原理上讲，在一历元内搜索空间中所有的模糊度进行了第(2)步计算后，对应 $\Omega''_{k/k}$ 为最小的模糊度组即应是正确模糊度组。然而由于量测误差以及未能消除的残余系统误差的存在。$\Omega''_{k/k}$ 最小的模糊度可能并不是正确的模糊度，为此，在 OTF 中引入了两种检验：RATIO 检验和 OVT 检验。

RATIO 检验是从静态定位中引入的，在许多 OTF 方法中也得到了广泛的应用。RATIO 值定义为：

$$\text{RATIO} = \frac{(\Omega_{k/\kappa})_{\text{次小}}}{(\Omega_{k/k})_{\text{最小}}} \tag{5.2.20}$$

$$\Omega_{k/k} = V^T R_k^{-1} V + \Omega''_{k/k} \tag{5.2.21}$$

式中，$V^T R_k^{-1} V$ 为模糊度参数估计为实数时的双差载波相位残差平方和。$\Omega''_{k/k}$ 由式(5.2.16)或(5.2.18)计算，$\Omega_{k/k}$ 是模糊度固定为整周时的残差平方和。RATIO 则是次小残差平方和与最小残差平方和的比值。当 RATIO 值大于某一限值时（一般取为常值），则认为残差平方和 $\Omega_{k/k}$ 最小的模糊度组是正确模糊度组。

研究中发现，仅用单历元的 RATIO 检验来确定正确模糊度组有时不可靠，尤其是在卫星图形较差或观测噪声较大时。然而，随观测历元的增加，通过 RATIO 检验的不正确模糊度组会逐渐被正确模糊度组所取代。此时，进一步引入了 OVT(Overall Validation Test)检验。OVT 检验由 Wei(1995)提出。它所检验的是 RATIO 检验能否在一段持续的检验时间连续大于限值，且 $\Omega_{k/k}$ 最小的模糊度组为同一模糊度组。OVT 检验极大地提高了 OTF 的可靠性。

2 整周模糊度固定后的滤波处理

在整周模糊度固定后，由附加模糊度参数卡尔曼滤波得到的当前历元各运动状态的滤波值（模糊度参数为实数值），可转换为整周模糊度固定的各运动状态的估值。

设附加模糊度参数卡尔曼滤波的当前历元滤波值为

$$X_{k/k} = \{\hat{S}_{k/k} D\hat{N}_{k/k}\}^T \tag{5.2.22}$$

滤波值协方差阵为

$$P_{k/k} = \begin{bmatrix} Q_S & Q_{SN}^T \\ Q_{SN} & Q_N \end{bmatrix} \tag{5.2.23}$$

上式中 $\hat{S}_{k/k}$表示运动状态的滤波估值 $\hat{S}_{k/k} = [x_{k/k}, y_{k/k}, z_{k/k}, \dot{x}_{k/k}, \dot{y}_{k/k}, \dot{z}_{k/k}]^T$。$D\hat{N}_{k/k}$为模糊度参数的浮点滤波估值。则在模糊度固定为整周时，有

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{k/k} &= \hat{S}_{k/k} - Q_{SN}^T Q_S^{-1} (D\tilde{N}_{k/k} - D\hat{N}_{k/k}) \\ \tilde{Q}_S &= Q_S - Q_{SN}^T Q_N^{-1} Q_{SN} \end{aligned} \tag{5.2.24}$$

由此将附加模糊度参数运动状态的滤波估值转换为无模糊度参数的滤波估值。以该估值为初始条件，可以分别向前，向后进行无模糊度参数卡尔曼滤波获得高精度 GPS动态定位成果。同以往的 OTF 方法相比,基于附加模糊度参数卡尔曼滤波的 OTF方法有以下特点：

(1) 它基于附加模糊度参数模型所提供的良好初值及其协方差阵。

(2) 提供了更为实用的搜索空间，以保证不致因搜索空间过大而浪费搜索的 CPU时间，不至于过小而漏掉正确的模糊度组。

(3) 每历元均对模糊度搜索空间中所有模糊度组进行搜索，不致因个别历元某些观测值噪声稍大而过早地排除正确模糊度组。

(4) 采用优化 Cholesky 分解算法进行模糊度搜索,极大地提高了搜索效率,节约了搜索时间。

(5) 在 RATIO检验基础上进一步采用了 OVT 检验提高了 OTF 的可靠性。

5.3 GIS 与 GPS 的结合

伴随工农业的发展,资源与环境问题日趋严重,迫切需要实时、准确、可靠地获取环境参数的现状和动态变化数据。过去由于种种限制，主要利用地形图及相关图件，选择少量的点，到实地测量反映环境质量的数据。这样做不仅费时、费力、速度慢，特别是所获取的数据难以实时地管理和处理。为了改变这种情况，可以考虑把地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS)集成应用于环境参数的采集、组织和管理上。这个过程涉及将所采集的实况数据与定位数据结合形成实况数据库,并经过 GIS和图像处理系统将实况数据库中的数据与图像、图形或其

它数据综合处理,用于环境参数的定性、定量分析及动态变化分析。

5.3.1 GPS 用于 GIS 数据采集的特点

从计算机科学角度看,GIS 是由计算机硬件、软件、地理数据和用户四大要素组成的问题求解系统。这里的硬件包括各类计算机处理机、网络及网络服务器,以及各种计算机终端设备 软件是支持数据与信息的采集、存储、加工、处理、再现和与用户交互、回答用户问题的计算机程序系统;地理数据则包括各种定量和定性数据,它们通过数据库管理系统在数据库中被存取;用户是信息系统所服务的对象、是信息系统的主人,可将用户区分为一般用户和从事系统建立、维护、管理和更新的高级用户以及系统管理员。

近年来,GPS 作为 GIS数据采集的一种高效的手段已得到了广泛的应用。将高精度的 GPS 定位技术与计算机技术相结合,使 GIS 的数据采集更为精确、快速、可靠。与其它 GIS 数据采集手段如地图数字化、航空摄影测量、遥感等相比,利用 GPS 采集 GIS 数据具有独特的优势:

(1) GPS 能为 GIS 提供高精度的空间信息。采用先进的 GPS 接收机技术并利用差分 GPS 能在一二分钟内提供分米级精度的定位,这样的高精度是其它手段难以达到的。

(2) 使用其它的 GIS数据采集方法,空间数据的采集和属性数据的采集往往是分开的,而将 GPS 与计算机(电子手簿)结合能在定位的同时采集详细的属性数据,提高了 GIS 数据的完整性和准确性。

(3) GPS 用于 GIS 数据采集使 GIS 系统的局部更新更为方便、快速、灵活。

(4) GPS 用于 GIS 数据采集使 GIS 数据采集的数字化程度更高、速度更快、成本更低。

5.3.2 基于 GeoStar 开发 GIS 与 GPS 的集成应用软件

GIS 与 GPS 的集成过程中的一个重要环节是解决 GIS 和 GPS 之间的逻辑联接,包括对数据进行合理的组织和表达,否则,就难以发挥二者各自的优势。为此,我们以武汉测绘科技大学 GeoStar 地理信息系统平台(参见第九章)为基础,利用其提供的集成的数据库(包括矢量数据、属性数据、DEM、数字影像以及各种语音和视频图像等)开发 GIS 与 GPS 的集成应用软件。它具有以下一些功能:

(1) 基于道路网及其子网求最佳路径,并可以绕开交通堵塞路段。

(2) 图形漫游和无级比例放大,主要是为了便于在不同层次(不同比例尺)上显示和浏览各级道路网。

(3) 单车运行监测,主要是通过车载 GPS 接受机和计算机所接受的 GPS 卫星发送的数据,根据屏幕上电子地图,实时显示当前汽车在道路网中的位置。

(4) 历史信息处理,即在接受 GPS 数据时,实时地把当时的位置及相关的状态信息记录下来,以便在需要时,可以把当时记录的数据在计算机上模拟出来。

(5) 信息查询，包括指定屏幕位置的查询，根据输入信息的查询以及模糊信息查询。后者主要指对查询对象的位置和属性都不完全确定时的查询。

(6)紧急情况处理，包括突发事件的位置确定和突发事件的范围限定等，并能提供相关单位的信息。

(7)可利用 CCD 相机及其它多种车载传感器进行地面数据采集，这也是我们在 GIS 与 GPS 集成过程中的重点研究内容之一(参见第八章)。

5.3.3 GPS 用于 GIS采集的流程

GPS 用于 GIS采集的流程可分为以下几个步骤：

(1) 在内业编辑数据词典，然后传输到电子手簿中供外业数据采集用；

(2) 建立基准站(在已知点上)；

(3) 利用 GPS 流动站设备采集 GIS 数据；

(4) 将外业数据传输到计算机进行编辑和处理；

(5) 将处理后的数据传输到 GIS/CAD 系统。

其系统框图如图 5.3.1 所示。

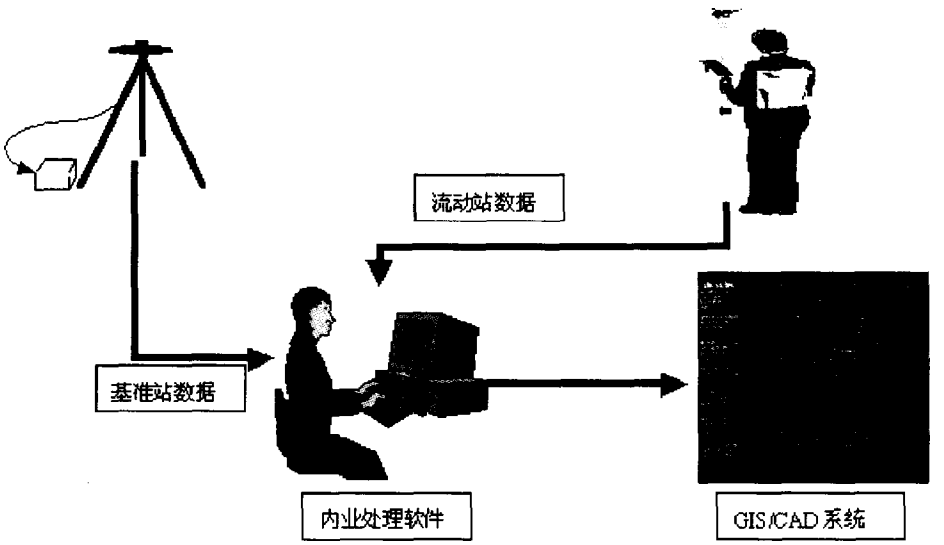


图 5.3.1 GPS用于 GIS数据采集流程

5.4 车载 GPS道路信息采集系统

随着各种车辆导航和管理系统（如智能交通系统、车载导航系统、公安及银行车辆监控系统等）的出现和迅猛发展，现有电子地图中道路信息的不准确和不完整成为越来越突出的问题。目前电子地图一般通过扫描或数字化地图然后经过编辑生成，或者用航测或遥感的方法直接成图。这样生成的电子地图中道路信息较少，一般只包含道路位置及名称信息，而没有其它的重要道路属性如路宽、路况、路面介质等；另外，制作电子地图的地图和航片更新周期较长,而近几年来由于国家加大对基础建设的投资,道路的新建、拓宽和改建速度较快,从而造成电子地图中道路信息的不完整和不准确，严重制约车辆导航和管理系统的发展。因此如何快速、准确地采集和更新道路信息是发展车辆导航和管理系统所面临的一个重要问题。

GPS 为采集和更新道路信息提供了一种快速、准确的解决方案。即使采用廉价的导航型GPS接收机通过差分处理也能达到 5m 的定位精度，而利用载波相位差分技术可在数百公里范围内达到分米乃至厘米级的定位精度。因而 GPS 定位精度完全可以满足道路信息采集和更新的需要。与地图数字化、航测遥感制作电子地图相比，利用车载 GPS 采集和更新电子地图中的道路信息不仅精度高、更新速度快，而且车辆在实际道路上行驶过程中可以记录道路及路边建筑信息,充实原有电子地图,使电子地图的信息更完整。

本节介绍武汉测绘科技大学研制的车载道路信息采集和更新系统（CRICUS）。该系统可采集和记录 GPS 数据及道路属性数据,在内业进行了 GPS差分改正和道路属性数据编辑后，这些数据可输出到 GIS系统以生成和更新数字道路网数据库。这一系统的建立不仅可以满足各种车辆导航和管理系统的需要，而且还可以用于建立全国的道路网数据库供交通管理部门使用，具有极大的实用价值及广阔的应用前景。

5.4.1 系统设计

车载道路信息采集和更新系统(CRICUS）被设计用于采集道路信息以生成数字道路地图及更新道路网数据库。它由两部分组成：外业数据采集模块和内业数据处理模块。

外业数据采集模块由一个 GPS 基准站和一个安装在车辆上的移动单元组成。移动单元包括一个导航型 GPS接收机、一个安装了外业数据采集软件的工控计算机以及电源和其它附件。外业数据采集软件可以采集空间和属性数据并实时地将数据储存在工控计算机上。 GPS定位数据可自动记录在计算机内，属性数据则通过键盘或语音录入。在道路颠簸和路况恶劣的情况下，语音录入将使属性数据输入更有效。

内业数据处理模块将外业采集数据传输至内业处理计算机内进行后续数据处理并将结果输出到 GIS 系统。该模块有三个主要功能：GPS数据处理、属性数据编辑和数据输出。GPS数据处理首先对 GPS数据进行差分改正并进行滤波平滑,将 GPS粗差数据剔除,然后将 GPS

位置改正到道路中心线。对于语音录入的属性数据，属性数据编辑工作主要是从语音中提取所需的属性数据。对于键盘录入的属性数据，属性数据编辑工作主要是修正外业中输入的错误数据。数据输出则是将经 GPS 数据处理和属性数据编辑的空间和属性数据导入道路网数据库并输出至 GeoStar-武汉测绘科技大学研制的 GIS 软件。CRICUS 的功能及其与 GIS 的关系如图 5.4.1 所示。

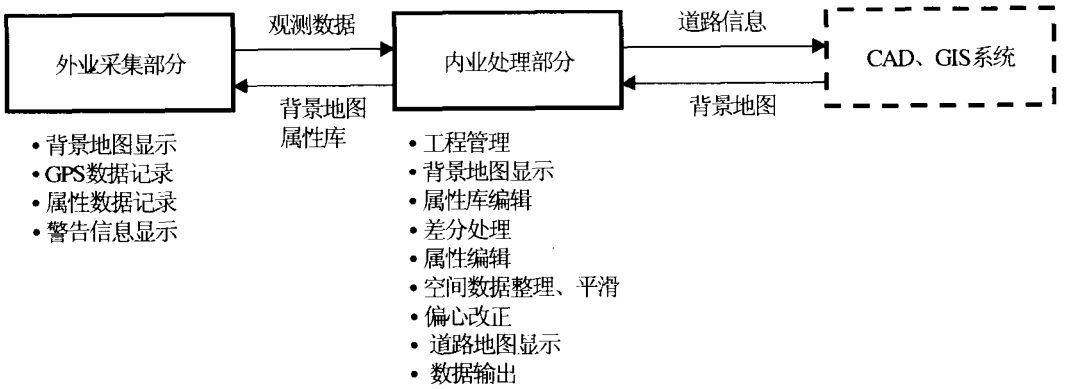


图 5.4.1 CRICUS 功能

5.4.2 系统实现

CRICUS 外业数据采集移动单元安置在一台北京吉普车上。车载设备包括一个 Motorola VP-ONCORE GPS 接收机(包括天线),一个带外接液晶显示器的工控计算机及 UPS。GPS 天线安置于吉普车的顶部。工控计算机、GPS 接收机及 UPS 安置在计算机柜中并放置在吉普车的后部。外接液晶显示器安装在驾驶座的侧前方为驾驶员导航。另外，车顶上还安装了 3 个 CCD 相机用于测量路宽。（该车及外接液晶显示器的照片参见 8.4)。

CRICUS 系统的软件分为三部分：GPS 外业数据记录软件(GPSWin),外业数据采集软件(DataAccess)和内业处理软件(GPSRoad)。这些软件均在 Windows 95/NT 环境下开发。

GPSWin 被设计为控制车载 GPS 的独立软件。该软件可通过 RS-232 接口自动接收和记录 GPS 数据并对 GPS 接收机进行控制。该软件还可通过 Windows 动态数据交换(DDE)功能将时间、GPS 坐标、跟踪卫星数／可视卫星数、PDOP 等数据传给 DataAccess 软件。另外，该软件通过 DDE 功能还可为车载导航系统服务。GPSWin 的界面如图 5.4.2 所示。

DataAccess 被设计用于采集道路信息如道路等级、路宽、路况、车道数以及其它交通设施如交通标志、公里牌、加油站、收费站的信息。DataAccess 的主要功能如下：

(1) 实时导航。由 GPSWin 发送来的 GPS 实时位置可显示在背景地图上以避免对同一道路进行重复测量或漏测道路。

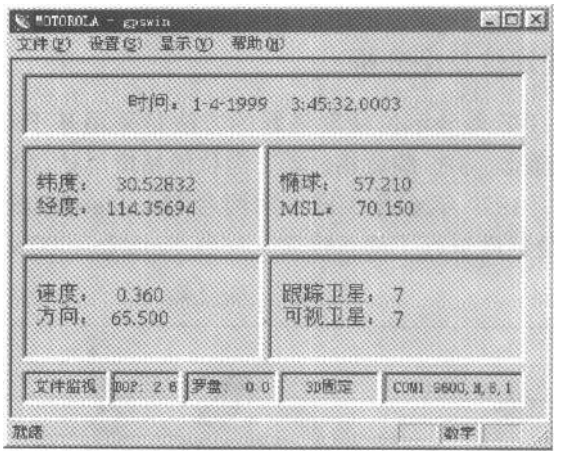


图 5.4.2 GPSWin 界面

(2) 属性库载入。为使 CRICUS 系统能适应任何道路信息采集工程的需要采用了属性库。该属性库是一个 Microsoft Access 数据库，因此修改和添加新属性十分简单。当 DataAccess 启动时，该属性库将动态载入并在用户界面上显示为按钮。当用户点击按钮时，可弹出属性输入对话框以输入相关属性数据。

(3) 属性数据输入及记录。DataAccess 提供了两种属性数据输入方法。种是键盘输入，另一种是语音输入。键盘输入适合于在平坦道路上采集数据语音输入适合于在不平坦的道路或车速较快时使用。每一个属性记录都赋予惟一的 ID 号及相应的 GPS 定位开始/结束时间从而在内业处理时能将属性与 GPS 提供的空间信息联系在一起。由于车辆很难在道路中心线上行驶，因此在记录属性数据时还必须记录车载 GPS 天线与道路中心线的偏离距离。DataAccess 界面如图 5.4.3(见插页）所示。

GeoRoad 设计用于对 GPS 数据进行差分后处理、编辑属性数据、构造道路网数据库以及将数据输出至 GIS 系统。它的主要功能有：

(1) GPS 数据处理。首先将 GPS 基准站和由 GPSWin 采集的车载 GPS 数据传输至内业计算机,然后采用基准站数据对车载 GPS 数据进行差分改正并将差分定位坐标转换至国家坐标系最后删除定位精度较低的点位并沿道路对剩余点位进行平滑从而提高精度。

(2) 属性数据编辑。回放外业语音输入属性数据并用键盘输入相应的属性数据；对于在外业键盘输入的属性数据进行检查并改正错误的输入项。

(3) 道路网生成及输出。GPS 数据处理给出了车辆运行的轨迹,然而我们需要的是道路中心线的数据。利用外业输入的偏心数据可进行偏心改正从而得到道路中心线的坐标数据。这些坐标数据将和进行了属性数据编辑的属性数据一起以中国空间数据传输格式存储并输出到 GeoStar 进行进一步的编辑。图 5.4.4(见插页)为 GeoRoad 的编辑窗口,图 5.4.5(见插页）

为带背景遥感地图显示的编辑窗口。

5.4.3 CRICUS 系统定位精度分析

检验 CRICUS 系统 GPS 差分定位精度最好的方法是采用基于载波相位测量的高精度 GPS 动态定位技术进行检验。GPS 载波相位动态定位的精度可达厘米级，与伪距差分相比它的定位误差可忽略不计。1999 年 6 月 5 日采用两台 Trimble 4000SSI 对 Motorola VP-ONCORE 接收机的差分定位精度进行了动态检验。一台 Trimble 4000SSI 作为基准站驾设于武

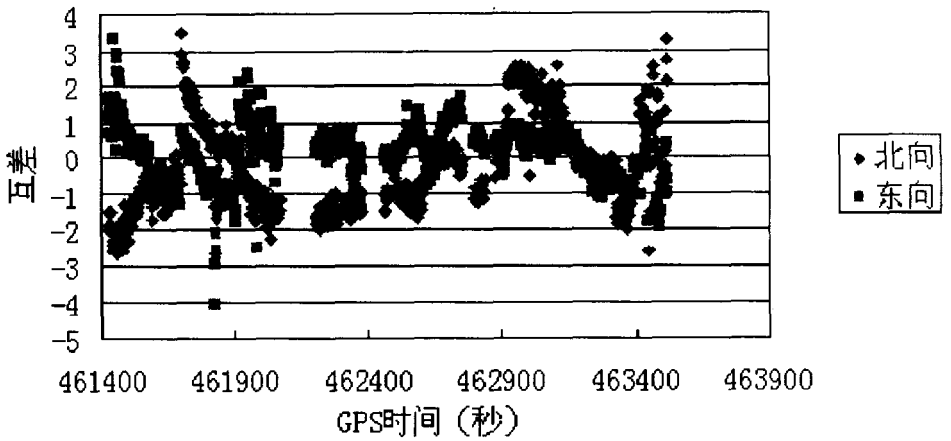


图 5.4.6 CRICUS系统定位精度

汉测绘科技大学教学实验大楼顶，车上安置了一台 Trimble 4000SSI 和一台 Motorola VP-ONCORE接收机。两台 Trimble 4000SSI和 Motorola VP-ONCORE 接收机都采用两秒的采样率。车辆沿武珞路、珞狮路、楚雄大道行驶。试验时间 45 分钟。Motorola VP-ONCORE 接收机的数据采用 GPSWin 记录并采用 GeoRoad 进行差分处理。Trimble 4000SSI 的数据则采用 GPSurvey 软件解算。在剔除了粗差数据后，两者结果的互差如图 5.4.6 所示。北向和东向的定位误差分别为 1.24m 和 0.83m(1倍标准差）。由此可见，CRICUS 系统的定位精度是十分理想的。

参考文献

[1] 陈小明,刘基余,李德仁．OTF 方法及其在 GPS 辅助航空摄影测量数据处理中的应

用，测绘学报，1997，26(2)：101～108

[2] **刘基余,陈小明** . The Confidence Evaluation on Kinematic Data. In: IUGG XXI General Assembly, Boulder, Colorado, USA, July, 1995

[3] H.J. Euler, H. Landau. Fast GPS Ambiguity Resolution On-The-Fly for Real Time Application, the 6th Int. Geodetic Symposium on Satellite Positioning, 1992, Columbus, Ohio, pp. 650～659

第 6 章　遥感与全球定位系统的集成

遥感是通过非接触传感器获得所摄目标的影像，由影像提取各种几何信息和属性信息，前者亦常称为空间定位问题。以航空摄影测量而言，其定位方法通称空中三角测量，其工作可分为两大主要部分 第一部分是数据采集,包括转点、像点坐标或模型点坐标量测、坐标规化和预改正。第二部分是数据处理，一般为区域网平差，平差过程中要引人非摄影测量信息，主要是地面控制点坐标，使空中三角测量网纳入规定的物方坐标系，同时对像片系统误差进行有效地改正。传统的空中三角测量中，前者依靠人工选点、转点和在航测仪器上人工量测获得像点像片坐标或模型坐标，后者则主要利用大地测量方法测定在像片上满足良好分布条件的若干控制点。这当中的人工因素正是阻碍摄影测量和遥感向数字化、自动化和实时化发展的难点之一。随着 GPS 辅助空中三角测量和自动空中三角测量的成功研制，加上自动粗差探测技术，我们已在解析空中三角测量走向全自动化方面奠定了坚实基础。另一方面，通过 GPS辅助空中三角测量和全数字化自动摄影测量的集成，已可形成从外业控制到内业加密直至快速获取地面 DEM，数字正射影像与数字线划图的更加高效的过程。此外，把 GPS、惯导系统(INS)、CCD 和激光扫描仪集成在一起用于对地观测，也已在研制中。

6.1　GPS辅助空中三角测量与自动空中三角测量的结合[1]

6.1.1　GPS 辅助空中三角测量

GPS 辅助空中三角测量是指利用机载 GPS接收机与地面基准点的 GPS 接收机同时、快速、连续地记录相同的 GPS卫星信号，通过相对定位技术的离线数据后处理获取摄影机曝光时刻摄站的高精度三维坐标，将其作为区域网平差中的附加非摄影测量观测值，以空中控制取代(或减少)地面控制 经采用统一的数学模型和算法,整体确定点位并对其质量进行评定的理论、技术和方法。图 6.1.1表示利用差分模式获取空中控制的示意图。由此可获得在以 M 为原点的地面坐标系中，飞机上天线相位中心 $A(X_A, Y_A, Z_A)$和摄影中心 $S(X_S, Y_S, Z_S)$利用像片姿态角 φ, ω, κ 得到的变换关系式：

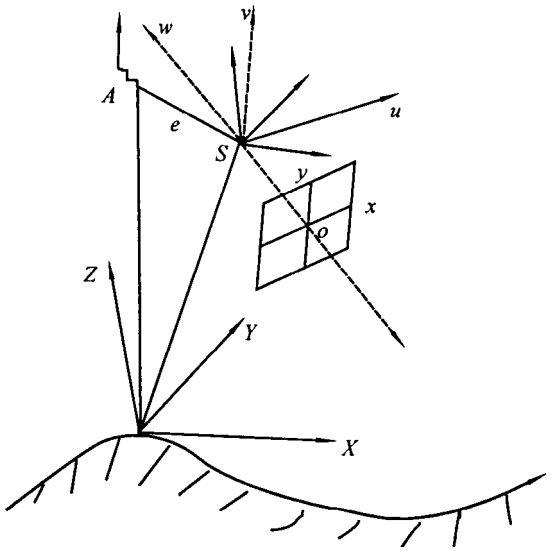


图 6.1.1　利用空一地两台 GPS 接受机的航摄系统

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \tag{6.1.1}$$

R 为由像片姿态角所表示的正交变换矩阵。 (u, v, w)为 GPS 天线相位中心 A 在像片坐标系中的坐标。

由上式出发,顾及 GPS 观测值中的系统误差(主要为漂移误差),即可获得 GPS 摄影中心坐标方程式的线性化误差方程式，与整体平差的其它误差方程式联立：

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_C \\ V_S \\ V_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & C & . & . \\ . & E_X & . & . & . \\ . & . & E_C & . & . \\ \bar{A} & . & . & R & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ X \\ c \\ r \\ d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_X \\ L_C \\ L_S \\ L_G \end{bmatrix}, \text{权矩阵 } P = \begin{bmatrix} 1 & . & . & . \\ . & P_C & . & . \\ . & . & P_S & . \\ . & . & . & P_G \end{bmatrix} \tag{6.1.2}$$

式中：$t = [\mathrm{d}\varphi \quad \mathrm{d}\omega \quad \mathrm{d}\kappa \quad \mathrm{d}X_S \quad \mathrm{d}Y_S \quad \mathrm{d}Z_S]^T$ 为像片外方位元素未知数增量；

$X = [\mathrm{d}X \quad \mathrm{d}Y \quad \mathrm{d}Z]^T$ 为加密点坐标未知数增量；

c 为自检校附加参数；

$r=[\mathrm{d}_u \quad \mathrm{d}_v \quad \mathrm{d}_w]^T$ 为 GPS天线——相机偏移向量未知数增量；

$\mathrm{d}=[a_x \quad a_y \quad a_z \quad b_x \quad b_y \quad b_z]^T$ 为漂移改正参数。

对应的系数矩阵、常数项和权矩阵不再列述，详见参考文献[2]。

在选取一定的权函数形式后，由最小二乘法求解。

已有的研究和试验表明：

(1)GPS 差分技术可获取亚米级精度的三维摄站坐标，可以有效地用于区域网平差。解算出的加密点坐标精度要优于 GPS 摄站坐标自身的精度，可满足各种比例尺测图的加密规范。

(2)在一个区域中，GPS 观测值如没有失锁、周跳等信号间断的情况，在不需考虑基准的情况下，GPS摄站坐标可完全取代地面控制点用于区域网平差。

(3)为解决基准问题及有效改正由于周跳、失锁等导致的 GPS 系统误差，需加飞构架航线或加入少量地面控制点。

(4)大量的试验(在太原、哈尔滨)和生产测区(如海南)的结果表明，GPS辅助空中三角测量已成功用于不同像片比例尺、不同大小区域的联合平差，完全可以投人生产实用化。

6.1.2 自动空中三角测量

自动空中三角测量是利用模式识别与多片影像匹配等方法代替人工进行自动选点与转点、同时自动获取像点坐标，提供给区域网平差程序解算。其主要过程如下：

(1)自动内定向　主要指建立数字影像各像素行列数与其像点坐标之间的关系，其核心是数字影像中框标点的自动识别与定位。由于各种框标均具有对称性及任意倍数 90°旋转不变性，对每一种相机，可用该特性自动建立标准模板。其后利用模板匹配自动快速识别与定位各框标点，再根据相机检校的理论框标值进行参数解算。

(2)自动选点与自动相对定向　首先由点特征提取算子从每两幅相互重叠的影像的重叠范围内选取均匀分布的明显特征点。为了保证高可靠性，所选的点应充分多。对每一点进行局部多点松弛法影像匹配，得到其在另一幅影像中对应的点。然后进行相对定向解算，并根据相对定向结果剔除粗差，重新解算，直至没有粗差为止。

(3)多片匹配自动转点　对每幅影像中所选取的点，在所有与其重叠的影像中，利用核线(共面)条件约束的局部多点松弛法影像匹配，进行自动转点，并对每一对点进行反向匹配，以检测并排除可能的粗差。

(4) 控制点半自动量测　对于 GPS 辅助空中三角测量，还需要量测少量地面控制点的影像坐标，为此由作业员直接在计算机屏幕上对某一影像进行辨识并精确定位，然后通过多片匹配而实现自动转点。

6.1.3 GPS全自动空中三角测量

由自动空中三角测量中的多片影像匹配自动转点技术取代常规航测中像点坐标的人工量测，由 GPS动态差分技术获取 GPS 摄站坐标，以空中控制取代或减少地面控制，即可使解析空中三角测量实现全自动化(图 6.1.2)，其作业流程为：

(1)利用机载 GPS接收机与地面参考点的 GPS接收机同时、快速、连续地记录相同的GPS卫星之信号，同时在机载 GPS 接收机记录数据中加入摄影瞬间的时标信号。

(2)利用后处理软件进行离线数据后处理，内插获得摄影瞬间 GPS天线相位中心的三维坐标。

(3)利用自动空中三角测量中的多片影像匹配自动转点技术，对数字化后的影像进行整体影像匹配，获得较常规数量多、精度高、可靠性好的模型连接点的像片坐标。

(4)由上所得的 GPS 摄站坐标，连接点像片坐标，外加摄影机数据，必要时加入少量地面控制，进行摄影测量与非摄影测量观测值的联合平差，求解加密点坐标(物方坐标系)或像片定向参数。

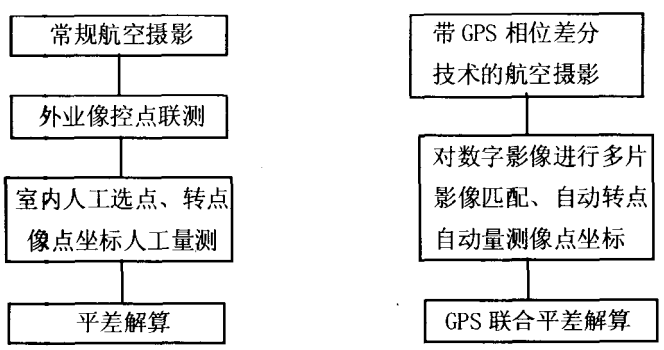


图 6.1.2 常规空中三角测量与 GPS辅助全自动空中三角测量

6.2 GPS辅助空中三角测量中的一些关键技术[3]

GPS用于空中三角测量的实质在于利用机载 GPS 测定的天线相位中心位置间接地确定摄站坐标(亦即外方位元素)。GPS用于空中三角测量需要机载 GPS天线相位中心位置达到什么样的精度呢？计算机模拟计算结果表明，GPS 摄影机位置的坐标在区域网联合平差中十

分有效，使用中等精度的 GPS 就能满足航摄测图的规范（见表 6.2.1）。

表 6.2.1 所要求的 GPS 定位精度是完全可以达到的，而且由于 GPS 确定的每个摄站位置均相当于一个控制点，因而可以减少地面控制至最低限度，直至完全取消地面控制。由于摄站坐标的加入，大大增强了空间定位信息，使空中三角测量加密的精度有所提高。

表 6.2.1 空中三角测量(联合平差)要求 GPS 定位精度

地图比例尺	像片比例尺	空三所需精度		等高距	GPS 定位精度	
		$\mu_{x,y}$	μ_z		$\sigma_{x,y}$	σ_z②
1:10 万	1:10 万	5m	<4m	20m	30m	16m
1:5 万	1:7 万	2.5m	2m	10m	15m	8m
1:2.5 万	1:5 万	1.2m	1.2m	5m	5m	4m
1:1 万	1:3 万	0.5m	0.4m	2m	1.6m	0.7m
1:5 000	1:1.5 万	0.25m	0.2m	1m	0.8m	0.35m
1:1 000	1:8 000	5cm	10cm	0.5m	0.4m①	0.15m

假定 $\sigma_0=15\mu m$ ①$\sigma_0=16\mu m$ ②$\sigma_{0z}=15\mu m$

6.2.1 机载 GPS 天线相位中心位置的确定

在 GPS 辅助空中三角测量中机载 GPS 天线相位中心位置的确定可分为三步，首先确定各 GPS 历元的机载 GPS 天线相位中心位置，然后再根据摄影机曝光时刻内插得到曝光时刻载波相位的机载 GPS 天线相位中心位置，最后还需将 GPS 定位结果转换至国家坐标系内。

1)各 GPS 历元的机载 GPS 天线相位中心位置的确定

利用安装在航摄飞机上的一台 GPS 接收机和安置在地面参考站上的一台或几台 GPS 接收机同时测量 GPS 卫星信号，通过 GPS 动态差分定位技术可获取各 GPS 历元的机载 GPS 天线相位中心位置。为提高定位精度，一般采用基于载波相位观测值的动态差分定位方法。计算方法可采用最小二乘法或卡尔曼滤波。

2)曝光时刻载波相位的机载 GPS 天线相位中心位置的内插

GPS 动态定位所提供的是各 GPS 观测历元动态接收天线的三维位置，而 GPS 辅助空中三角测量所需要的是某一曝光时刻航空摄影相机的位置。由于曝光瞬间时刻不一定与 GPS 观测历元重合，摄影机曝光瞬间机载 GPS 天线位置必须根据相邻的天线位置内插得到。

如果将曝光瞬间同步记录在 GPS 接收机的数据流中，则曝光时刻机载 GPS 天线位置可由内插解决。现代航摄相机如 WildRC20 等可在曝光瞬间发出一束 TTL 电平的脉冲（一些老的航摄相机改造后也可发出脉冲），这一脉冲可以通过 GPS 接收机的外部事件注记（Event-mark）接口输入接收机中，并在接收机数据流中注记相应的脉冲输入时刻。以该时刻为引数，在相邻的 GPS 观测历元天线位置间内插（或拟合）即可获得曝光瞬间机载接收天线的位置。内插(拟合)精度取决于两方面。一方面是取决于 Eventmark 时标的精度。另一方面则取决于选择的内插(拟合)模型是否与内插(拟合)区段内机载接收天线动态变化相符合。研究表明，

GPS接收机的 Eventmark 时标的精度能达到 $\pm 2\mu s$。因而即使在飞机运动速度高达 200m/s 时，由该时标误差引起的内插误差也仅为 0.4mm，对 GPS 辅助空中三角测量而言，该误差完全可以忽略不计。

主要的内插(拟合)误差与历元间机载接收天线的动态变化有关，为减少内插误差，可采取以下措施：

(1)提高 GPS 数据采样率。数据采样率越高，则观测历元时间间隔越短，机载接收天线运动的描述也越精确。

(2)采用合适的内插(拟合)方法。在 GPS 辅助空中三角测量中，由于飞机的航速较大，GPS数据采样率一般均选择为小于或等于 1s。在航线飞行中飞机一般作近似匀速运动，因而可采用直线内插或低阶多项式拟合模型。实用中发现选择插值时刻前后各两个历元进行二次多项式拟合效果较好。

3坐标转换及高程基准

GPS动态定位所提供的定位结果属于 WGS-84 坐标系，而我们所需空中三角测量加密结果属于某一国家坐标系或地方坐标系的，因而必须解决定位结果的坐标转换问题。在精确已知地面基准站在 WGS-84 系中地心坐标，且已知 WGS-84 系至国家坐标系之间转换参数时，则可将动态定位结果转换为国家坐标系坐标，更为一般的则是采用 GPS 基线向量网的约束平差。约束平差在国家大地坐标系中进行，约束条件是属于国家大地坐标系的地面网点固定坐标、固定大地方位角和固定空间弦长。为进行机载天线位置的坐标转换，必须有两个以上的地面控制点。这些点有国家坐标系或地方坐标系中的坐标，且进行了 GPS 相对定位，其中一控制点在航飞时作为地面基准站，那么以该点为固定点条件进行约束平差，并将求得的欧拉角与尺度比用于转换机载天线一基准站的 WGS-84 系坐标差。

另一个问题是高程基准问题。GPS 定位所提供的是以椭球面为基准大地高，而实际所需要的是以似大地水准面为基准的正常高，高程基准的转换通过测区内若干已知正常高的控制点拟合建立高程异常模型（当测区地形变化较大时应加地形改正）进行。

6.2.2 机载 GPS 天线与摄影机偏心测量

为了不影响 GPS 卫星信号的接收，GPS 天线一般安装在飞机顶部，而航摄仪总是安装在飞机的底部。若将它们之间的偏心分量作为未知参数在光束法平差中解求出来，除要求航摄仪与飞机之间保持刚体结构外，还必须保证有足够数量的控制点，这在一定程度上制约了GPS辅助空中三角测量的发展。由于 GPS 接收天线和摄影机都固定安装在飞机上，在锁定状态下，其间偏心距为一常数 e，且在像方坐标系中三个坐标分量(u, v, w)可以预先测定出来(参见图 6.1.1)，此时天线相位中心与摄影中心之间的变换关系表示为：

$$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \tag{6.2.1}$$

式中：X_A, Y_A, Z_A 为机载 GPS天线相位中心坐标；X_S, Y_S, Z_S 为摄影中心坐标；R 是由像片的三个姿态角决定的定向旋转矩阵，$R = f(\varphi, \omega, \kappa)$。

偏心分量可采用近景摄影测量法、经纬仪测量法和平板玻璃直接投影法测定，这三种方法均可以厘米级精度测定偏心分量。不管采用何种方法测定偏心，一经测定，则认为摄影机相对于飞机机身是一个刚体，只有这样，式(6.2.1)的变换才有意义。而实际上，在航空摄影过程中，为确保摄影机主光轴朝下对准飞行航迹，有时需对安置相机的座架作适当的调整。这些小角度变化可在相机座架上观测得到，并由其所构成的旋转矩阵应当用于前乘偏心分量，即式(6.2.1)应改写为如下形式

$$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} - R \cdot R_C \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \tag{6.2.2}$$

式中，R_C 是由相机座架调整的小角度所构成的旋转矩阵。理论上相机座架调整后的小角度应当记录下来，以便式(6.2.2)使用。这些角度值可由人工方式记录，但由于在航摄飞行过程中，航摄人员本来负担就很重，特别是在低空飞行情况下，有时需要经常调整相机座架。因而航摄人员往往无法逐片记录下这些角度值。目前，国外倾向于开发一种自动记录相机座架调整角度的装置，以改变目前大部分采用人工记录或不记录的局面。从理论上讲，在实际作业中这些小角度的变化必须加以考虑。在无地面控制和四角布设控制点时，偏心分量测定误差对GPS辅助空中三角测量平差结果的影响是不同的。在无地面控制情况下，GPS辅助光束法区域网平差的精度与天线一相机间偏心分量的测定精度密切相关。偏心分量测定误差越小，则区域网平差的精度越高，且偏心分量的平差值越接近真值；在四角步设地面控制时，可抑制偏心分量测定误差的传播，区域网平差几乎与偏心分量的解算精度无关，即使在未测定偏心分量的情况下，也可保证平差结果的精度，且偏心分量的解算精度可达厘米级，即在四角控制下，GPS辅助光束区域网平差对偏心分量的测定精度要求不高，实际作业时易满足其精度要求。

6.2.3 OTF在航空摄影测量中的应用

将 OTF方法引入 GPS 航空摄影测量后可进一步提高 GPS 摄影测量的实用性。常规GPS精密动态定位要求飞机起飞前进行静态初始化测量，一方面延长了观测时间，增大了数据量，另一方面也延长了飞机起飞前的等待时间；另外，为尽量避免卫星信号发生周跳或失锁必须要求飞机转弯坡度角小，转弯半径大，加大了飞机航程，延长了航线间隔时间。随着整周模糊度在航解算 OTF 的成功，所述因机载 GPS测量引入的限制都将迎刃而解，航摄飞机可以

像常规航摄那样飞行,机载 GPS接收机也可在飞机到达摄区时打开，减少不必要的数据记录。以下用一个实例说明 OTF 在航空摄影测量中的应用。

1996 年 5 月 16 日、21 日和 22 日,有关人员在北京城区进行了 3 天 GPS摄影测量生产作业,摄区范围为 50×30km,飞行高度 2 500m,摄影相机焦距为 305mm,摄影比例尺为 1:8 000。GPS测量采用三台 Trimble4000SSE 接收机，其中一台置于飞机上，另外两台作为地面基准站(一台置于北京南苑机场,点名为 BAS1 另一台置于北京测绘院行政楼顶,点名为 BAS2),GPS数据更新率为一秒。飞机起飞前进行了半小时的静态测量。根据 5.2 节的方法,我们对 5 月 21 日航摄的 17 条航线采用上述 OTF 方法分别进行了解算,OTF 解算采用宽巷观测值,RATIO 检验值固定为 2,OVT检验值为 10s。各条航线的解算都十分成功。各条航线的 OTF 解算结果见表 6.2.2。表 6.2.2 中航线按时间先后顺序编号；开始时间和结束时间分别对应航摄相机开机和关机时间;OTF 开始时间为 OTF 解算开始时间;历元数为 OTF方法固定整周模糊度所需历元,由于数据更新率为 1s,所需历元数即为所需时间;RATIO 为固定整周模糊度时的 RATIO值;卫星数为解算用到的卫星数。

表 6.2.2 各航线 OTF解算结果

航线	开始时间	结束时间	OTF开始时间	历元数	RATIO	卫星数
1	174235	174711	174200	29	2.3	8
2	175233	175602	175200	10	2.24	8
3	176082	186448	176000	10	3.5	9
4	176975	177338	176950	29	4.9	7
5	177847	178209	178820	17	3.8	8
6	178714	179092	178700	10	2.49	8
7	179621	179990	179600	10	2.1	8
8	180512	180887	180500	10	3.42	6
9	181429	181791	181400	10	2.47	6
10	182320	182730	182300	23	3.10	7
11	183174	183529	182150	72	2.15	7
12	184068	184443	184000	14	3.11	7
13	185020	185413	185000	21	3.80	6
14	185975	186351	185900	20	2.43	6
15	186883	187230	186900	33	5.32	5
16	187790	188122	187750	12	2.49	5
17	188686	189152	188650	11	4.43	5

为进一步验证 OTF 解算整周模糊度的正确性，我们采用了三种检验方法用于比较 OTF 解算整周模糊度的正确性：

(1)比较 OTF 解算模糊度与静态初始化解算模糊度是否相同。

(2)比较 OTF 方法解算的动态基线与常规方法解算的动态基线值是否相同。

(3)计算由不同基准站采用 OTF 方法解算的动态闭合差。

1)模糊度数值比较

直接将 OTF 解算得到的整周模糊度数值与静态初始化得到的整周模糊度比较可以确定 OTF解算是否正确。表 6.2.3 比较了用 OTF 方法计算的 BAS1一机载 GPS、BAS2 一机载 GPS整周模糊度与采用静态初始化得到的整周模糊度，这两种方法的计算结果完全一致。其中 BAS1一机载 GPS 的站间距离为 1.5km,BAS2一机载 GPS 的距离为 12.8km。图 6.2.1给出用 OTF 方法解算得到的各历元基线值与用 TrimvecPlus 软件解算得到的静态基线值的三维较差。从图中可知，一旦整周模糊度正确固定就可获得厘米级的定位精度。

表 6.2.3 OTF解算整周模糊度与静态初始化的比较

卫星号	BAS1 至机载 GPS		BAS2 至机载 GPS	
参考卫星:22	静态初始化	OTF	静态初始化	OTF
3	-1 724 622.012	-1 724 622	-515 782.981	-515 783
14	-280 252.965	-280 253	242 004.037	242 004
18	-1 715 510.033	-1 715 510	-1 865 267.054	-1 865 267
25	690 723.102	690 723	159 910.047	159 910
28	1 399 001.026	1 399 001	-426 861.972	-426 862
29	-826 723.977	-826 724	-222 043.028	-222 043

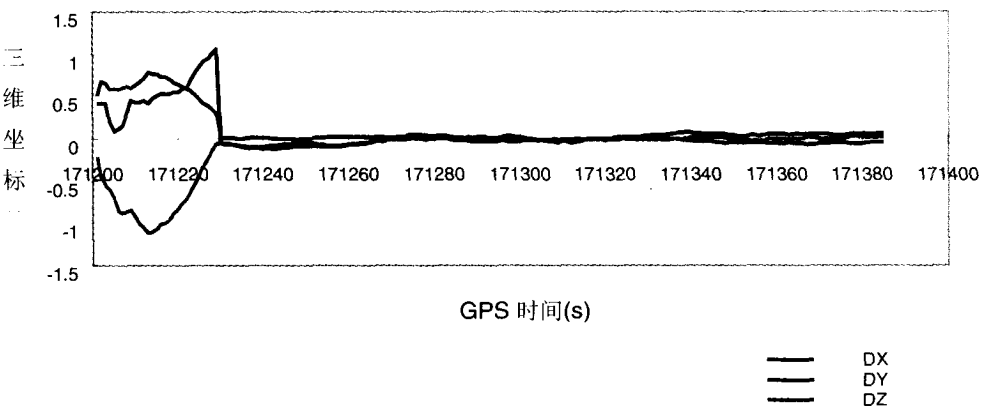


图 6.2.1 OTF 方法解算静态基线与静态基线值之差

2)动态基线比较

由于在飞机起飞前进行了静态初始化，因而可以将 OTF 方法解算得到的动态基线值与常规动态定位解算方法得到的动态基线值比较。两种方法解算的三维坐标差以及飞机距基准站的距离见图 6.2.2。图中竖线表示模糊度固定为整数，从图中可知在整周模糊度正确固定后 OTF 方法解算得到的动态基线值与常规解算方法得到的动态基线值互差小于 10cm。这时飞机距基准站的距离为 40km,飞机航高为 2 500m,与基准站高差大于 2 400m。这证明本文的 OTF方法即使对基线长 40km,高差大于 2 400m 也是行之有效的。

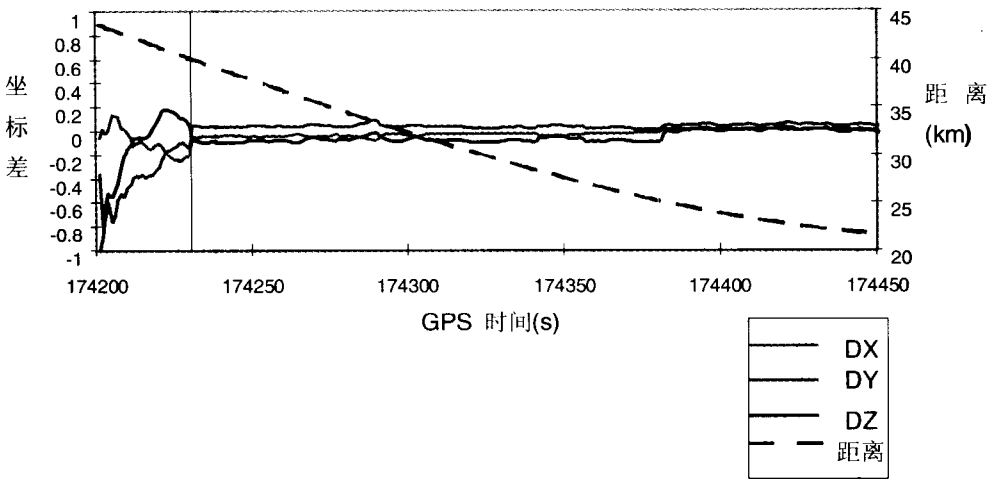


图 6.2.2 OTF 方法解算动态基线与常规方法之差

3)计算由不同基准站采用 OTF 方法解算的动态闭合差

闭合差检验是静态定位中的常用方法,文献[4]将它引入动态定位以检核动态定位的数据质量。根据由不同的地面基准站分别与动态站进行差分解算，解算所得各历元动态基线向量与基准站间的基线构成动态闭合环，其闭合差可以反映动态定位解算的质量。图 6.2.3显示由 BAS1 和 BAS2 分别采用 OTF 方法解算的三维动态闭合差及其动态闭合环总长，竖线分别表示两组差分数据的双差整周模糊度采用前述 OTF 方法固定。由图中可知，仅一组数据整周模糊度固定动态闭合差仍有半米左右，一旦两组数据的整周模糊度正确固定，动态闭合差迅速由半米左右降到 0.1m。值得注意的是这时的闭合环总长为 115km,其中地面基线为 12.8km,两条动态基线平均长约 50km,飞机的航高为 2 500m。进一步表明本文 OTF方法对中距离的动态定位仍十分有效。

机载 GPS测量的数据处理实践表明,OTF 方法能够快速、可靠地解算出动态载波相位测量的整周模糊度,而测得 10cm 精度的飞机在航点位坐标 其 DGPS 站间距可长达 50km,高差

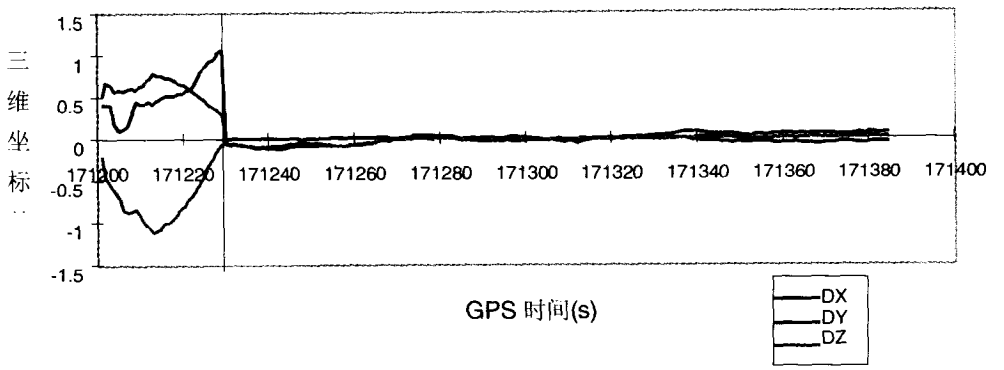


图 6.2.3 OTF方法解算静态基线与静态基线值之差

不低于 2 400m,从而突破了现行 OTF 方法的近距离和低高差的局限。从上述研究成果可见，若能进一步削弱各种系统误差的影响,OTF方法可望推广到 100km DGPS站间距离和 10km 高差的机载 GPS动态载波相位测量场合，开拓高精度 GPS 动态测量应用的新天地。

6.2.4 GPS辅助空中三角测量实验

GPS辅助空中三角测量的最大特点在于所需地面控制点数量很少，其精度满足摄影测量要求,并且能减少航测外业工作量,缩短成图周期,毫无疑问,GPS动态定位技术会对空中三角测量产生巨大的影响，并将带给摄影测量领域一次小的技术革命。

为研究 GPS 辅助空中三角测量的可行性,并进行相应的理论研究、软件开发,尽早将 GPS 辅助空中三角测量用于我国航空摄影测量生产实践，武汉测绘科技大学于 1990年申请了国家测绘局测绘科技发展基金项目 ——GPS用于空中三角测量的试验研究，通过模拟实验、理论分析、软件设计以及对 1994年 5月太原机载 GPS航摄飞行的数据处理和分析，充分证明了 GPS 辅助空中三角测量的可行性和可靠性，该项目已于 1994 年底通过国家级鉴定。为尽早将该技术推向实用，1995 年 7月在天津蓟县地区进行了生产性试验，取得了较满意的加密成果。目前该技术已用于海南省和北京市的航空摄影测量生产，以及黑龙江测绘局 RC10 相机改造后的航测飞行试验，并用于中越边境的航空摄影测量作为中越边境陆地边界谈判的依据。现将其中太原的 GPS 辅助空中三角测量试验介绍如下：

1994 年 5 月在国家测绘局太原航摄机动态试验场进行了机载 GPS 航摄飞行。该试验场为一南北走向大约均为 2.4km 的正方形区域,北高南低,高差大约为 154m,属平原丘陵地。试验区均匀分布有 191 个永久性地面标志点，所有这些标志点均有国家 54 系坐标,精度达到二等点水平。航摄飞行采用中国航空遥感服务公司“里尔 36A',航摄飞机,机上装配 RC-20 相

机，飞行一个架次，历时一个小时，共拍摄了 156张航空像片。

航摄过程中，在飞机上和试验场东南角、中央和机场附近分别安放一台 Trimble 4000SST 双频 GPS 接收机，四台接收机按 2s 数据采样率采集 GPS数据。曝光时刻通过 Eventmark 接口记录在 GPS 数据流中。本次飞行采用主距为 303.86mm 的长焦距 RC-20 航摄相机按 1:5 000摄影比例尺沿试验区南北方向进行摄影，共飞行 4条航线，每条航线 8 张像片。

GPS 动态定位数据利用武汉测绘科技大学研制的 DDKIN高精度 GPS 动态定位软件解算，并按曝光时刻内插后转换至国家 54 坐标系。空中三角测量按经典的自检校区域网光束法平差和 GPS辅助光束法区域网平差两种方式计算（表 6.2.4 ，表 6.2.5）。

表 6.2.4　自检光束法区域网平差结果

平差方案	σ_0 (μm)	精度值(cm)				以像片比例尺计算精度值 (σ_0)			
		XY		*Z*		*XY*		*Z*	
		m	u	m	u	m	u	m	u
密周边布点	10.3	5.4	5.2	22.5	16.0	1.0	1.0	4.4	3.1
四角布点	10.2	7.3	19.1	63.7	216.8	1.4	3.7	12.5	42.5

表 6.2.5　GPS 辅助光束法区域网平差结果

平差方案	σ_0 (μm)	精度值(cm)				以像片比例尺计算精度值 (σ_0)			
		XY		*Z*		*XY*		*Z*	
		m	u	m	u	m	u	m	u
无地面控制	9.7	11.3	23.2	24.0	35.2	2.3	4.8	4.9	7.2
四角布点	10.4	6.5	7.9	23.3	18.1	1.2	1.5	4.5	3.5

* $m=\sigma_0\sqrt{tr(Q_{XY})/n}$ 是以平差获得的物点坐标之协方差矩阵表示的区域网平差的理论精度。

* $u=\sigma_0\sqrt{\sum\Delta_i^2/n}$ 是以野外检查点坐标残差表示的区域网平差的实际精度（$i=X,Y,Z$）。

经典的自检校光束法区域网平差分为两种方案。第一方案采用密周边布点，即于区域的周边平均两条基线布设一个平高控制点，区域中间平均四条基线布设一个高程控制点，全区共布设 12个平高点和 2 个高程控制点；第二方案仅在区域的四角布设 4 个平高控制点。对上述两种方案均采用带 3 个附加参数的自检校光束法区域网平差，根据 94个野外检查点得到表 6.2.4所列平差结果。由表列数据可以看出，密周边与四角布点两种方案的平差精度相比，理论上平面为 1:1.4 ，高程为 1:2.8 ，而实际上平面为 1:3.7，高程为 1:3.7，理论精度与实际精度存在较大的差距。就加密的实地精度而言，密周边布点，平面为 ±5.2cm，高程为 ±16.0cm；四角布点，平面为 ±19.1cm，高程为 ±216.8cm。试验表明，区域网平差平面精度随平面控制点跨距的变化不大，而高程精度极大地取决于高程控制点的跨距。

GPS 辅助光束法区域网平差分为两种方案。一是无地面控制方案，即用机载 GPS天线相

位中心北京 54系坐标取代地面控制点坐标进行平差计算；二是四角布点方案，即用区域四角 4 个平高控制点联合机载 GPS 天线相位中心进行全区带一组漂移误差改正参数的区域网联合平差。根据 103 个野外检查点得到平差结果列于表 6.2.5。由表列数据可以看出，无地面控制方案下的加密实地精度为平面 ±23.2cm，高程 ±35.2cm，但理论精度与实际精度存在着一定的差距。尽管如此，无地面控制的 GPS 空中三角测量仍达到相当高的精度。在四角布点方案下，GPS 辅助光束法区域网平差精度有了显著的提高，其平面达到实地上 ±7.9cm，高程达到 ±18.1cm，且实际精度与理论精度一致。

比较表 6.2.4 和表 6.2.5 可以发现，四角控制下的经典自检校光束法区域网平差方案和无地面控制 GPS 辅助光束法区域网平差方案理论精度与实际精度均存在一定的差距。这表明，这两种方案均存在一定的系统误差。这一系统误差既可能是摄影测量方面的，也可能是 GPS 动态定位结果本身或坐标转换过程中引入的。密周边布点下的经典自检校光束法区域网平差方案和四角控制 GPS 辅助光束法区域网平差理论精度与实际精度相符，表明系统误差已很好地消除，且四角控制 GPS 辅助光束法平差精度几乎接近于密周边布点下经典自检校光束法区域网平差，而所需控制点仅为后者的 29%。随着区域网的增大，该比例将变得更小。综上可见，基于高精度 GPS 动态定位的 GPS 航空摄影测量技术已日趋成熟。我国已在北京市、海南省、中越边境等地区实施了 GPS 航空摄影测量，并将在全国范围内推广。这一技术的推广和应用，无疑会引发测绘业从技术手段到队伍结构的革命性变革，从而产生重大的社会效益和经济效益。

6.3 GPS 支持下的全数字摄影测量系统[5]

全数字自动摄影测量一般采用工作站或高档 PC 机，快速获取地面 DEM。当前技术甚至可以与 GPS 自动空中三角测量系统集成，可形成从外业控制到内业加密和 DEM 生产的更加自动化和高效的作业流程，如图 6.3.1 所示。

实际检测表明，自动数字影像匹配生成 DEM 时，需要采集地貌特征点线的高程数据，才能保证 DEM 的高保真度。同时，在森林覆盖和房屋密集的城区，仍需要相当多的人工干预和编辑工作。

类似图 6.3.1 所述过程，可由数字摄影测量工作站直接生成数字正射影像，作业流程如图 6.3.2 所示。

在地球空间数据框架中(参见第十章)，道路、水系、行政边界等几类地物属于矢量数据，目前通用的说法是数字线划图。通过数字立体摄影测量工作站测绘这几类地物的作业流程如图 6.3.3 所示。

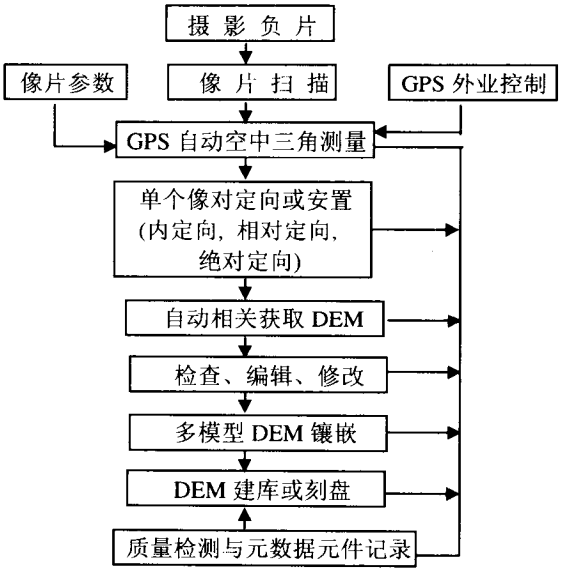


图 6.3.1　全数字自动摄影测量生产 DEM 方法

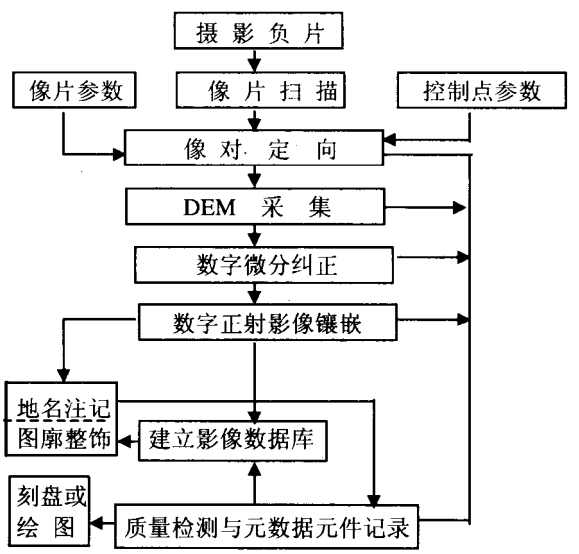


图 6.3.2　全数字摄影测量生产数字正射影像

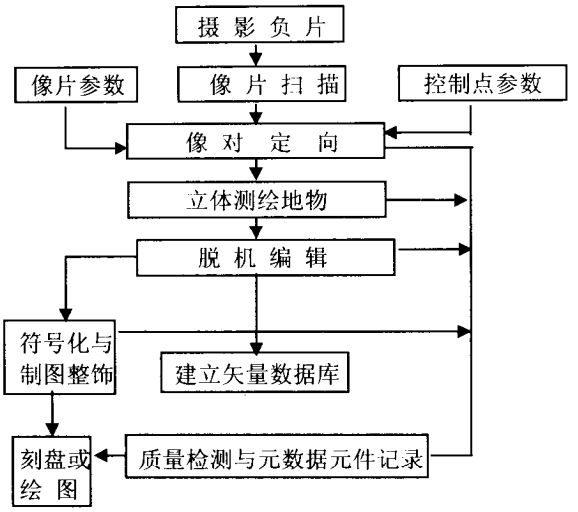


图 6.3.3 数字立体摄影测量生产数字线划图方法

6.4 GPS 辅助光束法平差系统 $WuCAPS_{GPS}$[6]

$WuCAPS_{GPS}$是 Wuhan Combined Adjustment Program System for GPS Navigation Data and Photogrammetric Observations 的缩写。它是在窗口环境下用面向对象 Fortran 语言开发的一个可利用 GPS 导航数据进行摄影测量与遥感高精度点位测定的软件包。它以共线条件方程为核心，将当代基于统计理论的误差随机模型和带附加参数自检校光束法区域网平差函数模型融于一体，利用文献[6]提出的一整套算法而予以实现。目前，该系统正在测绘生产单位、科研部门和学校教学实践中广泛使用。下面予以介绍。

6.4.1 $WuCAPS_{GPS}$ 系统的开发历程

随着测量技术的发展，解析空中三角测量的数学模型（函数模型和随机模型）在不断的改进和完善，其应用已由单一的测图控制加密逐渐拓宽到城市大比例尺测图、地籍测量等各个领域。目前，摄影测量已步入全数字化自动测图阶段，作为为摄影测量作业提供基础大地定向控制的解析空中三角测量，如果依然采用传统的作业模式和国内早在六七十年代开发的航带法、独立模型法平差程序，已跟不上摄影测量发展的步伐，长此以往，很难适应社会可持续发展的需要。计算机技术和信息技术的迅猛发展为我们提供了新的机遇和挑战，因此，研究一种从离

线走向在线、从为较低精度测图目的服务的加密走向高精度的点位测定、从单一的摄影测量观测值平差走向同时利用地面控制条件和导航数据的联合平差软件已势在必行。

自 1984 年起，国际摄影测量与遥感学会第三届委员会曾组织工作组专门从事摄影测量与大地测量观测值联合平差的研究。到 1986 年，西方一些发达国家又开始研究起 GPS 导航数据与摄影测量观测值的联合平差主题。这是各种辅助设备迅速发展并投入使用，以及各学科、各专业间相互渗透的必然结果。这些研究不仅具有很高的学术价值，而且有广阔的应用前景。为了顺应学科的发展并赶上世界先进水平，从 1985 年开始，我们开展了摄影测量与非摄影测量观测值联合平差的专题研究，并着手研制相关软件。十几年过后，终于有了一套完整的联合平差算法并在 WuCAPS 系统中成功实现。

为了适应计算机技术的发展和满足市场的需要，WuCAPS 系统也被一再改版和升级。1985 年,最初用 Fortran 语言分别在大型 SIEMENS 计算机上研制 WuCAPS 系统中的摄影测量与大地测量观测值联合平差主体程序、在小型 VAX—11/750 计算机上开发其数据预处理程序,到 1989 年底才将两者统一于 VAX—11/750 计算机平台上，并以命令行方式运行于 VMS 操作环境下。

90 年代初,微型 PC 机性能价格比空前提高，测绘行业普遍使用了这一现代化计算工具，TurboC 等编程语言也相继问世并被广泛采用。此时，有关人员便在 PC 机上用 C 语言开发了用户操作界面,用 Fortran77 语言将 VAX 机版的 WuCAPS 系统移植到了 DOS 环境下,并以分级菜单方式通过键盘实行对程序的运行和管理。在程序移植的同时，亦开始研究如何在系统中实现 GPS 辅助空中三角测量的功能。从 1994 年起,DOS 环境下的 WuCAPS 微机版陆续开始应用，并在实践中得到不断的改进和完善。

目前，窗口环境下的面向对象编程技术正成为时尚，用它开发出来的应用软件格外受用户青睐,为了能让 WuCAPS 系统在竞争日益激烈的商品大潮中有一个面市的机会。 WuCAPS 系统再次被改版和升级,这便出现了 $WuCAPS_{GPS}$。

6.4.2 $WuCAPS_{GPS}$ 系统的基本功能

$WuCAPS_{GPS}$ 系统是在 PC 微机 WuCAPS 系统的基础上增加部分质量分析功能、并在文献[6]的理论研究成果的指导下不断优化程序结构而逐步得以完善的。图 6.4.1 示意了 $WuCAPS_{GPS}$ 系统的主要功能模块。

从图 6.4.1 可以看出,$WuCAPS_{GPS}$ 系统具有如下基本功能：

1)可用于航带法区域网平差

自 70 年代我国摄影测量加密利用电子计算机取得显著成就以来，航带法和独立模型法区域网平差一直作为进行国家基本图室内控制加密的主要方法延用至今。因此，在 $WuCAPS_{GPS}$ 系统中，我们仍编制了基于二次多项式进行非线性改正的航带法区域网平差程序，以服务于中小比例尺的测图目的和低精度的摄影测量定点需求。

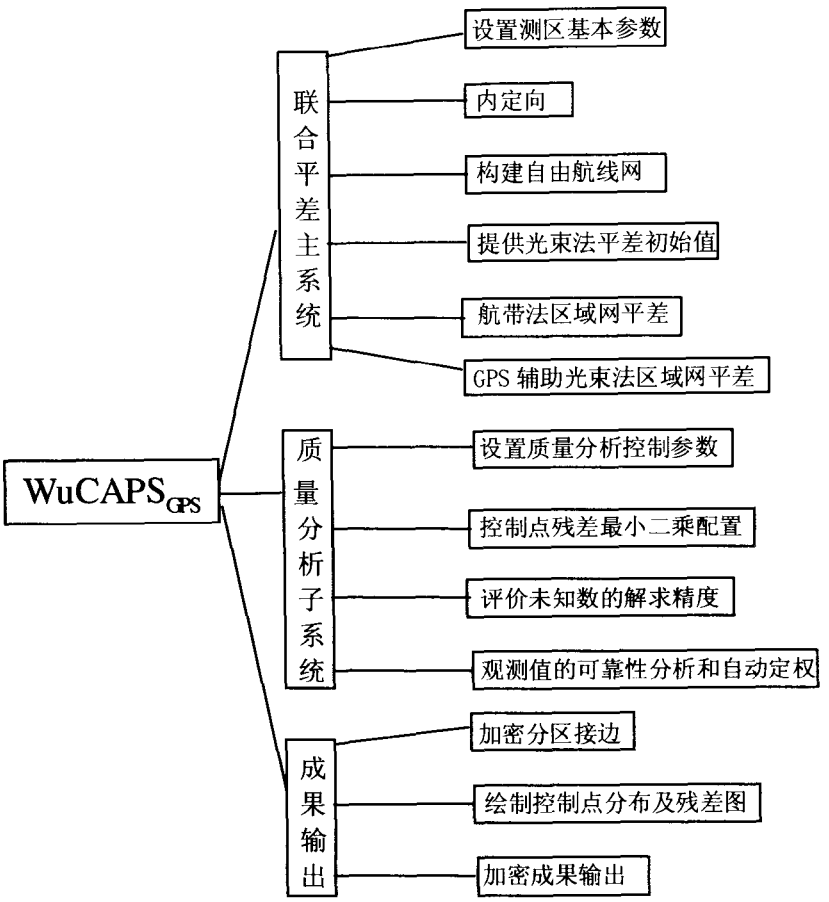


图 6.4.1 *WuCAPS*$_{GPS}$系统的主要功能模块

2)可用于带任选附加参数的自检校光束法区域网平差

光束法区域网平差是摄影测量加密的三种主要方法之一,理论最为严密,然而,历经 1970～1980 年各国摄影测量工作者长达十年的试验研究表明，只有很好地补偿了从航空摄影到像点坐标量测整个信息获取过程中所带来的一系列系统误差才能使区域网平差的实际精度接近预期的理论精度，而且利用带附加参数的自检校光束法区域网平差能有效地在平差过程中自检定并自消除系统误差的影响[7]。因此，WuCAPS$_{GPS}$系统在总结已有研究成果的基础上，在联合光束法区域网平差程序中吸收了带 3 个附加参数的 Bauer 模型、带 12 个附加参数的 Ebner 模型和带 18 个附加参数的 Brown 模型，以供选用。为了满足处理各种不同摄影测量资料和各种目标点定位工作的需要，光束法区域网平差程序可完成以下平差任务：

——控制点视为真值的光束法区域网平差。

——控制点视为真值的自检校光束法区域网平差。

——控制点视为带权观测值的光束法区域网平差。

——控制点视为带权观测值的自检校光束法区域网平差。

3)可与导航数据和／或地面测量观测值进行联合平差

联合平差是指把大地测量原始观测数据和／或其它辅助数据及相对控制条件等视为带权观测值纳入到区域网平差计算中与摄影测量观测值进行整体平差以提高加密的精度或者用以取代地面控制点，这样不但可严格保证平差随机模型的统计性质，而且在理论上也较经典的摄影测量平差严密得多。目前，$WuCAPS_{GPS}$系统可引进如下各类观测值：

—— 像点坐标观测值。一个测区中，允许同时处理最多达 10 台航摄仪的航摄资料。

——大地测量观测值，包括 水准测量、空间距离、水平角及垂直角观测值。

——由全球定位系统 GPS 和惯性导航系统 INS所提供的像片外方位元素观测值。

4) 具有自动剔除粗差的功能

测量作业中，粗差是不可避免的，其存在必然会导致成果的不可靠。摄影测量区域网平差过程中，能自动剔除观测值的粗差是对一个现代平差软件的最基本要求。因此， $WuCAPS_{GPS}$系统中，应用粗差检测理论，针对框标坐标、像点坐标、地面控制点坐标和 GPS 摄站坐标等观测值中的粗差分别加以处理。具体说来，内定向过程中，通过采用带数据探测法（Data Snooping）的相似变换来自动剔除框标坐标观测值中的粗差；构建自由航线网过程中，通过采用带选权迭代法[8]的附模型连接条件的连续法相对定向来自动剔除像点坐标观测值中的粗差；数据准备过程中，通过采用带选权迭代法的三维相似变换来探查地面控制点和 GPS 摄站坐标观测值中的粗差；光束法区域网平差计算中，通过采用带丹麦法[9]的迭代计算来逐步消除前面未被剔除的像点坐标和控制点坐标观测值的粗差。

5)具有补偿系统误差的功能

消除摄影测量观测值中系统误差的影响，是提高摄影测量平差结果精度的一个必要且有效的途径。在 $WuCAPS_{GPS}$系统中，计算之前，采用仿射变换补偿像片变形、坐标轴系不正交等系统误差的影响，并可改正镜头畸变误差；光束法区域网平差过程中，除顾及模型坐标中地球曲率的影响外，还采用了自检校方法来补偿可利用的像片连接点和控制点上所反映出来的系统误差以及 GPS 动态定位所引起的系统漂移误差；光束法平差之后，采用最小二乘配置法来合理配赋地面控制点坐标的残差，较好地解决内、外业成果之间的矛盾，使全部加密成果更好地符合由定向点所决定的坐标系统。当然，这也是摄影测量高精度点位测定对现代平差软件的一个基本要求。

6)可评价未知数的解算精度和观测值的可靠性

精度和可靠性是任何一个摄影测量平差系统质量分析的两个基本因素。有了未知数的协因数矩阵 Q_x，可以计算每一个未知数的解求精度及其相关系数 有了可靠性矩阵就可以进行

平差系统的质量分析、网的优化设计和粗差检测等。为此，$WuCAPS_{GPS}$系统提出了专门的算法,并设计了一个质量分析子系统,用以完成如下任务：

——提供未知数协因数矩阵 Q_x 的全部或部分或仅对角线元素。

——提供平差结果的理论精度。

——提供观测值可靠性矩阵 $Q_{vv}P$ 的全部或部分或仅对角线元素。

——提供观测值的内部可靠性指标——多余观测分量和物方点的构像像片数。

7)可自动确定各类观测值的权

$WuCAPS_{GPS}$系统中可引入多类不同精度的观测值。平差之前根据它们的观测精度或经验可确定各自的权比例，这些数据给得正确与否，可在平差过程中根据各自的验后方差分量反求,据以作必要的修正。在 $WuCAPS_{GPS}$系统中,观测值被分为 11 个大类：

——像点坐标观测值

——地面控制点坐标观测值

——水准测量观测值

——空间距离观测值

—— 水平角观测值

—— 垂直角观测值

——INS 测定的像片姿态观测值

——GPS 测定的 GPS 摄站坐标观测值

——偏心分量观测值

——虚拟附加参数观测值

——虚拟漂移误差改正参数观测值

8)可绘制测区点位分布略图和地面控制点残差图

作为摄影测量平差系统质量分析的另一个重要因素就是应能直观地再现平差的结果。目前,$WuCAPS_{GPS}$ 系统带有一个比较简单的矢量图形输出子系统，可用来在屏幕上显示测区地面控制点的分布和像片位置略图、已知点平面残差图和高程残差图，并可在打印机或绘图仪上输出这些图形。考虑到进一步开发的需要，采用数据文件接口方式与联合平差主系统相联，如果将其与大型绘图仪或数字绘图桌等设备在线作业，还可用于制作分幅地形图的底图，绘制地籍测量界址点和界址线等测绘工作。

9 可进行加密分区的半自动接边

航空摄影测量作业的测区通常较大，内业计算时往往需要将其分成若干个加密分区来进行，而根据航空摄影测量作业规范规定，相邻加密分区的像片连接点坐标必须相等。为此，$WuCAPS_{GPS}$系统提供了一个半自动接边程序。首先，自动找出相邻加密分区的同名点并检查其坐标差是否满足规定的限差 然后,给出建议接边点的信息,待人工干顶后,自动用圈定的接边点坐标求算术平均值，并自动修改邻区同名点的加密坐标；最后以模型为单位输出整个测区

的平差结果。

6.4.3 $WuCAPS_{GPS}$系统的主要特点

$WuCAPS_{GPS}$系统具有下列几个主要特点：

1)平差基于严密的数学模型和高效率的解算策略之上

$WuCAPS_{GPS}$系统以共线条件方程为基础，对像片坐标观测值按以共线条件方程的大角度严密展开式为依据来建立误差方程式，对大地测量观测值按建立在局部切面直角坐标系中的准三维大地测量实用数学模型[10]来处理，对观测值误差的处理采用了基于严格统计理论的粗差探测方法、一系列补偿系统误差的方法以及借助于验后方差分量估计来确定各类观测值权的方法。因而，$WuCAPS_{GPS}$系统乃立足于最严密的带附加参数的联合光束法区域网平差数学模型之上，具有严密的函数模型和随机模型。

摄影测量与非摄影测量观测值的联合平差增加了新得未知数，如果不能将其很好地排列，极有可能破坏原摄影测量平差法方程式的良好结构，从而使法方程的求解计算量剧增。$WuCAPS_{GPS}$系统从稀疏矩阵和图论的理论出发，采用虚拟节点排序策略[10]，对法方程式中的各个未知数进行了合理的编排，从而使法方程系数阵成为具有最优结构的镶边带状矩阵。针对这种结构的法方程，采用循环分块解法，避免了法方程构建和解算过程中大量的零操作，再辅之以改化法方程极小带宽的计算结构使整个法方程的解算具有极高的效率，从而使联合平差能在微机上得以完美的实现。

2)采用巨型数组动态分配技术，使区域中的像片数及像片点数不受限制

计算机的内存是有限的，尤其是微机，而 GPS辅助光束法区域网平差所解求的未知数常常数以千计，有时达上万个。为了充分利用计算机的内存单元，在 $WuCAPS_{GPS}$ 系统中，采用了巨型数组动态分配技术，即将子程序中大量的数组设置为可调数组而依次与主程序中的一维巨型数组相结合，彻底改变了传统航测平差程序中使用定界数组来限制像片数和像点数的编程模式，既避免了计算机内存的浪费，又可保证一定数量未知数的区域网平差能够得以顺利进行，从而使其具有非常强的适应能力。因此，测区中的像片数、每张像片上的点数不受限制，这对于基于多片影像匹配技术自动寻找同名像片连接点以实现自动转点和影像量测的全数字化自动空中三角测量的实现无疑是有利的。此外，它还为用摄影测量方法进行高精度地籍加密以测定大量界址点奠定了基础。

3 用户友好窗口操作界面

随着计算机软硬件的迅速发展，窗口技术越来越得到广泛的应用，它摒弃了传统 DOS 命令行界面操作的繁琐和易出错等缺点，带给了人们一个优美的作业环境，尤其是多线程技术的使用，还可同时处理多项任务以提高计算机的使用效率。虽然 $WuCAPS_{GPS}$系统是一个以计算为主的平差软件，但仍然采用了窗口技术，将各个独立的功能模块集成在一个主窗口下，用户进入系统后只需用按键或鼠标轻点一下菜单标题杠，就可实现程序的运行和文件的管理操作。

此外,为便于数据文件的操作,还专门设置了一个编辑子菜单,以建立、修改、显示、打印原始观测值数据文件和 ASCII 码平差结果文件。当然，对于其它文本文件也可实现同样的操作。

窗口操作界面的使用，使具有纯数学计算性质的 $WuCAPS_{GPS}$系统不再显得那么单调，系统的操作变得更为面向用户、更为方便和简洁,且计算效率更高。

4)计算速度明显加快

Windows95(NT)是一个全 32 位的操作系统,与 16 位的 MS-DOS 操作系统相比，其在数据的存取方式和计算效率上有明显的差异。以我们目前所处理过的最大加密分区——海南岛 II3 测区为例,全区覆盖有 21 条航线,446 张像片,1149 个地面目标点，区域网平差时共有 10796 个观测值,需解求 6255 个未知数。将这一规模的航摄资料放在主频为 200MHz、内存为 64MB、中央处理器为 pentium586 的 PC 机上处理,需花相当长的时间。

表 6.4.1 给出了在两个操作系统下分别用不同版本的 WuCAPS 系统进行 GPS 辅助光束法区域网平差以及仅计算法方程系数矩阵逆阵之对角线元素的结果和所耗费的 CPU 时间。

表 6.4.1 不同版本的 WuCAPS 软件平差结果比较

软件版本	σ_0	理论精度(m)		求逆阵耗	实际精度(m)		平差耗
	(μm)	平面	高程	CPU 时(s)	平面	高程	CPU 时(s)
MS-DOS 下 WuCAPS	24.9	1.107	1.477	20409.05	1.760	1.028	553.70
Windows95 下 $WuCAPS_{GPS}$	24.8	1.107	1.477	5136.07	1.760	1.026	535.31

从上表的数据可以看到，运行于 Windows95 环境下的 $WuCAPS_{GPS}$ 系统与 MS-DOS 操作系统下的 WuCAPS 系统相比，计算精度完全一致，但计算速度却有显著提高。存在大量计算操作的法方程系数矩阵求逆运算速度提高了近 3 倍。

6.4.4 $WuCAPS_{GPS}$系统的数据流程

$WuCAPS_{GPS}$系统采用模块式结构设计而成。每一模块均为一可独立执行的程序单元，但模块之间通过数据文件紧密相连，同一原始观测值数据文件全程共享。

$WuCAPS_{GPS}$系统分为联合光束法区域网平差和成果质量分析两大部分，前者称为“联合平差主系统”,后者称为“质量分析子系统”。两部分通过菜单集成在同一窗口下。

参考文献

[1] 李德仁等 .GPS 辅助全自动空中三角测量 . 遥感学报,1997, 1(4): 306～310

[2] 李德仁 .GPS 用于摄影测量与遥感,测绘出版社,1996

[3] 陈小明,刘基余,李德仁 .OTF 方法及其在 GPS 辅助航空摄影测量数据处理中的应用 . 测绘学报,1997, 26(2): 101～108
[4] 刘基余,陈小明 .The Confidence Evaluation on Kinematic Data. In: IUGG XXI General Assembly, Boulder, Colorado, USA, July, 1995
[5] 李德仁等 . 我国地球空间数据框架的设计思想与技术路线 . 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4): 297～303
[6] 袁修孝 .GPS 辅助空中三角测量及其质量控制 . 武汉测绘科技大学博士学位论文,1999
[7] 李德仁 . 误差处理和可靠性理论,北京 测绘出版社,1998
[8] 李德仁 . 利用选择权迭代法进行粗差定位, 武汉测绘科技大学学报,1984. 9(1)
[9] K.Kubik. An Error Theory for Danish Method, Proceeding of the Symposium, Comm. III, ISPRS, 1982, Helsinki
[10] 单杰 . 摄影测量与非摄影测量观测值的联合平差,北京 测绘出版社,1993

第 7 章　遥感与 GIS 的集成

本章主要探讨遥感与 GIS在空间数据处理过程中各种可能的结合方式。

首先明确了目前遥感与 GIS集成中的一个重要任务就是将 GIS数据直接纳入图像处理；同时提出，解决这个问题应先从空间数据处理的粒度入手，即寻找遥感与 GIS 共同的处理单元。文中给出了将 GIS数据直接纳入图像处理的实例，说明在行程线这个粒度上，已能将遥感与 GIS很好地结合在一起了[1]。

其次探讨了一种趋势面分析方法，就是将典型相关分析和趋势面分析相结合，以构造出一种多元的趋势面，即“典型趋势面”，并借此将遥感图像上若干个变量的空间变化转变为 GIS 中多项式曲面。

本章第三部分借用叠置法，研究如何利用 GIS 的空间数据管理和分析功能，对某些遥感图像的分析结果进行协调。

本章第四部分研究如何依托已建立的 GIS 系统,从遥感影像中快速发现已发生变化的区域,进而实现 GIS数据库的自动／半自动快速更新。

本章第五部分探讨了在遥感与 GIS 集成的基础上实现概念形成的演化过程的基本思路。

最后一部分将介绍基于空间数据挖掘的遥感图像分类方法。

7.1　将 GIS 数据直接纳入图像处理

初期考虑遥感与地理信息系统一体化，把重点放在了以下几方面的内容：1)GIS(矢量)数据与遥感(栅格)图像同时显示；2)能把低级图像处理结果纳入GIS；3)能把图像与矢量数据 GIS 复合的结果纳入 GIS；4)为了支持图像分析和使其发挥作用,能把 GIS 空间分析的结果纳入图像处理软件[2]。经过对这些问题的长期探讨，人们已经知道借助 GIS与图像分析系统之间的某种数据交换格式是实现上述几项内容的主要途径。目前主要的 GIS 与遥感图像处理系统都具有这样的功能。

大量的实际应用表明，通过某种数据交换格式实现 GIS 与遥感图像处理系统之间的结合，仅仅给以上二者提供了较为松散的联系。它的优点是需要增加较少的软件和硬件，实现起来比较容易。但由于它们的结合实际上是由 RS—格式转换—GIS,GIS—格式转换—RS 两个

串行的过程组成,因而显露出几个明显的不足 首先,处理空间数据的效率比较低,这是因为遥感或 GIS 总有一个要处于等待状态；其次，用户需要确切地掌握遥感与 GIS 之间的所有的转换格式，当转换大量数据时相当麻烦；第三，许多空间数据处理功能难以实现。这一点尤其使人不满意。因为前两点虽然要占去大量的时间和劳动量，但工作总还是可以进行的。后一点表明,在处理某些空间数据时,除非专门开发一些软硬件,否则靠现有的这些遥感与 GIS系统就不能完成要做的工作。区域生长过程就是一个非常明显的例子。区域生长（既可用于遥感图像数据，也可用于非遥感的空间数据）是最常见的空间数据处理问题之一，它将属性大致相同的临近像素(或点)组合在一起以形成分割的区域。Brice 等[3]研究了一种以某些规则为基础的区域生长方法。参见图 7.1.1 ,令 R_1和 R_2是周长分别为 P_1 和 P_2 的两个相邻区域,令 C 代表共同边界的长度，D代表 C 中的一部分,ΔY 为D 两边的属性差。若

$$\Delta Y < \varepsilon_1 \tag{7.1.1}$$

$$\frac{D}{\min\{P_1, P_2\}} > \varepsilon_2 \tag{7.1.2}$$

$$\frac{D}{C} > \varepsilon_3 \tag{7.1.3}$$

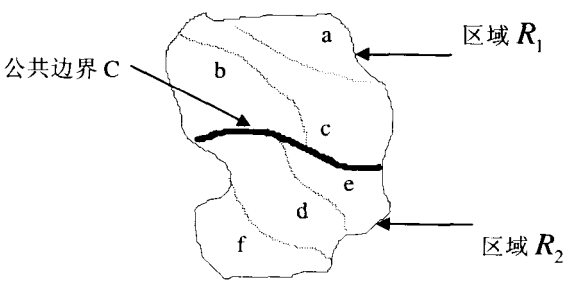


图 7.1.1　区域生长示例

式中,ε_1 是某一有效系数;ε_2 是常数(通常选择 $\varepsilon_2 = 1/2$);ε_3 是另一常数(一般取 $\varepsilon_3 = 3/4$),则区域 R_1和 R_1是合并的。以上判别区域是否要合并的 3 条规则中,式(7.1.1)需要在图像处理系统中进行,因为它涉及对区域 R_1 和 R_2 中每个像元的计算和重新赋值；式(7.1.2)和(7.1.3)则需要在 GIS 中进行,因为它涉及线段的处理、计算和某些空间关系的分析。由于以上 3 条规则要共同的运用才能完成判别的过程，故图像处理功能和 GIS功能要交替或几乎同时使用。这个要求对于现行的图像处理系统和 GIS 系统都是难以满足的。所以如要按 Brice 的方法实现区域生长，就需要附加专门的软件或硬件。但这类问题会经常遇到，若每遇到一次就专门配备某些软、硬件,对用户来说不仅非常麻烦,也很困难,因而在更高层次上探讨遥感与 GIS 的集成问题就显得非常迫切了。

7.1.1 遥感与 GIS 在空间数据处理过程中的结合方式

以上区域生长的例子使我们感觉到，虽然从表面上看遥感系统与 GIS 系统的主要差别为栅格数据与矢量数据的差别，而实际上更深层次的差别主要表现为 GIS 系统所处理的数据是基本上可以控制的。例如，当处理一幅地图时，我们事先一般已清楚图上有多少个点，多少根线，多少个区域，它们具有什么样的属性。但未经分析的遥感图像数据就完全是另外一会事，我们不知到图像上是否有点、线、面，也不知到它们有什么样的属性，当然也就难以直接把它们与 GIS 系统中的数据组合在一起加以处理。目前解决这类问题一般采用两种做法：1)将图像信息经选取、分类、化简上升为符号表示。这个过程的结果是一种“草图”的形式，在此“草图”上，点、线、面的分布已基本上可以掌握，当然它们不一定对应实际的景物。这种做法实际上是把遥感与 GIS 之间的结合局限在图像信息的中高级表现形式上，避开了图像信息的低级表现形式。2)将 GIS 数据作为部分已知条件，经格式转换成为与图像信息的低级表现形式（主要指栅格形式）相一致的形式，也就是成为一种模拟的图像。从形式上看，已经可以利用这种“图像”实现 GIS 数据与低级表现形式的图像信息的结合，并且通常情形下会对图像信息的选取、分类、化简等方面有不同程度的帮助。但这种“图像”从本质上说已经不是 GIS 数据，因为只对它实施图像处理，并不实施 GIS 方面的处理。由此，我们就容易理解为什么不少人把 RS 与 GIS 的结合看成是栅格数据与矢量数据的转换，因为以上两种做法实际研究的是符号的表现形式问题，并未全面地涉及图像数据处理与 GIS 数据处理的结合。

如前所述，许多实际问题已越来越迫切地要求我们在研究符号的表现形式的基础上，进一步探讨遥感图像数据处理过程与 GIS 数据处理过程的结合。如何继续深入地开展这方面的研究呢？先让我们来看一看遥感与 GIS 在空间数据处理和分析的过程中可能存在哪几种结合方式。

依据我们的经验，人们通常总是按以下方式对空间现象进行分析：首先是将特定空间中的景物与背景(如地形、季节等各种自然因素和界限、道路等各种人文因素)组成动态的关系结构 r，并藉此对空间现象进行分析 如果仅依据 r 不足以导致理想的分析结果，人们就会设法追补一组条件 c，直到 r 加上 c 可保证从逻辑推理上导致较为满意的结果。这种思维方式也被充分体现以建立遥感与 GIS 结合为基础的数据处理和分析过程中，借用图 7.1.2 可说明与此有关的过程。在图 7.1.2 中，R 和 R^* 分别代表遥感与 GIS 数据中的动态关系结构，C 和 C^* 分别代表遥感与 GIS 数据中的追补条件，A 和 A^* 分别代表依据遥感与 GIS 数据得到的分析结果。以下根据图 7.1.2 说明遥感与 GIS 中的数据分析过程和相互结合的几种不同方式：(1)将空间数据输入到系统中，从中得到 R 并从系统得到 C，据此进一步得到 A，也就是说整个空间数据分析过程都在图像处理系统中进行；(2)空间数据流向图 7.1.2 中的另一半，从中得到 R^* 及与此有关的 C^*，再得到 A^*，即整个空间数据分析过程都在 GIS 中完成；(3)将 A 与 A^* 相结合，以实现对空间数据的分析。它表现为或把图像处理的结果纳入 GIS 中，或把

GIS 中的结果纳入图像处理系统中。(4)在依据 R 和 C 进行图像分析的过程中，经常直接利用 R^* 和 C^*，以便得到更加满意的分析结果。这就意味着在图像处理系统中可直接运用某些 GIS 功能；(5)事情的另一方面，在 GIS 数据处理和空间分析中直接利用 R 和 C，也就是说某些图像处理和分析功能就像 GIS 系统软件一样能正常地运行在 GIS 中；(6) R 与 R^* 及 C 与 C^* 越来越相似，以至于图像处理和分析过程与 GIS 数据的处理和分析过程已没有明显的差别，或者说它们就是一个系统。前 3 种情形是目前遥感与 GIS 之间的主要实际关系，其中，前两种为遥感与 GIS 相对独立的情形，第三种情形是我们熟知的以栅格一矢量转换为基础的遥感与 GIS 的结合。就遥感与 GIS 的实际状况，"(4)"和"(5)"正是目前遥感与 GIS 集成中有待解决的问题，也就是说应逐步地实现在图像处理系统中越来越多地运用 GIS 系统的功能(或者说在 GIS 中越来越多地运用图像处理功能)。至于"(6)"，那是遥感与 GIS 集成中最终追求的目标，如果达到了"(6)"的水平，遥感与 GIS 的集成问题就可以说完全解决了。

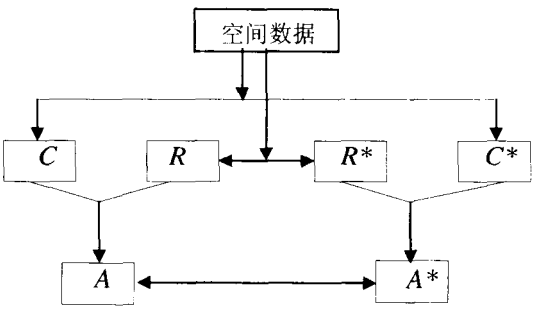


图 7.1.2　遥感与 GIS 中的数据分析过程示意

7.1.2　寻找遥感与 GIS 共同的处理单元

根据以上的讨论，作者认为将 GIS 数据直接纳入遥感图像数据可能是首先应做的事情之一。所谓的"直接纳入"是指在统一的用户界面下，GIS 数据能够作为图像数据的一部分，与其它图像数据一起进行各种图像处理和分析；同时 GIS 数据仍保持其本身的特性，即能对其进行各种 GIS 方面的处理。为了实现这个想法，我们认为应先从空间数据处理系统的粒度人手。这里所说的粒度是指遥感与 GIS 共同的处理单元，如字节、字、页，或复杂数据结构。若处理这些单元需要较强的功能，则称其为大粒度的；反之称其为小粒度的。为了适应面向对象系统中的对象的需要，作者认为可以将粒度与数据类型相联系。随着对象和数据类型大小的变化，粒度大小也随之变化以匹配应用问题。这个过程可通过引进商集加以形式化描述。

定义 7.1.1　设 X 是论域，f 是属性，T 是结构，且在 X 上给定一个等价关系 R，对应于 R 得到商集 $[X]$，并记在 $[X]$ 上建立的结构为 $[T]$，记在 $[X]$ 上提取的属性为 $[f]$。这样就可以把原来的图像分析问题 (X, f, T) 诱导为新的图像分析问题 $([X], [f], [T])$，并称 $(X, f,$

T）为细粒度的图像分析问题，相应地称（$[X],[f],[T]$）为粗粒度的图像分析问题。通常情况下细粒度的问题涉及较小范围的数据，粗粒度的问题涉及较大范围的数据，因而在一定程度上可将它们分别与小粒度和大粒度这两个概念相对应。所以，以上的定义不仅从形式上更加明确了粒度的概念，而且提供了一条获得不同粒度世界的途径：寻找等价关系以求得合适的商集，再得到不同粒度的世界。根据粒度概念将 GIS 数据直接纳入遥感图像数据的过程可具体化为如下的几个方面(参见图 7.1.3)。

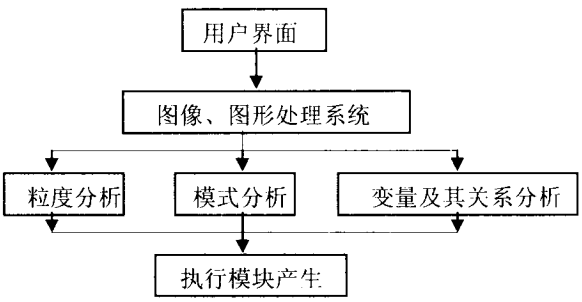


图 7.1.3　GIS 数据直接纳入遥感图像处理过程示意

1)粒度分析

这个过程主要用来确定遥感与 GIS 结合的层次以及结合过程的难易程度。一般情况下，在大粒度(粗粒度)基础上的遥感与 GIS 的结合，层次较高，难度较大；反之，难度较小。

2)模式分析

这里的模式分析不是指将图像上的景物与某些类别对应的过程，而是把遥感与 GIS 结合的过程划分成不同的类型，以便对各个类型采用最适宜的处理方式。

3 变量及其关系分析

遥感与 GIS 在处理不同粒度的数据的过程中，会涉及一系列的输出、输入变量，本过程就是在分析变量之间关系的基础上，对所有的变量进行统一的管理。

4 执行模块产生

在 GIS 数据未纳入遥感图像数据处理之前，二者对应相对独立的处理模块，本过程主要是依据粒度信息、模式信息和变量信息将两个独立的处理模块融为一个可执行模块，用来处理纳入了 GIS 数据的遥感图像数据。

7.1.3　实例与结论

用几何方法构造某种结构是空间规划中的重要内容，其中最值得注意的是，它限定了一批可允许用的测量工具(既可以是实物如直尺、圆规，也可以是计算模型)和能用它们来执行的合法运算的一个集合。正因为此，在空间规划中经常用它来度量和限制各种规划问题的对象，从

中找到解决规划问题的途径。几何结构通常都比较复杂，其中较简单并易于使用的是直线，因此，在用几何方法形成某种结构时，考虑把直线和其上的刻度作为被引入的辅助元素是比较现实的。下面将介绍的一种图像分析方法其基本处理单元就是直线，同时，我们将以此为粒度进一步说明如何将 GIS数据直接纳入图像数据处理中。

如图 7.1.4 所示，图中有 l_1 和 l_2 两根直线，i,j,k,m,n 等区域。现在的问题是要通过在图像上寻找 l_1 和 l_2，进而得到 i,j,k,m,n 等区域。在此，直线 l_1 和 l_2 被称为行程线，是指平行于 x 轴(或 y 轴)的线段，它至少应相切某一等质区的局部最大顶点或最小顶点(通常指沿 x 轴或 y 轴方向)，其起点可以是图廓或等质区的边缘(见图 7.1.4)。区域 i,j,k,m,n 被称为瓦片，它们都处于由行程线和等质区的边缘(或图廓)包围的区域。

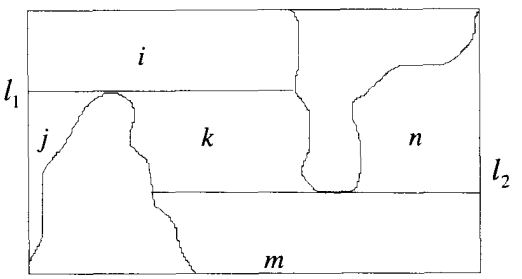


图 7.1.4 行程线与瓦片[4]

如果问题不仅仅是在图像上寻找 $l_1,l_2,\cdots$，而是直接在遥感图像和 GIS 数据两种数据上寻找 l_1,l_2，并进而形成行程线、瓦片，问题就变的比较复杂了。下面我们将按照图 7.1.3 表现的思想来寻找求解问题的途径。

首先要考虑的是粒度，因为它是遥感与 GIS 系统中的共同处理单元，在行程线和瓦片的问题中，基本的共同处理单元就是上面说明的行程线。

其次是遥感与 GIS 结合的方式。为了既方便遥感与 GIS 的结合，又方便行程线和瓦片的分析，作者提出了一种基于超栅格的遥感与 GIS 结合方式。如图 7.1.5 所示，假定存在图像数据(图 7.1.5(a))和 GIS 数据(图 7.1.5(b))。将图像数据在 I 和 J 方向都扩大一倍(图 7.1.5(c))然后，将图 7.1.5(c)中的奇数行、列对应图像数据(图 7.1.5(c)中的数字)，将图 7.1.5(c)中的偶数行、列对应 GIS数据(图 7.1.5(c)中的 * 号)，它就是基于超栅格的遥感与 GIS 的结合。

接下来涉及的是变量之间的关系，这个问题与遥感及 GIS系统在分析行程线和瓦片的过程中基于超栅格结构所采用的具体算法有关。图 7.1.5(c)中的超栅格结构虽仅由两种类型的数据构成：一类是由图中的偶数行、列构成的数据，对应图像数据；另一类是由图中的奇数行、列构成的数据，对应 GIS 中的图形数据，但却涉及三种方式的空间数据处理过程：1) 图像

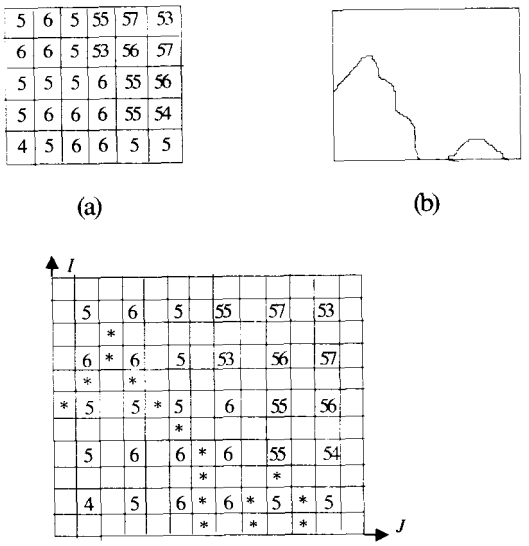


图 7.1.5 遥感与 GIS 的结合方式示意

数据处理,它是对图 7.1.5(c) 中的标有数字的单元构成的数据集合的处理;2)图形数据处理,它是对图 7.1.5(c)中标有 * 号的空格及其它空格构成的数据集合的处理; 3) 图像、图形数据的综合处理,它是对图 7.1.5(c) 中的所有数据进行处理。鉴于这种情况,在设计算法时我们就应考虑到哪些变量与图像数据处理有关,哪些变量与图形数据处理有关,特别是那些与图像、图形数据的综合处理有关的变量,更应引起我们的注意,因为它们最直接地涉及遥感与 GIS 的集成。以下结合我们在分析行程线和瓦片的过程中所采用的算法来说明这些问题。

在确定行程线的过程中,我们首先利用了模板算法[5]。它主要根据模板与图像的局部互相关系数

$$f(i,j) = \lambda(S_1 - S_2)(a - b) \tag{7.1.4}$$

来确定边缘,图 7.1.6给出了式(7.1.4) 中各参数的意义。这里需特别说明一下,s_1 表示模板中的 λ 与图像中的 a 不相一致的部分,s_2 表示二者相一致的部分。

利用模板我们可从图像检测出景物的边缘,检测的结果将被放在图 7.1.5(c)中的奇数行列,因此也就自然成为图形数据的一部分。由于图 7.1.5(c)中的奇数行列原已存放 GIS 中的图形数据,为了区别它与模板测的边缘数据,对图 7.1.5(c) 的奇数行列中的数据分别给予三种不同的标记:仅有 GIS中的数据记为 1,仅有模板测的数据记为 2,两种数据都有记为 3。

第二步是利用 GIS 的功能对图 7.1.5(c) 中的奇数行列进行整理:(1)如果某一封闭图形

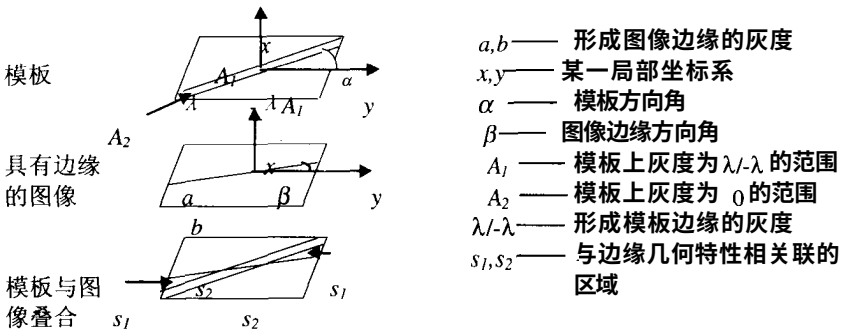


图 7.1.6 图像与模板上的参数

全由记为 3 的数据组成,则保留此图形,因为图像数据和 GIS 数据都证实了这部分数据的存在;(2)如果某一封闭图形部分由记为 3 的数据组成,其它部分由记为 1 数据组成,当记为 3 的数据占一半以上,则保留此图形,否则,去掉此图形;(3)利用 GIS 中的图形检测功能,对记为 2 的数据进行检测,看其是否为新出现的图形,若为新图形则加以标记并更新 GIS数据库。

第三步是在经过整理的图 7.1.5(c)上,利用 8-邻域的定位算子,确定某一图形的局部最大顶点或最小顶点(通常指沿 x 轴或 y 轴方向,但也可以是任意方向)。将检测出的最大或最小顶点加以标记,每个标记代表一条行程线。同时,依据行程线的 x 或 y 坐标,对图像进行分割,并对分割结果予以标记,它们即为瓦片。

从上面的介绍可以看出,上述算法已将图像处理过程涉及的变量与 GIS处理过程涉及的变量联系在一起,同时,图像处理过程和 GIS 处理过程也被合成了一个统一的过程,因而在行程线这个粒度上,RS与 GIS 已被很好地结合在一起了。

7.2 典型趋势面变化自动发现[6]

为了查明所观测的地学数据的空间变化规律,人们经常采用一种称为趋势面分析的方法来处理原始的地学数据。最早运用趋势面分析方法的是英国计量地理学者 P. Haggett[7],他在研究巴西东南森林分布时,根据影响森林覆盖率的自然和人为因素,区分出了局部性的和区域性的两个层次的变化规律;这两个层次的变化,尽管经常交织在一块,但它们却是彼此独立的。后来,将观测值在空间上区域性的变化称为趋势,而受局部影响的变化称为剩余。趋势面分析的任务就是要从两种相互重叠的变化中,将趋势的变化和剩余的变化过滤出来。在遥感地学分析中,这种方法也被经常采用。

由于实际工作需要,往往要对多种地学现象进行观测,在取得多元的原始观测数据以后,

再对由这多种地学现象确定的地表覆盖变化进行分析，这个过程实际上就是多元分析。趋势面分析在处理地学数据时虽然涉及多元分析的数学工具，但实际上是一种一元分析方法。考虑到地学现象的空间分布范围都是有限的，对不同的区域、不同的研究对象，无论是性质还是单元面积、形态等特征都表现出明显的差异，因而有必要结合地学变量组合和空间坐标之间最大相关性质的研究，探讨利用趋势面揭示出一组地学变量共同的空间变化规律。这个问题的处理方案之一,就是将典型相关分析和趋势面分析相结合,以构造出一种多元的趋势面,即“典型趋势面”。它实际上就是应用典型相关分析原理同时表现若干个地学变量的空间变化的多项式曲面。

典型趋势面在某些地学分析中已经被采用，但在遥感地学多元分析方面尚不多见。这一部分将从遥感与 GIS结合的角度就这方面做了一些介绍，主要包括遥感图像上若干个变量的组合及其与 GIS 中空间坐标的关系 应用成组分析方法在 GIS 中构造典型趋势面。目的是将遥感图像上若干个变量的空间变化转变为 GIS 中多项式曲面。

7.2.1 图像变量的组合及其与 GIS空间坐标的关系

为了利用典型相关分析原理获得表现遥感图像上若干个变量的空间变化的多项式曲面，首先要寻找变量的适当组合方式。

关于变量组合实际上并不是一个新问题，因为许多讨论模式识别问题的文献都把模式识别学习问题的基础归结为是要揭示出把图像集合结合成一个模式的某些不变性质。寻找图像的不变性质可以认为是选择某个基本函数,其中,线性多项式

$$f(X) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{n} \alpha_i x_j + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} \gamma_{ijk} x_i x_j x_k + \cdots \qquad (7.2.1)$$

是较为常见的形式。这里 x_i, x_j, x_k是特征量，$f(X)$是不变性质的度量。在这些函数中,模型的复杂化主要靠增加被考虑变量的数量来达到的。图 7.2.1上表示了一个三维空间，它的两个坐标是图像描述元素 x_1和 x_2(特征),而第三个坐标是 $f(x_1, x_2)$ 的值。可以这样来构造不变函数 $f(x_1, x_2)$，使得所讨论的属于同一模式的每个点所对应的坐标 x_1 和 x_2 组成的平面上的各个点有相同的 $f(x_1, x_2)$值。从图 7.2.1可以看出，不论图像的分布特性如何，我们总是可以构造出这样的表面，使得与不同模式对应的表面区域在 f 轴上的投影没有共同点。

不过，由于图像信息具有独特的空间特性和结构特性，仅仅用若干个特征变量组合的函数来表示其不变性质，常常会失去图像信息的空间分布特点或者使其反映不出来。实际上，在遥感图像分析和制图中，已经常把多种现象的多方面质量或数量指标以一定的方法计算后变为合成指标，按某一标准分类分级并用图形表示出来。用这种方法确定地物应该说比用图 7.2.1 划分地物更能让人们直观地感受到地学现象的空间分布特点。但在以往的计算合成指标的过程中，通常都是把研究区域先分成单元，再从图像上获取每个单元的单项变量的数据，然后按照某个经验公式从这些变量得到单一的合成数据，并作为该单元新的数量特征。虽然在这

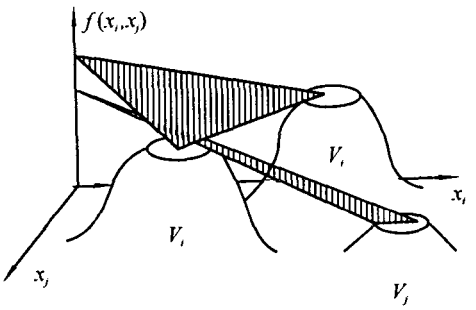


图 7.2.1　不变函数示意

种方法的最后结果上能直观地分析多要素作用的区域并能得到其空间分布的科学认识，但要从数量上了解合成数据在空间上的分布规律和一般趋势就相当困难了。鉴于这种原因，有必要像图 7.2.2所示直接把图像变量的组合（或图像特征组合）与 GIS 空间坐标对应起来。在图 7.2.2 中，xoy 为 GIS空间坐标系统，$f(x,y)$ 为随空间坐标变化的趋势函数，f_0 是 x_0,y_0 点的趋势函数值。

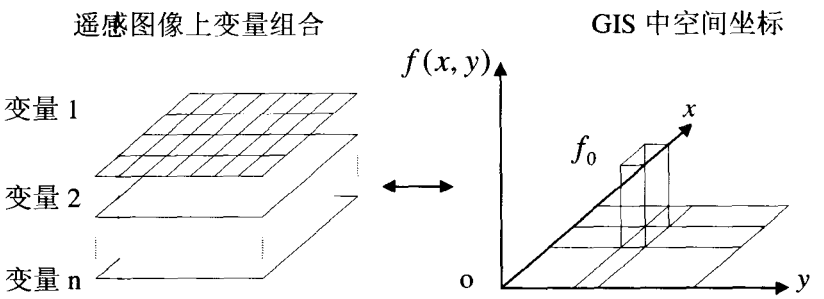


图 7.2.2　图像变量组合与 GIS空间坐标之间的变换

对于不同时期的图像，为了考察这段时间地表覆盖变化，可以先从两个时期的图像上分别确定反映地表覆盖变化的若干个地学变量，然后根据这些变量的组合求得两个时期的趋势函数，即 $f_{t1}(x,y),f_{t2}(x,y)$。假定 $f_{t1}(x,y),f_{t2}(x,y)$已离散化，则某一区域的趋势变化量可表示为

$$V_{变化} = V_{t1} - V_{t2}, \tag{7.2.2}$$

在此，V_{t1}，V_{t2}为两个时期的趋势量。由于两个时期的离散的趋势面位于完全重叠的矩形区域，因此，$t1$、$t2$ 两个时期的趋势量可按下式计算：

$$V_{t1} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} D_x D_y Z_{ij}^{t1},$$

$$V_{t2} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} D_x D_y Z_{ij}^{t2}. \tag{7.2.3}$$

式中，D_x、D_y 分别为离散趋势面在 x，y 方向的网格间距；Z_{ij}^{t1}、Z_{ij}^{t2} 是两个时期的离散趋势值。则

$$V_{变化} = V_{t1} - V_{t2} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} D_x D_y (Z_{ij}^{t1} - Z_{ij}^{t2}). \tag{7.2.4}$$

7.2.2 应用成组分析方法在 GIS 中构造典型趋势面

典型相关分析是一种研究两组变量之间关系的多元分析方法[8]。假定第 j 个模式总共由 $\alpha+\beta$ 变量确定，其中由 α 个变量确定的初始范型为 $e^{\alpha j}$，由 β 个变量确定的初始范型为 $e^{\beta j}$，而向量 $e(\alpha j, w)$，$e(\beta j, w)$ 是分别对初始范型 $e^{\alpha j}$，$e^{\beta j}$ 进行 G_W（部分容许变换集合）变换得到的部分变换范型。则典型相关分析的目的就是要使 $e(\alpha j, w)$ 和 $e(\beta j, w)$ 之间的相关系数达最大值。

设 $Z_{ij}(i=1,2,\cdots,p; j=1,2,\cdots,N; N>p)$ 为来自一个 p 维分布的容量为 N 的随机样本，其样本协方差矩阵为 S。S 为一个正定实对称矩阵。令 Z 为图像变量和 (X, Y) 坐标（及它们的交叉乘积和高次项）。不失一般性，可以假定 Z_i 的平均值为零，即 $E[Z_i]=0$。

将 Z 分成两个子向量 Z_1 和 Z_2，其中 Z_1 为 p_1 个图像变量的向量，而 Z_2 则为 p_2 个 GIS 空间坐标的向量

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix}, \tag{7.2.5}$$

式中，$Z_1=[z_1,\cdots,z_{p1}]$，$Z_2=[z_{p1+1},\cdots,z_p]$.

为方便，假定 $p_1 \leq p_2$。可将协方差矩阵分解为

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix},$$

式中：S_{11} 为 Z_1 的协方差矩阵；S_{22} 为 Z_2 的协方差矩阵；$S_{12}=S_{21}$，为 Z_1 和 Z_2 之间的协方差矩阵。

我们把典型变量 U 和 V 定义为：

$$U = AZ_1, V = BZ_2, \tag{7.2.6}$$

式中，$A=[a_1,a_2,\cdots,a_{p1}]$，$B=[b_1,b_2,\cdots,b_{p2}]$。

我们要求出这样的 A 和 B，使得 U 和 V 的方差为 1，即

$$1 = E[U^2] = E[A Z_1 Z_1 A] = A S_{11} A \tag{7.2.7}$$

$$1 = E[V^2] = E[B Z_2 Z_2 B] = B S_{22} B \tag{7.2.8}$$

$$E[UV] = \mathrm{cov}[UV] + E[U]E[V] = AS_{11}B \tag{7.2.9}$$

因此,问题就是要找出 A 和 B,在满足(7.2.7)和(7.2.8)的条件下使 $E[UV]$,即 U 和 V 之间的相关关系,达到最大值。

令

$$\varphi = AS_{12}B - \frac{1}{2}\mu(AS_{11}A - 1) - \frac{1}{2}\lambda(BS_{22}B - 1) \tag{7.2.10}$$

其中 μ 和 λ 为拉格朗日乘数。求 φ 对 A 和 B 的变量的微分,令导数的向量等于零,并经矩阵代数运算,可以得到

$$\lambda = \mu = AS_{12}B \tag{7.2.11}$$

和

$$(S_{11}^{-1}S_{12}S_{22}^{-1}S_{21} - \Lambda^2 I)A = 0 \tag{7.2.12}$$

矩阵 $S_{11}^{-1}S_{12}S_{22}^{-1}S_{21}$ 是 $p_1 \times p_1$ 的方阵。Λ^2 是 $p_1 \times p_1$ 对角阵。

为解(7.2.12)式,就要求出特征方程

$$| S_{11}^{-1}S_{12}S_{22}^{-1}S_{21} - \Lambda^2 I | = 0 \tag{7.2.13}$$

的特征值 λ_i^2。

由(7.2.11)式可以看出 $\lambda = AS_{12}B$ 是 U 和 V 之间的相关系数。因此,Λ 中的元素 λ_i 称为“典型相关系数”。λ_i 值在零和 +1 之间。

(7.2.6)式中 A_1 的值是对应于特征值 λ_1^2 的特征向量,而 B_1 则可由下式得到

$$B_1 = S_{22}^{-1}S_{21}A_1/\lambda_1 \quad (\lambda_1 \neq 0) \tag{7.2.14}$$

我们从一次多项式开始,通过典型相关分析来估计多项式曲面的次数。如果典型相关系数大于 0.95,或者相继两个典型相关系数之差小于 0.05(可令初始典型相关系数为零),则对应于最大典型相关系数的多项式次数的趋势面是最适宜的拟合曲面。否则,将多项式次数增高一次,直到迭代过程达到适当的次数为止。

通过上面的过程就可将典型相关分析和趋势面分析相结合,在 GIS 中构造出一种多元的趋势面,即“典型趋势面”。它实际上就是应用典型相关分析原理同时表现若干个图像变量的空间变化的多项式曲面。

7.3 在 GIS 中协调遥感图像分析结果

在遥感图像分析中,有一种普遍的作法是先通过图像分析得到各种单要素分析图,然后将多种同比例尺的单要素图应用地图叠置法产生一个新的多边形地图,在此基础上再进行综合分析。随着 GIS 的发展,这种方法也被广泛应用于 GIS 中空间数据的管理和分析。这里我们

打算借用叠置法,利用 GIS 对空间数据的管理和分析功能，对某些遥感图像的分析结果进行协调[9]。

7.3.1 不同专题解译结果的协调

在遥感图像解译中，经常采用的方法是按专题对图像进行解译。这种方法不仅在目视解译中经常被采用，实际上在计算机遥感图像分析中也是常用的方法。采用这种方法的好处是能够深入细致地对各专题进行分析，充分发挥遥感信息的作用。但这种方法也存在某些问题，如各专题的解译结果可能存在矛盾，因而需要对解译的结果进行协调。协调可以在解译之后进行，也可以边解译边协调，但总的来说这样一个过程是一个复杂的过程，需要一个强有力的系统对所涉及的数据和过程进行管理。显而易见，把这样的工作与 GIS 系统相联系是恰当的。下面就一个具体的例子来说明这方面的问题。

假定协调过程是在 GIS 的数据库中进行的，解译的结果由多组数据组成，其中一部分数据之间的关系由表格表示。表 7.3.1 列出了与协调有关的表格，其栏头包括问题的名称，待协

表 7.3.1 不同专题在区域识别上的矛盾

不同专题的区域矛盾	区域标记	专题 1 状态	专题 2 状态
	1	Y	
	2	Y	
	3	Y	Y
	4		Y
	5		Y

调区域的名称，待协调的各专题的名称；表列量则列出相关的数据。在表 7.3.1 中,专题状态 Y表示某个区域被判定具有相应专题的性质。由表 7.3.1 可以看出,区域 3 既被判定具有专题 1 的性质,也被判定具有专题 2 的性质，因而存在区域性质判定上的矛盾。这个问题在图 7.3.1(a)上表现的更为直观。图 7.3.1(a)上的实线圈出了属于专题 1 的类别,可以看出区域 3被包括在内，同时虚线圈出了属于专题 2 的类别,区域 3 也被包括在内,所以区域 3 在属性的确认上具有双重性。为了解决这个问题可以利用图 7.3.1(b) 所示的双树结构。这个结构的左树表示专题 1 中的类别 A 和 3 个区域的关系,右树表示专题 2 中的类别 B 和另外 3 个区域的关系,其中叶结点区域 3为左树和右树所共有。问题解决的过程就是使共有的叶结点（如区域 3)仅为一棵树所具有。然而共有的叶结点到底归哪一棵树，这不能随意指定。处理这样的问题可采用隶属度方法,如果区域 3 对左树的隶属度超过对右树的隶属度，则判定其隶属左树 反之,则隶属右树。进一步的问题是区域 3,4 和 5 同属右树的类别 B,因而在属性上具有相似性,现将区域 3 归属左树，那么属性接近的区域 4 和 5 就应该重新判定,所以在图 7.3.1(b)上,右树的类别 B被去掉,叶结点区域 4和 5 成为孤立结点。

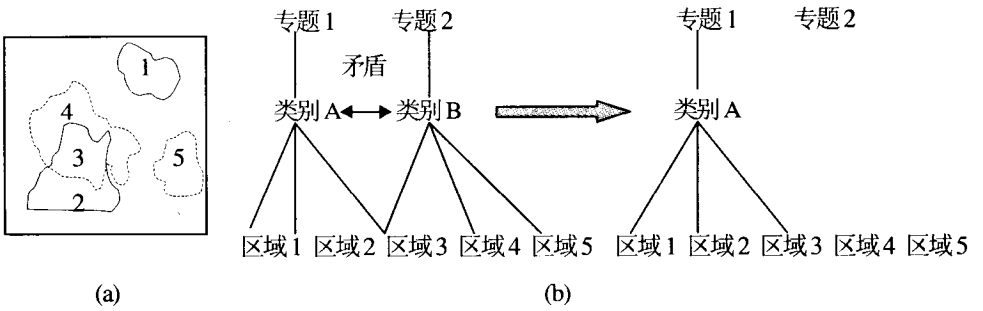


图 7.3.1 专题要素在空间上的矛盾及其解决方法[9]

通过以上的协调,表 7.3.1 被变为表 7.3.2。在表 7.3.2 上的专题 2 状态列中,区域 3 被标记为 N,意味着区域 3 与专题 2 之间的关系被否定;同时在专题 2 状态列中,区域 4 和 5 的标记用问号?代替 Y,说明区域 4 和 5 的属性必须重新判定(通常需要新的信息)。

表 7.3.2 区域属性双重性的解决

不同专题的区域矛盾	区域标记	专题 1 状态	专题 2 状态
	1	Y	
	2	Y	
	3	Y	N
	4		?
	5		?

7.3.2 由不同方法得到的相同专题解译结果的协调

在遥感图像解译中,只要条件许可,应尽可能采用不同的方法对相同的专题进行解译,以便互相作为佐证。如果方法选择恰当,一般情况下对相同的专题应有大致相同的解译结果。当然,由于方法的不同,对相同对象的解译总会存在一定的差别。例如,在图 7.3.2(a)中对林地的解译采用了两种不同的方法。其中第一种方法的边界用实线表示,第二种方法的边界用虚线表示,两种边界不完全相同,它们之间有一定差别。不过,林地的边界在实地通常为一个带,所以两种方法的边界都可能在这个带内,因而很难确定哪一个边界更好。在这种情形下,如果存在另外的如图 7.3.2(b)所示的专题解译结果(假定解译的专题是农田和农作物),则可用这个解译结果作为辅助证据,用以说明两种方法中的哪一个边界更好。从图 7.3.2(b)可以看出,对农田和农作物的解译与林地解译中的第一种方法是矛盾的,因为区域 2 不可能既属于林地又是农田,但二者必居其一。本来这也是一个有待解决的问题,现在正好可以利用这个矛盾说明区域 2 是林地的可能性比区域 1 小,因而林地解译中的第一种方法所得到的边界应当

更好；反过来用林地解译中的第一种方法所得到的结果作为佐证，可以说明将区域 2 确定为农作物更为合理，这样两个问题都得到了解决。这里叙说的过程类似 7.3.1 小节，一般应在 GIS 支持下进行，具体的做法可参见图 7.3.3。在图 7.3.3 的左半部分，林地表现为两个树枝之间的交错 同时，林地和农作物两棵树之间也存在交错。因为林地的方法 1 的两个分枝都存在矛盾，而林地的方法 2 和农作物的类别 C 各存在一个有矛盾的分枝且这两个分枝分别与林地的方法 1 的两个存在矛盾的分枝分别相连，可见林地的方法 1 问题最多，若取消了方法 1 这个结点则所有分枝之间的交错都将消失并且每个叶结点都与根相连。按照这种想法可得到图 7.3.3 的右半部分。这样利用另外专题的具有矛盾的解译结果，既解决了同一专题的不同方法的边界问题，也解决了与另外专题的矛盾。

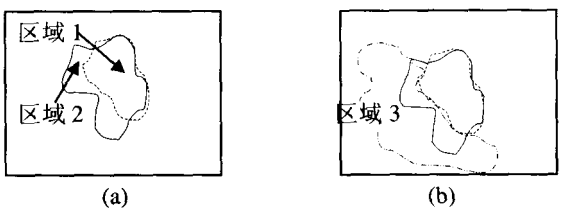


图 7.3.2 采用两种方法对林地进行解译的结果及其协调问题

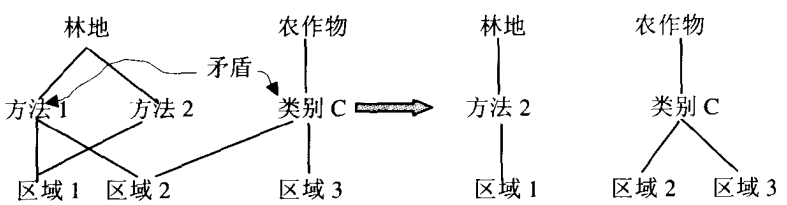


图 7.3.3 用另外专题的具有矛盾的解译结果确定同一专题的不同方法的边界问题

7.4 遥感与 GIS 相结合快速发现地表覆盖变化

实时和可靠的地表覆盖变化信息，对于环境监测和资源保护是很有用的。通过经常性地获取大量详细的区域变化数据，可以对区域的变化范围、大小、时间、速度、特点和趋势等基本参数进行细致分析，这是环境监测和资源保护走向科学化的一个重要前提。

已渐为人们熟悉的遥感影像具有可比较性、综合性和动态性，为快速获取区域变化数据提

供了条件。不过，至今为止对遥感图像的分析还经常需要借助目视解译的方法，这种状况在很大程度上限制了遥感影像在地表动态监测中的应用。改变这种状况有几个途径：一个是提高遥感数据自动分析水平；另一个是把有经验的专家的知识体现在图像处理中；再一个是在遥感数据动态分析中对图像数据及其它相关数据进行有效的管理。这几种途径在思想方法上有显著的差别，但也存在这样几个共同点:(1)需要一个在计算机操作系统支持下的专门用于空间信息处理的系统软件;(2)具有实用的空间数据结构和数据标准;(3)各类空间数据可以得到及时地更新。就现在的技术而言，若要满足这些要求就必须把遥感和 GIS 集成在一起构成一个能在整体上发挥作用的系统。

到目前为止,围绕动态监测的主要任务,包括识别地表变化的位置、性质和变化量等,人们已逐渐习惯于将若干个相关的数字遥感图像处理技术结合在一起使用，并将 GIS 作为支撑软件,初步形成了如图 7.4.1 所示的遥感地表覆盖动态监测系统。在每个变化监测任务的开始，系统吸收多波段图像作为输入。图像差异分析模块将所输入的新图像与从 GIS 系统调出的最近期图像进行配准，然后对两个图像作差异分析，在必要的情况下还进行 K-L 变换和集群分析等，以便产生包含变化信息的中间图像。分析结果被送到变化特征提取模块后，潜在变化区域的有用特征从中间图像被提取出来。这些特征包括变化区域的范围和图像特征，具有不同图像特征的变化区域的百分比等，它们被记录在区域特征记录表里。随后，区域特征记录表传送到变化识别模块，在此借助各种识别算法和某些知识规则，变化的程度、范围和类别被识别。可以想像以上过程若无GIS 系统的支持是很难进行的。

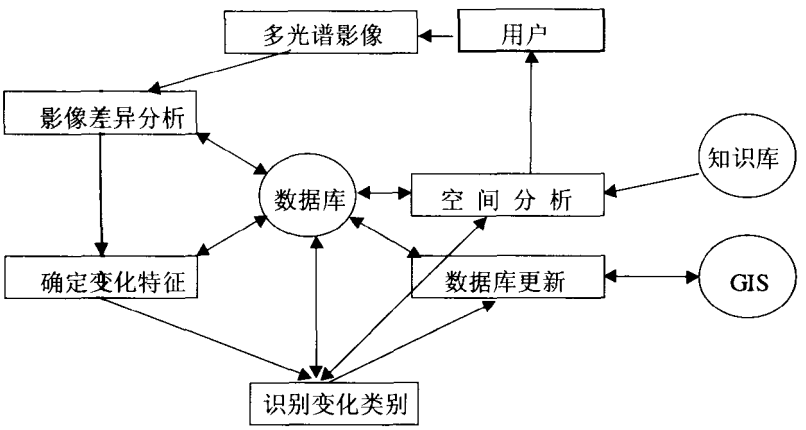


图 7.4.1　遥感与 GIS结合用于地物变化监测和数据库更新示意图

遥感地表覆盖动态监测通常与数据的更新紧密相连。初期以遥感图像目视解译为基本手

段的动态监测，主要是对感兴趣的区域定期（或不定期）地给出一些反映区域变化特征的图件及相关说明。伴随数字遥感图像处理技术的发展，现在这些图件和相关说明一般都以数字形式存放在由 GIS 系统管理的数据库中，更新起来容易得多，除此之外还可以根据用户需要附加许多空间分析功能。

近几年来,依托已建立的 GIS 系统来实现航空、航天遥感图像的全数字化过程，并从中快速发现哪些地区空间信息发生了变化，进而实现 GIS数据库的自动／半自动快速更新,已有一些成果。下面我们就矩形几何在组织空间数据和提取区域空间变化特征中的作用，以及利用统计启发式搜索快速发现变化范围作一些介绍。

7.4.1 矩形几何与区域空间变化特征的提取

线段和多边形是 GIS 中常见的处理对象。在各种线段和多边形中，有一类线段和多边形具有十分特殊的性质。这些线段或者恰好有两个正交方向，或者由这些线段构成的多边形的每两条边之间都具有正交性质[10]。这些特殊的性质启发我们在处理这种特定结构时，建立更有效的特殊的技巧；也启发我们在处理图形或图像问题时，利用这些具有特殊性质的结构去解决问题。

从两个线段集合 S_1 和 S_2 开始,每个集合由平行线段组成,且具有 S_1 的方向和 S_2 的方向相互正交的性质。包含这些线段的直线决定平面的一个由矩形构成的网格。为了便于网格的分析,我们考虑映射 $T:E^d \to E^d$,它把 E^d 变换到它自身。在此，线性映射特别值得我们注意，即用点的老位置的坐标的线性表达式来描述点的新位置的坐标的映射。因此，若$(x_1, x_2, \cdots, x_d)$是点 p 的坐标,则在映射 T 之下，p 的像 p'具有坐标

$$x'_i = \sum_{j=1}^{d} a_{ji}x_i + c_i (i = 1,2,\cdots,d) \tag{7.4.1}$$

上式是仿射映射的一般形式。可以分开考虑 $A = I$(单位矩阵)和 $c = 0$ 两种情形。当 $A = I$ 时,方程变成

$$x'_i = x_i + c_i (i = 1,2,\cdots,d) \tag{7.4.2}$$

它描述了一个变换，在此变换中每点得到一个固定的位移 c,它被称为平移。另一方面,当 $c = 0$ 时,我们得到

$$x'_i = \sum_{j=1}^{d} a_{ji}x_i (i = 1,2,\cdots,d) \tag{7.4.3}$$

即把原点映射到自身的空间线性变换。式(7.4.1)、式(7.4.2)和式(7.4.3)可以为分析线段之间的正交性，网格的变形和多边形的相似性提供许多方便。

正交线段、矩形、网格以及它们的变换与图像中的许多物体或者它们的特征都有关系。例如，农田的田埂、城市的道路、建筑的边缘以及其它一些人文景观大多与线段的正交性或矩形有关。因此，探讨用它们来描述图像中的物体以及它们的变化有重要的意义。下面结合地表

覆盖变化的探测，介绍如何利用正交线段、矩形、网格以及它们的变换从遥感图像上获取图像中物体的变化信息。

1)获取不同时间图像的平均状况

许多情形下，地表覆盖变化的一般趋势并不能由单个时间的图像确定。这就好像在医疗诊断中，不仅要考虑本次疾病还要考虑患者过去曾患过的所有疾病。鉴于这样的考虑，可以将各个时期获取的图像结合在一起，按式(7.4.4)获取其平均状况

$$F_n = aR_{n-1} + (1-a)P_n \tag{7.4.4}$$

式中 a 为结合系数；R_{n-1} 为来自 GIS 系统的已经过处理的与以往历史有关的图像；P_n 为最新的图像。

2 增强历史图像和最新图像

对于历史图像和最新图像通常要根据分析对象的不同采用不同的增强处理。例如，如果我们要获取农田的变化信息，一般要对图像上的田埂进行锐化处理，对其它区域进行平滑处理。这种处理对历史图像和最新图像是相同的，可以写成

$$SF_n = F_n \otimes W \tag{7.4.5}$$

$$SP_n = P_n \otimes W \tag{7.3.6}$$

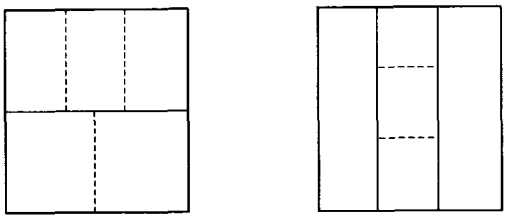
式中，$\otimes W$ 代表某种增强处理，SF_n 和 SP_n 代表处理后的历史图像和最新图像。

3 建立网格系统与图像的关联

许多地物虽然在性质上有很大差别，但有一个共同的特点就是形状常表现为边平行于两个正交方向的一批矩形或网格系统。通过不同年代、不同季节和不同地点的多种类型的遥感图像分析可以发现，由地物的边组成的矩形集合或网格系统处在不断的变化中。这种变化既包括组成矩形集合或网格系统的地物的边的变化，也包括地物本身在性质上的变化。不过，进一步的分析使我们注意到，尽管构成矩形或网格的地物的边处在不断的变化中，但经常变化的只是地物的一些次要的和细小的边，其主要的边具有相对的稳定性。这种相对稳定的边构成的矩形集合或网格系统可以被单独存贮在 GIS 中，在地表覆盖变化分析中用作背景或控制因素。例如，图 7.4.2 中的(a)、(b)两幅图即是从某个区域的遥感图像中抽取出来的矩形集合，其中由粗线表示的边最稳定，由细线表达的边有一些变化，由虚线表达的边变化比较频繁。

4)地物边缘的正交性分析

对历史图像和最新图像分别进行边缘提取，得到如图 7.4.3(见插页)所示的由线段构成的边缘图像。从图 7.4.3 可以看出，我们已利用 GIS 系统将作为控制因素的线段集合分别叠置在 (a)和(b)上（图上用白色加绘的线段），这些数据是通过长期的观测逐步形成的。接下来先利用 Hough 变换将边缘图像上的线段按照角度分成若干组（如按 0°,45°,90°,135°分成四组），再利用式(7.4.1)、式(7.4.2)和式(7.4.3)分析由这些边缘构成的线段与矩形集合中的各个边之间的正交性，当代表地物边缘的线段与矩形的边近似正交，则把它定为候选的地物边界；进一步的工作是将分布在各个矩形内的候选边界按照它们的 Hough 参数进行组织，若被



(a) (b)

图 7.4.2 由地物的边抽取出来的矩形集合

组织在一起的侯选边界其长度小于所在矩形的相关边的长度的 1/2～2/3,则去除这些侯选边。经过以上处理剩下的侯选边界，按照 Hough 参数和相对关系分别被连接在一起，构成新的地物边界。以上处理对历史图像和最新图像分别进行。

5)历史图像和最新图像的比较

历史图像可以按式(7.4.4)得到,它表明随着时间的推移,来自多个不同时间的遥感图像信息将会被越来越概括地体现在历史图像中。从这个意义上说，上面提到的矩形集合和网格系统也可从具有一定信息累积的历史图像中获取。如果缺乏这种数据累积，则矩形集合和网格系统需要从相关地物的长期实际考察中总结出来。

历史图像和最新图像的差别可以简单地表示为

$$D_n = SF_n - SP_n \tag{7.4.7}$$

式(7.4.7)与式(7.4.4)有关,从式(7.4.4)可以看出历史图像和最新图像的差别主要有三种情形。第一种情形表现为历史图像和最新图像具有完全相同的部分，说明该区域的某些地物或者它们的特征在一个相当长的时间内很少有变化；第二种情形表现为历史图像和最新图像在某些特征上基本一样，但另一些特征差别较大，说明该区域的某些地物或者它们的特征正处在变化中，但还具有相对地稳定性；第三种情形表现为历史图像和最新图像完全不一样，说明该区域的某些地物或者它们的特征在短时间内发生了较大变化。这三种情形与图 7.4.2 中的三种不同类型的线划有一定联系。通常第一种情形对应粗线表示的边，第二种情形对应细线表达的边,第三种情形对应虚线表达的边。

7.4.2 利用统计启发式搜索快速发现变化区域

未经解译的遥感图像虽具有丰富的信息，但其意义通常是不明确的并且没有充分的结构化。这两点都说明直接从遥感图像上发现变化的区域和范围比较困难。鉴于这样的原因，可以将 GIS 中的背景信息作为一种结构提供给待分析的图像。不过，GIS 提供的背景信息一般只能降低从遥感图像上发现变化的区域和范围的难度，并不能完全告诉变化的范围和如何去寻找这些变化的区域。也就是说，即使有 GIS 提供的背景信息，若要从遥感图像上较快地发

现变化的区域还需要一定的启发式知识。

利用启发式知识发现变化的区域与启发式搜索有关，常需要定义一种能反映求解路径优劣程度的数值函数 $f(\cdot)$，作为比较选择的参考。此函数一般被称为评价函数。最常见的基于评价函数的搜索方法是‘最佳优先’搜索(又称 BF,即 Best-First 法),即在问题求解空间的每个选择点上,取 $f(\cdot)$ 值最佳的方法进行搜索。近几十年来，人们对启发式搜索进行了一系列研究，取得了不少成果。其中,J. Pearl 引入平均计算量的概念和搜索的概率模型[11],对启发式搜索的研究工作有重要推动作用。

在 Pearl 的搜索的概率模型的基础上,文献[12]利用启发式搜索与统计推断的相似性，提出了一种新的启发式搜索技术,称之为统计启发式搜索技术,简称为 SA 算法。该搜索过程分成两步,首先利用统计推断的方法先判断搜索树(或图)中哪个部分最可能包含有目标,而将包含有目标的可能性很低的那部分（子树）删去。然后在被选出的子树上用通常的启发式搜索技术进行展开，展开到一定程度，再回头判断被选出的子树中哪一个子树最可能包含目标，这样交叉进行直到找到目标为止。由于在搜索过程中加上一个进行全局判断的步骤，而全局判断是基于统计推断技术,也就是利用不同部分之间统计量的‘差异’,而不是利用估计的‘精度’。这样在一定假定下 SA 算法可以避免‘指数爆炸’的困难。

SA 算法由两个重要环节构成。

1)搜索树的模型

设搜索数 G 是一个一致 m _枝树,其起点(根)为 S_0 在深度 N 处有惟一目标 S_N。设对 N 层的每个节点 p 定义一个值 $v(p)$,设目标满足

$$v(S_N) \leq \min_{p\in 第N层} v(p)$$

(若 $v(S_N) < \min_{p\in 第N层} v(p)$,则 S_N 为惟一目标)

设对 G 中任一结点 n,以 $T(n)$ 表示 G 中根于 n 结点的子树。若 n 在第 i 层,有时称 $T(n)$ 为 i-子树。例如,对应图 7.4.4(a) 的层次分割，我们可以得到图 7.4.4(b)的搜索树,在此,n 在第 3 层,因而 $T(n)$ 为 3-子树。

当搜索进行到某一步，记所有已展开的结点构成的子树为 G',称为展开树。$T(n)\cap G'$ 为 $T(n)$中的展开子树。

每个结点 n 都有启发式信息：设对每个 $n\in G$,给定一个函数值 $f(n)$,设 $f(n)$是对 $\{\min_{p\in T(n),p\in 第n层}(v(p))\}$的某种估计。于是 BF 算法就是在开始点中取 $f(n)$值最小者优先展开。例如，日温差是一个可以利用遥感信息获取的相对独立的变量，利用 NOAA AVHRR 的 ch.4 和 ch.5 波段昼夜图像可求得日温差，并可将其作为启发式信息用来确定裸地的存在。这里存在的问题是如何根据日温差建立搜索树。如果在建立搜索树的过程中，不采用统计的方法引入全局信息，必然只能将局部的日温差信息赋给搜索树中的每个节点，这样一来对每个节点上的日温差信息与裸地之间的对应关系就必须相当确定，也就是说用局部日温差信息估计裸地的存

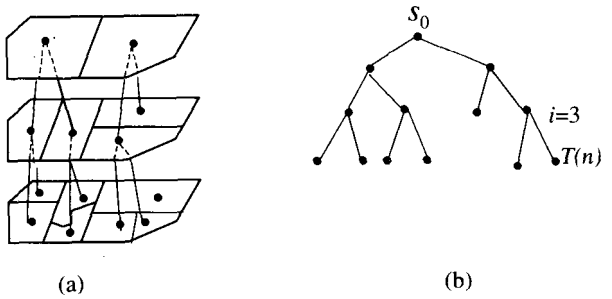


图 7.4.4 空间信息搜索树

在必须达到足够高的“精度”。为了满足这个要求，一般要付出相当大的估算代价。若是在搜索过程中利用不同部分之间统计量的‘差异’,就可以大大减少计算的复杂性,因而利用统计方法获取全局信息并将它与搜索树的结点相对应就成了客观上的要求。

2 提取统计量

要利用统计推断方法,首先要有有关的统计量,以下就是一种从 $f(n)$提取合适的统计量的可行方法。

固定 $n\in G$,令 $T_k(n)$是 $T(n)$中的展开树,且其中已展开的结点有 k 个。令统计量

$$a_k(n) = F(f(p), p \in T_k(n)) \tag{7.4.8}$$

其中 F 是$f(p)$ 的某一组合函数。

每当 $T(n)$中展开一个结点,用上述方法,即可产生一个统计量 $a_k(n)$。以后,若对子树 $T(n)$继续进行观察,即在 $T(n)$中继续展开结点,并按式(7.3.8)计算,可得到统计量的一个新的观察值 $a_k(n)$。

对于图 7.4.4 上的各个结点,可将式(7.4.8)所描述的通过组合函数获得统计量的过程具体化为以下的算法[13]。

先介绍算法涉及的几个概念：

(1)S_i，表示图像上的分割块(2)B_i,表示 S_i 的相邻集;(3)D_i,描述分割块 S_i 的参数;(4)$C_{i,j}=C(D_i,D_j)$,表示由分割块 S_i 和 S_j 的参数确定的分割块之间的组合代价。在以上几个处理对象中，如果是为了快速发现变化的区域,S_i 和 B_i 多半可由 GIS 给出。对于参数 D_i,它一般应包括由图像直接计算得到的统计量 $a_k(n)$,另外,在必要的情况下也包括来自 GIS 的说明。

算法分成下述几个步骤：

①初始化

i) $P^0=\{S_1,S_2,\cdots,S_n\}$(初始分割).

ii)$k=0$和 $m=n$.

iii)对任意 $\forall S_i \in P^0$,计算 D_i 和 B_i.

iv)计算 $CS=\{C_{i,j} \mid S_j \in B_i$ 且 $i>j\}$.

②组合分割块

i)$k=k+1$ 和 $m=m+1$.

ii)发现 $C_{u,v}=\min\limits_{C_{i,j} \in CS}(C_{i,j})$.

iii)$P^k=(P^{k-1} \cup \{S_m\}) \cap \overline{\{S_u, S_v\}}, \overline{\{S_u, S_v\}}$ 为集合 $\{S_u, S_v\}$ 的补集.

iv)从 D_u 和 D_v 计算 D_m.

v) $B_m=(B_u \cup B_v) \cap \{S_u, S_v\}$.

vi) $\forall S_i \in B_m, B_j=(B_j \cup \{S_m\}) \cap \overline{\{S_u, S_v\}}$.

vii) $CS=(CS \cup \{C_{m,j} \mid S_j \in B_m\}) \cap \overline{\{C_{i,j} \mid i,j=u \text{ or } v\}}$.

③组合终止条件

如果不再需要组合则停止,否则,转到步骤②.

在此,对子树 T 进行某种推断,即对 T 对应的统计量 $\{a_k(n)\}$ 进行某种统计推断。$\{a_k(n)\}$ 又称子树统计量或全局统计量。

假如没有任何大气、土壤湿度、太阳高度角或物候差异等存在于两幅数字遥感图像间，它们在没有变化的同一区域将具有同样的数字值，差异值为零；变化的区域将具有正差异值或负差异值。但事实上,由于环境因素的影像,区域是否变化难以被确定 差异值是零 正值或负值也难知道。好在为了快速地发现变化的区域在很多情形下我们不一定要精确地确定变化的量，只需知道区域间变化的差别就可以了。例如，假定两个区域的变化量分别是 10 和 4,而我们利用某种函数将其分别估计为 6 和 -1。这两个估值不仅与真值之间相差很大，连正负都改变了，但是根据这个估计我们仍能正确地发现前者变化较大。为什么不精确的估计也能正确引导我们作出判决呢？这是因为这个估计虽不精确，但它给出了两者的正确差异。由此可见在很多情形下“差异”比“精确”更重要。而统计启发式搜索方法就是利用不同区域之间在统计上的本质差异来正确且快速地引导发现区域变化的过程。

7.5 概念形成的演化过程

一般情况下单纯依靠遥感数据获取对象的概念存在许多不确定因素，因而需要某些与背景有关的辅助信息参与概念形成过程。目前， GIS系统的应用范围已涉及到空间信息的各个方面,如城市、农业、制图、土地、环境等领域的信息都可以利用 GIS 系统来管理,这些具有明确意义的信息都可成为图像中概念形成的重要参考依据。

从第三章所讨论的空间概念形成和我们的日常经验可以知道，概念形成过程不仅涉及到

单个对象的个别示例，还包括这个对象在不同场合的实现，同时也包括单个对象随时间和空间的变化。也就是说，同一对象的概念形成过程在不同的时间和不同的地方可以有所不同，我们称它为概念形成的演化过程。遥感与 GIS 的集成，为在计算机上分析和实现概念形成的演化过程提供了便利。图 7.5.1 表现了在遥感与 GIS集成的基础上实现概念形成的演化过程的基本思路。

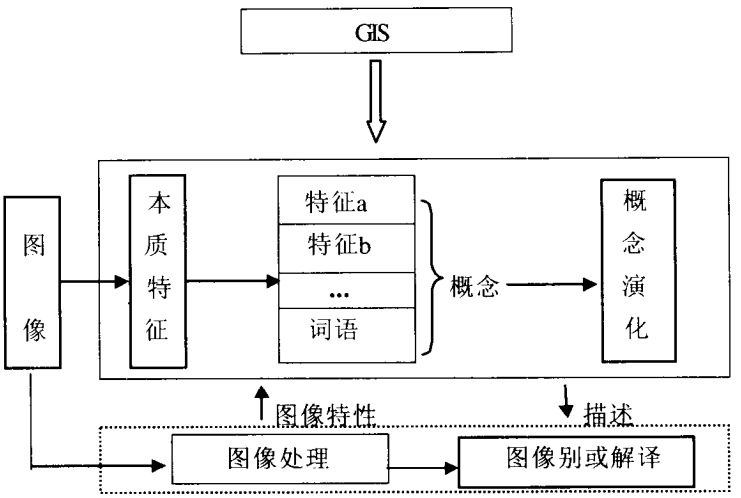


图 7.5.1 在遥感与 GIS的集成的基础上实现概念形成的演化过程的基本思路

图 7.5.1不仅体现了遥感与 GIS 的结合及概念形成与演化过程的结合,还体现了我们的另一个意图，就是要将人类利用空间知识的过程体现在遥感与 GIS技术的利用上,这一点可以从图 7.5.1 的结构上看出。图 7.5.1 可以划分成三个部分,即上部的 GIS 部分,它体现了人类对现有知识的利用；中间部分为概念形成部分，它体现了人类的思维过程；下部是图像处理部分，它体现了人类对视觉信息的感受和处理。我们认为这三者的结合能够较好地反映人类利用视觉信息和空间知识去实现某个特定目标的过程。

为了便于图 7.5.1 中提出的概念形成与演化过程的实现，可以将其分成以下几个子任务加以考虑：

1)形成初始概念

这一任务的主要目标是根据问题的需要，就一些最典型的事例，从图像上抽取出我们感兴趣对象的共同特性并把它们归结在一起。在选取典型的事例时可以充分利用 GIS 系统提供的数据,因为贮存在 GIS 中的数据通常已经过综合取舍，具有一定的代表性。在完成这一任

务的过程中,可以把对象的初始描述 $D_{t_0}^i$ 与初始的学习过程 L_{t0} 相联系并可用下面的公式进行描述[14]:

$$L_{t_0}(i,t_0,X_{t_0,O_i},B) = D_{t_0}^i \tag{7.5.1}$$

$$X_{t_0,O_i} = \langle X_{t_0,P_i}, X_{t_0,N_i} \rangle$$

$$X_{t_0,P_i} = X_{t_0}^i$$

$$X_{t_0,N_i} = X_{t_0} - X_{t_0}^i$$

$$X_{t_0} = \{X_{t_0}^1, X_{t_0}^2, \cdots, X_{t_0}^n\}$$

在此 i 是对象的标记;t_0 是初始时间(或空间);X_{t_0,O_i} 表示由支持第 i 个对象的正例 X_{t_0,P_i} 和反对其成立的反例 X_{t_0,N_i} 构成的事例集合;X_{t_0} 表示由 n 个事例构成的集合;B 表示来自 GIS 的背景信息和知识。式(7.5.1)从形式上说明了在初始时间(或空间)对第 i 个对象依据正例和反例及背景信息进行学习的过程,最后从图像上得到关于第 i 个对象的描述。

通常都是从最具代表性的若干个图像事例中选取一个图像,按照式(7.5.1)叙述的过程得到对象最初的描述,然后再利用其它图像事例去改进学习过程和描述。

2 图像识别或解译

如果在计算机中已就某一种空间现象形成了初始概念,我们就可以利用这种初始概念对新输入的图像进行识别或解译。这一点与目视解译类似,通常人们在解译一个图像之前应对所分析的对象有一个大致的认识。例如,假定要利用 TM 卫星图像识别地物,对象是林网,通过事前或其它地方的了解,已经形成了在 TM 卫星图像上林网常有规则的行间距、周边清晰这样一种初步看法(即某种概念)。如果用 x 表示林网,t 表示现在的时间(或位置),事前的看法用 $D(t-\Delta T)$ 表示,对图像的识别可表达为:

$$R(t,D(t-\Delta T),x) = \langle i,c \rangle \tag{7.5.2}$$

$$\Delta T = \sum_{j=1}^{n} \Delta t_j$$

在此 i 表示图像中的对象;c 表示以事前的看法 $D(t-\Delta T)$ 为基础,在时间(或位置)t,林网 x 与图像对象 i 之间的关联程度;Δt_j 表示在某个概念演化过程中的时间(或空间)间隔;ΔT 表示为形成某个概念所经历的总时间(或空间距离)。

在式(7.5.2)中,$D(t-\Delta T)$ 可具体化为图 7.5.2(a)(见插页)中的格点及其应用方法。对图 7.5.2(a) 中的格点可定义如下的测度:

$$M_r = \sum_{g=0}^{n} g^r p(g) \tag{7.5.3}$$

在此 g 表示灰级,其灰度取值区间为 $0 \sim n$;$p(g) = N(g)/M$,$N(g)$ 是格点中灰级为 g 的像元个数,M 是格点总数。当 $r=1$ 时,M_1 就是均值 μ。对图 7.5.2(b)(见插页)中的图像可用

式(7.5.3)进行测度，其结果即为图像对象 i。若选择了若干个林网样区，根据不同的图像对象 i 与样区之间的相关程度，可得到每一个图像对象 i 的 c 值,它反映了林网 x 这个实际对象与图像对象 i 之间的关联程度。

3)概念的演化

人对事物的认识总是随时间的发展不断深化的，脑海里关于某类事物的概念也总是从粗略到精确。这一点体现在计算机中就是随着训练数据的增加不断修改概念形成的模型和有关概念的描述，这就是概念的演化。利用式(7.5.2)可对由式(7.5.1)表达的初始概念描述加以改造得到式(7.5.4)，它可用来形式地说明概念的演化。式(7.5.4)与式(7.5.1)的区别主要体现在两个方面,一是类似于式(7.5.2)引进了 Δt，它表示在某个概念演化过程中的时间（或空间)间隔;二是引进了 $D(t-\Delta T)$，它表示经历了一段时间以后对模型已经有了新的知识和新的看法。由此可以看出,式(7.5.4)表现了在新的知识基础上对概念模型的演化：

$$L(i,t,X_{\Delta t,O_i},D(t-\Delta T),B)=D^i(t) \tag{7.5.4}$$

$$X_{\Delta t,O_i}=\langle X_{\Delta t,P_i},X_{\Delta t,N_i}\rangle$$

$$X_{\Delta t,P_i}=X^i_{\Delta t}$$

$$X_{\Delta t,N_i}=X_{\Delta t}-X^i_{\Delta t}$$

$$X_{\Delta t}=\{X^1_{\Delta t},X^2_{\Delta t},\cdots,X^n_{\Delta t}\}$$

从上面的叙述可以看出，在概念形成的演化过程中最关键的工作就是通过不断学习逐渐完善概念的描述 $D(t-\Delta T)$。为了实现这个目标，首先应该寻找合适的描述方法，如对应图 7.5.2 中的格点,我们选择式(7.5.3)作为测度，它们二者的结合就是对林网这种空间对象较为合适的描述方法。下面我们将给出一个更加详尽的例子，说明如何寻找有关空间对象的描述方法。

许多地学现象可以用“区域化变量”的空间分布来表征。区域化变量是空间上的一个数值函数，它在空间的每一点取一个确定的数值。由于可认为遥感图像是区域化变量的直观反映，故图像灰度与区域化变量之间存在映射关系。在此，我们认为图像灰度在空间上的分布即为一区域化变量。

区域化变量的重要特征之一是其在空间上的变异，它可用变异函数 $2\gamma(x,h)$ 来表征,其定义为区域化变量的增量平方的数学期望[8].

$$2\gamma(x,h)=E\{[z(x+h)-z(x)]^2\} \tag{7.5.5}$$

在此,x 为空间上的某点,h 表示从 x 到 $x+h$ 的位移向量,$z(x)$ 和 $z(x+h)$ 表示在 x 和 $x+h$ 的区域化变量。一般情况下,变异函数 $2\gamma(x,h)$ 是点 x 和向量 h 二者的函数。因而必须要有随机变量 $[z(x),z(x+h)]$ 的若干个现实 $[z^1(x),z^1(x+h)],[z^2(x),z^2(x+h)],\cdots,[z^n(x),z^n(x+h)]$ 才能对此变异函数进行估计。但在图像上通常却只有一个这样的现实 $[z(x),z(x+h)]$,而这就是在点 x 和 $x+h$ 实际测得的一对图像灰度值（因为图像对应的区域

化变量的取值通常是惟一的、不能重复的),这就使统计推断发生困难。为了克服这个困难,可引进"内蕴假设"。此假设假定变异函数 $2\gamma(x,h)$ 只依赖于分隔向量 h(模和方向)而并不依赖于位置 x。换言之,内蕴假设假定随机函数 $Z(x)$ 的增量 $[z(x+h)-z(x)]$ 是平稳的,它只依赖于 h 而独立于 x。内蕴假设具有充分的实践依据。事实上,随机函数的平稳性只需在局部范围得到证实。

依据内蕴假设,我们就可以用有效数据来估计变异函数 $2\gamma(x,h)$:估计量 $2\gamma^*(x,h)$ 是在以向量 h 相隔的任意两点处的两个实验观测值 $[z(x_i),z(x_i+h)]$ 间的增量平方的算术平均值,即

$$2\gamma^*(x,h)=\frac{1}{N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i+h)-Z(x_i)]^2 \tag{7.5.6}$$

其中,$N(h)$ 是以向量 h 相隔的图像灰度数据对 $[z(x_i),z(x_i+h)]$ 的数目。

在图像空间中,x 代表坐标(x_u,x_v),而 h 代表向量,其模数为 $|h|$,方向为 a。因此 $2\gamma(h)$ 代表对于每一个方向 a 的变异函数 $2\gamma(|h|,a$ 的一个集合.研究了各个方向 a 的 $2\gamma(h)$ 之后即可确定是否存在异向性(例如,变程 $\omega(a)$ 随方向 a 的变异性)。鉴于利用变异函数 $2\gamma(h)$ 可以从图像上获得区域化变量的一些重要特征,因此可以把 $2\gamma(h)$ 看成是一种描述方法,借此得到有关区域化变量的概念。

以下我们将按照求因果的一些方法,利用变异函数进一步探讨区域化变量概念的演化。

(1)推求产生相同图像变异函数的区域化变量

此过程为求同法的应用,大致经过以下 3 个步骤:首先通过各种途径和方法找出产生图像变异函数的各种可能区域化变量(在此确定为岩层方向、岩性和地形)然后,分别比较出现图像变异函数 2γ 的几种不同场合(在此选择图 7.5.3 上的 1、2、3 所表示的区域,见插页);最后,根据比较的结果,排除各种场合中不同的先行条件(区域化变量),找出其中惟一共同的先行条件(区域化变量)A,从而确定该先行条件(区域化变量)为被研究图像变异函数 2γ 出现的原因。

对于图 7.5.3(见插页)上 1,2,3 表示的场合,其图像变异函数相当接近,因而可以认为是相同的,其岩层分向、岩性和地形等变量的变化如表 7.5.1 所示。从表 7.5.1 可以看出,岩层方向是产生表 7.5.1 中所示的变异函数值的主要原因。

表 7.5.1 图像变异函数与区域化变量的联系(1)

场合	先行条件(区域化变量)			图像变异函数
	岩层方向	岩性	地形	(2γ)
1	NE-SW	T_{3s}三迭系上统	1 500—1 600(m)	36
2	NE-SW	T_{2b}三迭系中统	1 400—1 500(m)	9
3	NE-SW	T_{1j}三迭系下统	1 600—1 700(m)	16

(2)推求产生不同图像变异函数的区域化变量

此过程为差异法的应用。它主要是在正、反两种场合考察所研究的图像变异函数。在正面场合(图 7.5.3 上 1),通过对各种先行条件(区域化变量)的考察,筛选出产生图像变异函数 2γ 的可能原因 A(区域化变量)在反面场合(图 7.5.3上的 4),排除 A 这一先行条件(区域化变量),考察 2γ 是否出现。然后,综合正、反两个场合的结果,推断出区域化变量 A 是否为产生图像变异函数 2γ 的原因。

对于图 7.5.3 上的 1,4 场合,可计算其上的图像变异函数(表 7.5.2),因差值较大,可认为是不相同的。而在这两个场合,岩性和地形均未变化,仅岩层方向发生了变化,故可推知岩层方向是表 7.5.2 上变异函数发生变化的主要原因。

表 7.5.2 图像变异函数与区域化变量的联系(2)

场合	先行条件(区域化变量)			图像变异函数 (2γ)
	岩层方向	岩性	地形	
1	NE-SW	T_{3s}三迭系上统	1 500～1 600(m)	36
4	NW-SE	T_{3s}三迭系上统	1 500～1 600(m)	1 936

(3)推求产生部分相同部分不同图像变异函数的区域化变量

此过程为求同差异并用法的应用。它包括:①运用求同法,把图像变异函数 2γ 出现的场合加以比较,得出一个共同的先行条件(区域化变量)A,②再用求同法,考察没有上述共同先行条件(区域化变量)A 的场合下不出现图像变异函数 2γ 的情况。③运用差异法,把图像变异函数出现和不出现的正、反两组的不同场合加以比较,进一步确定哪一个共同的先行条件(区域化变量)是图像变异函数出现的原因。

表 7.5.3列出了图 7.5.3上 1,2,4,5 四个场合下图像变异函数的值,以及相应的区域化变量类型。通过比较,可以进一步确认岩层方向是导致图像变异函数变化的原因。

表 7.5.3 图像变异函数与区域化变量的联系(3)

场合	先行条件(区域化变量)			图像变异函数 (2γ)
	岩层方向	岩性	地形	
1	NE-SW	T_{3s}三迭系上统	1 500—1 600(m)	36
2	NE-SW	T_{2b}三迭系中统	1 400—1 500(m)	9
4	NW-SE	T_{3s}三迭系上统	1 500—1 600(m)	1936
5	NW-SE	T_{2b}三迭系中统	1 400—1 500(m)	2704

(4)推求与图像函数一起发生变化的区域化变量

此过程为共变法的应用。其基本思想是如果当某一先行条件(区域化变量)发生一定变化时。相应的图像函数也随之发生一定的变化,那么该先行条件(区域化变量)就是此相应的图像函数变化的原因。

在另外的图像上选择了 1,2,3 场合,其先行条件(区域化变量)与图像函数的关系被列在

表 7.5.4 上。按照此表，图像函数的变化与岩性有关。

表 7.5.4 图像函数与区域化变量的联系

场合	先行条件(区域化变量)			图像变异函数 (f)
	岩层方向	岩性	地形	
1	不稳定	T_{1j}三迭系下统	1 400—1 500(m)	155(灰阶)
2	不稳定	T_{2b}三迭系中统	1 400—1 500(m)	200(灰阶)
3	不稳定	T_{3s}三迭系上统	1 400—1 500(m)	170(灰阶)

(5)从部分已知关系推求其它先行条件（区域化变量）与图像变异函数的联系此过程为剩余法的应用。主要内容为：如果已知某一复合的图像变异函数是由另一些复合的先行条件引起的，把两者之间确认的有因果联系的部分减去，则剩下的图像变异函数变化必然是其余先行条件（区域化变量）的结果。

在另外的图像上选择了 1,2,3,4,5,6,7,8 区域,其先行条件(区域化变量)与图像变异函数的关系被列在表 7.5.5上。在第一种场合下，综合 8 个区域的情况，按照前述的推求因果方法，可以推知。图像变异函数的异向性是由岩层的方向性引起的。在第 2 种场合,仍综合考虑 8 个区域的情况,可以推知,图像变异函数与岩性有关,然而,1,2,3,…,8 区域的图像变异函数除随区域而变化且具方向性以外，同时，自西向东异向性增强，应用剩余法可推知与山体稳定性自西向东由不稳定向比较稳定过度有关。我们称此为第 3 种场合。

表 7.5.5 图像变异函数与区域化变量的联系(4)

场合	先行条件(区域化变量)			图像变异函数
	岩层方向	岩性	山体稳定性	
1	√			2γ 具有异向性
2		√		图像函数随区域变化
3	√	√	√	自西向东 2γ 异向性增强

注 √表示此区域化变量与所列出的图像变异函数的特征有关。

以上介绍了一个较为详尽的例子，说明如何寻找有关空间对象的描述方法。借用此方法我们能较好的得到区域化变量的概念及其演化过程。

7.6 基于空间数据挖掘的遥感图像分类方法研究

为了使遥感分类能够利用专家知识并具有逻辑推理的能力，使之更接近人类专家的思维，有的学者尝试用专家系统方法进行遥感图像分类,但经常遇到知识获取的‘瓶颈’问题[15]。传统的知识获取方法是知识工程师与领域专家交谈，由知识工程师按照专家系统要求的格式输入计算机，这通常是一个漫长而反复的过程，并且难免有遗漏，给实用化带来困难。著名的遥

感图像处理软件 ERDAS IMAGINE 的最新版本中，增加了一个称为专家分类器的模块，把专家的知识表达成分类规则，用规则推理的方式实现图像分类，但其规则库的建立仍然是手工方式。

实际上,已建立的 GIS 数据库中就隐藏着大量的可供遥感图像分类用的知识，这些知识中有些属于“浅层知识”,如某一地区有无河流、道路的最大和最小宽度等,这些知识一般通过 GIS 的查询功能就能提取出来 还有一些知识属于“深层知识”,如空间位置分布规律、空间关联规则、形态特征区分规则等，它们并没有直接存贮于空间数据库中，必须通过运算和学习才可能挖掘出来。

空间数据挖掘(Spatial Data Mining,简称 SDM,参见第四章),或称从空间数据库中发现知识，是指从空间数据库中提取用户感兴趣的空间模式与特征、空间与非空间数据的普遍关系及其它一些隐含在数据库中的普遍的数据特征。在文献[16,17]中,作者提出了空间数据挖掘和知识发现的理论和技术框架，并指出空间数据挖掘技术在遥感和 GIS 领域有两个主要应用方面,一是用于 GIS 智能化分析，二是用于遥感图像解译。

空间数据挖掘技术为遥感图像分类的知识获取开辟了一条新途径。已有一些学者在这方面进行了有益的探索,如 Eklund等用 C4.5 归纳学习算法从 TM 图像和地理数据中提取知识，用于土壤盐度分析[18]. Huang 等用 C4.5 算法从 G1S数据和 SPOT 多光谱图像数据中提取知识进行湿地分类[15]。两篇文章中均把地理数据按图像像元大小转换成栅格形式进行学习。数据挖掘特别是其中的归纳学习技术在空间数据库中的实施途径，以及归纳学习与传统图像分类法的结合方式，是值得进一步深入研究的问题。

7.6.1 归纳学习及其在空间数据库的实施途径

可用于空间数据挖掘的方法有很多种[16,17,19],归纳学习(Inductive Learning)是最重要的一种方法，它旨在从大量的经验数据中归纳抽取一般的判定规则和模式。归纳学习的算法有很多种,它们大部分来源于机器学习领域,比较著名的有 Michaski 等的 AQ11、AQ15,洪家荣等的 AE1、AE9,Hunt 的 CLS,Quinlan 的 ID3、C4.5,Clark 等的 CN2 等[20],其中最著名的是 C4.5[21]。C4.5是一种决策树算法,由 ID3算法发展而来,它采用熵来选择属性,分类速度快,适合于大数据库的学习,而 C4.5 在 ID3 的基础上增加了将决策树转换为等价的产生式规则的功能，并解决了连续取值的数据的学习问题。C5.0是 C4.5 的进一步改进版本,它对大数据库的处理更快,并增加了 Boost 等技术。除上述算法之外 Han JiaWei 教授等提出了一种面向属性的归纳方法(Attribute Oriented Induction),专门用于从数据库发现知识,通过概念树的攀升获得概括的高层次的特征规则和区分规则等[16,19],它获取的规则与前面算法得到的规则相比更加概括和抽象,适合人阅读和理解,而 C5.0 算法获取的规则更具体和精确，更适用于遥感图像的计算机分类。因此,本文以 C5.0 算法为基础研究归纳学习在空间数据库的实现。

C5.0 算法要求输入数据的每一个元组有若干个条件属性和一个类别值属性组成，条件属

性值可以是离散值或连续值，类别必须是离散值。C5.0 特别适合从关系数据库中发现知识，数据库的记录作为元组，字段作为属性。而空间数据库比一般的关系数据库要复杂得多，既有图形数据又有属性数据，图形数据中既有矢量数据又有栅格数据，图形数据往往又分成很多图层，所以在空间数据库中实施归纳学习要比一般的关系数据库复杂。

在空间数据库中实施归纳学习，首先要确定把什么作为学习的元组，我们称之为空间数据库学习的粒度问题。我们把学习的粒度分为两种，一种是在空间对象粒度上学习，另一种是直接在像元粒度上学习，空间对象可以是图形数据库中的面、线和点对象，也可以是遥感图像中经过处理和分析得到的面特征(如均质区多边形)和线特征(如边缘线)。像元主要指遥感图像的像元,也指栅格图形的单元。

学习粒度的确定取决于学习的目的，即学习得到的知识做什么用，也取决于空间数据库的结构。以空间对象为学习粒度,可以充分利用空间对象的位置、形态、空间关联等特征,得到对象的分类规则,可用于 GIS 智能化分析和决策支持，也可用于遥感图像分类。这样的规则用于遥感图像分类时，必须先用其它分类方法形成线特征和面特征，才可以进一步应用规则分类。在本文介绍的试验中，先采用贝叶斯分类得到水域均质区多边形，根据从 GIS 数据多边形粒度学习得到的规则进一步分类为河流、湖泊，水库和坑塘。以像元为学习粒度，可以充分地利用像元的位置,多光谱值、高程、坡度等具体而详细的信息,得到的分类规则精确,适合用于图像分类,虽不便直接用于 GIS 智能化分析和决策支持，但可以作为它们的中间过程。两种粒度的学习也各有缺点，像元粒度的学习无法利用形态特征、很难利用空间关联等信息；空间对象粒度学习难以利用对象内部更详细的信息，比如，以多边形为学习粒度就难以利用其内部精确的高程值、坡度值等，而只能用平均值或其它典型值。两种粒度的学习要根据应用选用或结合实用。

确定了学习的粒度即学习的元组后，需要确定学习的属性。在一般的关系数据库中，学习的属性直接取自字段或经过简单的数学或逻辑运算派生出学习用的属性。空间数据库中图形的几何特征和空间关系等一般并不直接存贮于数据库中，而是隐含在多个图层的图形数据中，需要经过 GIS 专有的空间运算和空间分析才能得到归纳学习用的属性。比如。要确定某空间对象所处的高程带，需要应用叠置分析；要确定某空间对象的相邻或相连对象，需要用到拓扑分析；要确定空间对象靠近的对象及对象间的距离，需要缓冲区分析和距离分析；确定某一像元处的坡度和坡向,需要用 DEM 进行地形分析，等等。这些空间运算和空间分析，有些是以矢量格式进行，有些是以栅格格式进行，空间对象粒度的学习更多地用到矢量格式的运算和分析，而像元粒度的学习更多地用到栅格格式的运算和分析。

空间数据库学习样本可以取感兴趣地区的全部数据，当数据量特别大时，为了提高学习速度，也可以采用抽样的方法随机地选取学习样本。选定学习样本后，按照所确定的学习粒度和属性,将学习数据组织成类似于关系数据表的形式,输入到 C5.0 算法中进行归纳学习。C5.0 的输出为决策树和等价的产生式规则，由于产生式规则更便于阅读和应用，通常选用产生式规

则输出。

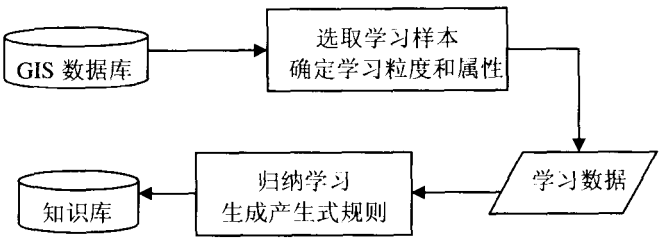


图 7.6.1 空间数据库归纳学习流程图

图 7.6.1 为在空间数据库中实施归纳学习的流程图。需要指出的是，上面提出的学习粒度及属性的确定原则虽然是针对归纳学习而提出的，但同样适用于统计分析、聚类分析、Rough 集、探测性数据分析等多种数据挖掘方法。

7.6.2 归纳学习用于遥感图像分类

目前最常用的遥感图像分类方法是以贝叶斯分类方法为代表的统计方法。贝叶斯分类法又称最大似然法，具有坚实的理论基础，在各类的光谱数据满足统计正态性假设的条件下，理论上能获得最小的分类误差。但贝叶斯分类法无法解决同谱异物、同物异谱的问题。

对于一般的多光谱遥感图像数据，贝叶斯分类法通常能较好地区分大的地类，如水体、居民地、绿地等。土地利用调查则需要更细的分类，如需要把水域进一步细分为河流、湖泊、水库和坑塘等，这是同谱异物问题，需要把绿地分为菜地、果园、林地、草地等，这既是同谱异物问题，也有同物异谱问题。要细分水域，必须利用形态特征和分布规律，而要细分绿地不仅须要利用分布规律，也要利用不同绿地间微弱的光谱差异。因此，在本文介绍的试验中，细分水域的知识学习粒度确定为多边形，细分绿地的知识学习粒度确定为像元。

在像元粒度的学习中，我们提出一种归纳学习与贝叶斯分类法相结合的方法。先用贝叶斯分类法进行初始分类，保留分类得到的像元属于各个类别的概率值，用概率值和位置、高程等构成学习的属性，进行归纳学习。由于类别概率值由像元的光谱值和类别的光谱统计参数计算而来，这样就即利用了像元的光谱信息，又利用了类别的光谱统计信息。用同样的样本，分别用原始的像元光谱值和像元类别概率值与位置、高程属性一起进行归纳学习，用像元类别概率值的学习精度高于用原始的像元光谱值的精度，说明我们提出的这种归纳学习与贝叶斯分类结合的方法是有效的。

在多边形粒度的学习中，归纳学习不利用像元的光谱信息，而是直接从 GIS 数据库中生成学习数据，经过学习生成规则。贝叶斯分类与之平行地进行，取概率值最大的类别为结果类

别，在分类结果图像上经过栅格矢量转换生成均值区多边形，应用归纳学习得到的规则进行推理将同一类的多边行进行细分类。归纳学习与贝叶斯分类的这种结合方式是一种松散的结合。

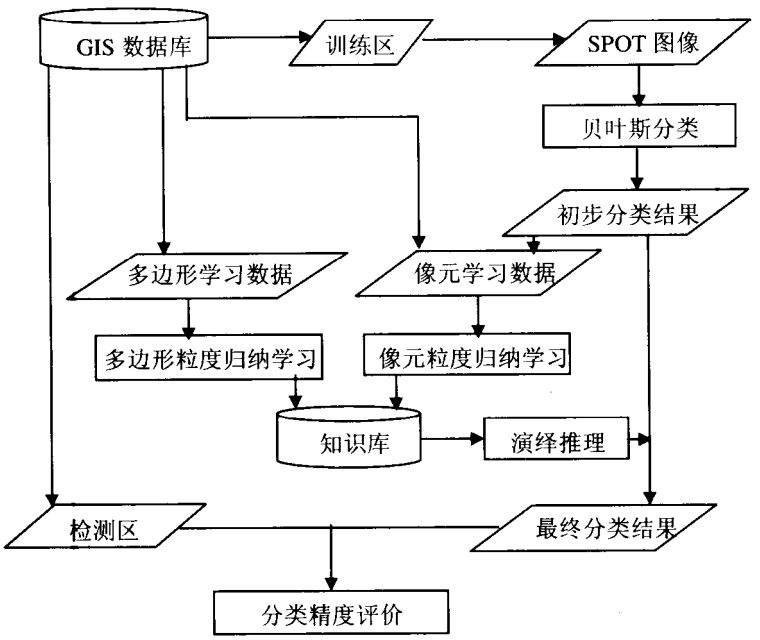


图 7.6.2　应用归纳学习的遥感图像分类流程图

图 7.6.2 为归纳学习用于遥感图像分类时的分类工作流程图。从图中可以看出，在整个过程中 GIS数据库扮演了重要的角色。从 GIS 数据库生成贝叶斯分类的训练区、生成两种粒度归纳学习的样本数据、产生检测区用于图像分类结果的精度评价，再加上遥感图像精纠正时提供控制点，GIS 数据库自始至终都对遥感图像分类起着重要的作用。这一工作流程的技术核心是归纳学习和贝叶斯分类法，归纳学习与贝叶斯分类方法的结合方式同样适用于归纳学习与其它分类方法的结合。

应用知识的过程是一个根据规则进行演绎推理的过程，所需的属性和数据格式与学习时相同，只是没有类别属性。C5.0 得到的结果为一组规则和一个缺省类别，每一条规则附有一个 0 到 1 之间的置信度值。在演绎推理中可采用如下策略：(1)若仅激活一条规则，取规则的

输出类别为结果类别，(2)若同时激活多条规则，则取置信度(总和)高的类别为结果类别；(3)若同时激活多条规则，且类别的置信度(总和)相同，则取学习时覆盖样本多的规则的输出为结果类别；(4)没有规则被激活时，取缺省类别为结果类别。

7.6.3 试验及分析

试验用遥感图像为1996年获取的北京地区一景SPOT多光谱图像，原始图像大小2412×2399像元、三波段，经过拉伸和精纠正后用作图像分类的原始图像(见插页图7.6.3)，纠正后图像大小为2834×2824像元。所用GIS数据库为1996年以前的北京地区1:10万土地利用数据库。所用GIS软件为ArcView3.0a，遥感图像处理软件为ENVI3.0，归纳学习软件为Rulequest公司根据C5.0算法开发的See5 1.10，同时还用C++语言自行开发了部分数据处理和接口程序。

为了便于对比分析，首先单独用贝叶斯分类法进行分类，把精纠正的SPOT图像调入GIS系统中与GIS图层叠加显示，人机交互地选取训练区和检测区，为了保证训练区和检测区具有代表性，它们之间有一些公用的区域。将图像分成水体、灌溉水田、水浇地、旱地、菜地、果园、林地、居民地等八类，分类的混淆矩阵如表7.6.1。可以看出，水域、灌溉水田、水浇地、居民地、菜地分类精度较高，菜地呈亮绿色，与其它绿地区分较好，而旱地、果园、林地均呈暗绿色，光谱差异小，相互错分严重，分类精度低。另外，林地中的部分阴影错分成水域。

表7.6.1 贝叶斯分类混淆矩阵

	实际类别								
分类类别	水域	灌溉水田	水浇地	旱地	菜地	果园	林地	居民地	总和
水域	3.900	0.003	0.020	0.013	0.002	0.021	2.303	0.535	6.797
灌溉水田	0.004	8.496	0.087	0.151	0.141	0.140	0.103	0.712	9.835
水浇地	0.003	0.016	10.423	0.026	0.012	0.076	0.013	0.623	11.192
旱地	0.063	0.480	0.172	1.709	0.361	2.226	2.292	1.080	8.384
菜地	0.001	0.087	0.002	0.114	3.974	0.634	0.435	0.219	5.465
果园	0.010	0.009	0.002	0.325	0.263	4.422	4.571	0.065	9.666
林地	0.214	0.006	0.000	0.271	0.045	1.354	15.671	0.642	18.202
居民地	0.132	0.039	0.127	0.080	0.049	0.168	0.839	29.024	30.459
总和	4.328	9.135	10.834	2.689	4.846	9.041	26.227	32.901	100.00
精度(%)	90.113	93.010	96.204	63.580	81.994	48.913	59.754	88.217	
总精度=77.619% Kappa系数=0.7474									

针对贝叶斯分类结果的分析，可把归纳学习用于两方面，一是细分水域并区分阴影，二是提高旱地、果园和林地的分类精度。前者采用多边形粒度的学习，后者采用像元粒度的学习。选用的GIS图层为土地利用层和等高线层，由于等高线和高程点很稀少，无法插值成DEM，而把等高线层处理成高程带多边形层，分为<50m、50～100m、100～200m、200～500m、>500m

等高程带。

首先进行水域的学习，选取的属性有面积 area、地理位置 Xcoord 和 Ycoord（几何中心位置）、密集度（周长^2/(4π面积)）compactness、所处高程带 height。在此，将高程带 200～500m 和＞500m 合并为＞200m，类别属性值为河流 71，湖泊 72、水库 73、坑塘 74 和阴影 99。用 604 个多边形进行学习，得到 10 条产生式规则（见表 7.6.2），学习精度为 98.8%。这些规则描述了空间分布规律、几何特征规律等，例如，从第一条规则可以看出，密集度这一属性对识别河流起了关键作用；第二条规则用位置和密集度识别湖泊；第九、十条规则用高程识别阴影等。应用这些规则识别阴影并对水域进行细分，仅识别阴影一项，就可以将林地的分类精度提高到 68%，同时减少了水域的误差。

表 7.6.2　归纳学习得到的水域细分规则

```
Rule 1: (cover 19)
        compactness > 7.190882
        height = 1t50
        → class 71 [0.952]

Rule 2: (cover 5)
        Xcoord > 453423.5
        Xcoord <= 455898.7
        Ycoord > 4414676
        Ycoord <= 4428958
        compactness > 2.409397
        compactness <= 7.190882
        → class 72 [0.857]

Rule 3: (cover 33)
        Xcoord <= 455898.7
        Xcoord > 4414676
        Ycoord <= 4428958
        compactness <= 7.190882
        height = 1t50
        → class 72 [0.771]

Rule 4: (cover 4)
        area > 500000
        height = 50 100
        → class 73 [0.667]

Rule 5: (cover 144)
        Ycoord <= 4414676
        compactness <= 7.190882
        height = 1t50
        → class 74 [0.993]

Rule 6: (cover 213)
        Ycoord > 4428958
        compactness <= 7.190882
        height = 1t50
        → class 74[0.986]

Rule 7: (cover 281)
        Xcoord > 451894.7
        compactness <= 7.190882
        → class 74 [0.975]

Rule 8: (cover 38)
        area <= 500000
        height = 50_100
        → class 74 [0.950]

Rule 9: (cover 85)
        height = gt200
        → class 99 [0.989]

Rule 10: (cover 7)
        height = 100_200
        → class 99 [0.778]

Default class: 74

----------------
Evaluation (604 cases):

Errors 7 (1.28)
```

对旱地、果园、林地的学习采用像元粒度，选取的属性有图像坐标、高程带、属于旱地的概率、属于果园的概率、属于林地的概率等，输出为三个类别。从大量的样本中随机地选取 1%（2 909 个）学习，得到 63 条规则，学习精度为 97.9%，另外随机地选取 1%样本进行检测，检测精度为 94.4%。由于篇幅限制，这些规则不再列出。

将两种粒度学习得到的规则对贝叶斯初步分类结果进行处理，得到最终的分类结果。由

于贝叶斯分类无法对水域进行细分，为了便于与单独的贝叶斯分类结果对照比较，对水域细分规则仅用于区分阴影，得到的分类结果图像见图 7.6.4(见插页）。用与贝叶斯分类同样的检测区进行精度检测，混淆矩阵和精度指标见表 7.6.3。从表 7.6.3 中可以看出，旱地、果园、林地的分类精度分别提高到了 69.8%，78.5% 和 91.8%，提高的幅度分别为 6.2%，29.6%和 32.0%，较好地解决了同谱异物和同物异谱的问题，精度提高效果显著。总的分类精度提高了 11.2%，Kappa 系数提高了 0.124 5。

表 7.6.3 归纳学习与贝叶斯分类相结合分类的混淆矩阵

	实际类别								
分类类别	水域	灌溉水田	水浇地	旱地	菜地	果园	林地	居民地	总和
水　域	3.900	0.003	0.020	0.012	0.002	0.019	0.139	0.535	4.631
灌溉水田	0.004	8.496	0.087	0.151	0.141	0.140	0.103	0.712	9.835
水浇地	0.003	0.016	10.423	0.026	0.012	0.076	0.013	0.623	11.192
旱　地	0.063	0.480	0.172	1.877	0.361	2.205	0.149	1.080	4.386
菜　地	0.001	0.087	0.002	0.114	3.974	0.634	0.435	0.219	5.465
果　园	0.009	0.009	0.002	0.210	0.263	7.102	0.470	0.065	8.131
林　地	0.215	0.006	0.000	0.218	0.045	0.696	24.097	0.642	25.899
居民地	0.132	0.039	0.127	0.080	0.049	0.168	0.839	29.024	30.460
总　和	4.328	9.135	10.834	2.689	4.846	9.041	26.227	32.901	100.00
精度(%)	90.113	93.010	96.204	69.811	81.994	78.561	91.561	88.217	
	总精度=88.875 1%				Kappa 系数=0.871 9				

上面从 GIS与遥感集成的角度，研究了从空间数据库发现知识用于遥感图像分类的问题，提出了在空间对象粒度和像元粒度两种粒度上实施空间数据库归纳学习，分析了两种粒度学习的特点和适用范围。同时提出以贝叶斯初步分类得到的类别概率值作为学习属性，将归纳学习与贝叶斯分类法相结合。用北京地区 SPOT 多光谱图像和 GIS数据库进行了土地利用分类的试验，总体分类精度比单独用贝叶斯分类法提高了 11%，果园、林地的分类精度提高 30%左右。试验结果表明，归纳学习能较好地解决同谱异物、同物异谱等问题，显著提高分类精度，并且能够根据发现的知识进一步细分类，扩展了遥感图像分类的能力。

参考文献

[1] 李德仁,关泽群 .将 GIS数据直接纳入图像处理 .武汉测绘科技大学学报,1999,24(1): 1~5

[2] M.Ehler. 遥感与 GIS 朝着一体化空间信息处理的方向发展 . 遥感信息,1991(2): 43~45

[3] CR.Brice, C L Fenema. Scene Analysis Using Regions. Artificial Intelligence, 1970(1): 205~206

[4] P.Holmes, E.Jungert. Symbolicand Geometric Connectivity Graph Methods for Route Planningin Digital Maps. IEEE—PAMI,1992, 14(5): 549~565

[5] D.Brzakovic. Rule-based Multitemplate edge detector. CVGIP,1991,53(3)

[6] 关泽群 . 空间信息学及其应用：典型趋势面变化的自动发现 . 武汉 武汉测绘科技大学出版社, 1998

[7] P.Haggett. Regional and local components in the distribution of forested areas in South East Brazil: a multivariate approach, Geography Journal, 1964,No.130: 365~377

[8] 於崇文等 . 数学地质的方法与应用 . 北京：冶金工业出版社,1980

[9] M.Nagao and T. Matsuyama, A Structural Analysis of Complex Aerial Photographs, Plenum Press, New York,1980

[10] F.P.Preparate and M. I. Shamos, Computational Geometry: An Introduction, Springer-Verlag,1985

[11] J.Pearl, Some Recent Results in Heuristic Search Theory, IEEET rans. PAMI, 1984 6(1): 1~12

[12] 张钹,张铃 . 问题求解理论及应用 . 北京：清华大学出版社,1990

[13] J.M. Beaulieu.Hierarchy in Picture Segmentation: A Stepwise Optimization Approach, IEEE Trans. PAMI,1989, 11(2): 150~163

[14] P.W. Pachowiz.Semi-Autonomous Evolution of Object Model for Adaptive Object Recognition, IEEE Transactions on Man, and Cybernetics, 1994, 24(8): 191~1 207

[15] Huang Xueqiao, John R. Jensen. A Machine-Learning Approach to Automated Knowledge-Base Building for Remote Sensing Image Analysis with GIS Data, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1997, 63(10): 1 185~1 194

[16] Li Deren, DiKaichang, LiDeyi. A Framework of spatial data mining and knowledge dis-

cover, in Proc. Int. Workshop on Image Analysis and Information Fusion (IMF'97), Adelaide. Australia Nov.1997

[17] 邸凯昌,李德仁,李德毅．空间数据挖掘和知识发现的框架．武汉测绘科技大学学报,1997,22(3)：328～332

[18] P. W. Eklund, S. D. Kirkby, A. Salim. Data mining and soil salinity analysis. Int. J. Geographical Information Sciences, 1998, 12(3)：247～268

[19] Li Deren, Cheng Tao. KDG: Knowledge Discovery from GIS-Propositions on the Use of KDD in an Intelligent GIS, in Proc. ACTES, The Canadian Conf. on GIS,1994

[20] 洪家荣．归纳学习——算法、理论与应用．北京 科学出版社,1997

[21] J.R.Quinlan. C4.5 : programs for machine learning, Morgan Kaufmann, San Mateo. CA, 1993

第 8 章　GPS 与 GIS 支持下的车载立体视觉系统

这一章围绕车载 GPS、GIS 和 CCD相机(多传感器)集成系统的设计和实现,对相关的理论和技术问题进行了探讨，并着重介绍了由武汉测绘科技大学设计的移动式测绘系统 WUMMS。

8.1　射影空间中摄影测量基本几何关系式的建立[1]

传统的摄影测量通常在欧氏空间中进行处理。它采用空间直角坐标系，建立起物点与像点之间、像点与像点之间具有直观几何意义的关系式，然后由像点坐标求解物点的空间位置坐标。

在几何上，除了常用的欧氏几何外，还有仿射几何、射影几何等。它们在几何上形成一种包含关系，即欧氏几何是仿射几何的子几何，仿射几何是射影几何的子几何。在不同的几何空间，由于几何条件的不同，对同一个问题的描述方式不同，在处理上的难易程度也不同。几何条件是建立几何空间需满足的条件。如建立欧氏空间其坐标轴之间必须相互正交；建立一个 3D仿射空间,只需要 3个不共面的矢量即可 建立一个 3D 射影空间,只需要任何 4 点不共面的 5个点即可。

射影几何是一种具有更广阔意义的几何。它的产生和发展与相机成像这种中心投影变换密切相关。在射影几何空间中，一些摄影测量的问题能得到更灵活的解决。文献[1]的作者，在空间信息系统的集成研究中，特别对射影空间中的一些摄影测量基本问题作了较深入的研究，建立了一套比较完善的射影摄影测量的基本理论。用该理论解决摄影测量问题时不需要相机内、外方位元素的初始值，在应用上满足了空间信息系统集成中的实时摄影测量对非量测相机的使用以及对摄站位置的任意选取。

这一节主要根据文献[1]介绍在射影空间摄影测量中物像基本关系式的建立，包括物像之间的共线条件关系式、物像之间的直接关系式以及同名像点之间的共面条件关系式。这些关系式是摄影测量处理的基础，它们降低了对像点度量坐标系的要求，其特殊性为摄影测量的其

他处理带来了很多方便,在应用中解决了传统摄影测量在实时处理中的某些困难。

8.1.1 相关的射影几何知识

1) 射影空间与射影坐标

从本质上讲，几何就是研究图形在某种运动之下保持不变性质的一门学科。常用的欧氏几何是研究图形在运动中保持长度不变的几何；仿射几何是研究图形在运动中保持直线的平行关系不变的几何；射影几何则是研究图形在运动中保持线段复比不变的几何。

由于不同几何研究的不变性质不同，它们在坐标系的构造以及坐标形式上都有很大的差别。

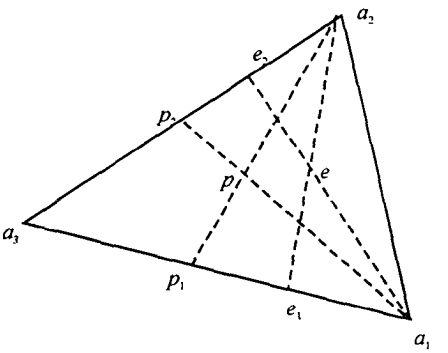


图 8.1.1 2D射影坐标系

如图 8.1.1 所示,在建立 2D 射影坐标系时[2],选择不共线的 3 点构成一个坐标三角形，然后选择不位于三角形三边所在直线上的一点作为单位点就构成一个 2D 射影坐标系 $\{a_1, a_2, a_3, e\}$。过 e 点作 a_2e_1 交 a_3a_1 于 e_1,过 e 点作 a_1e_1 交 a_3a_2 于 e_2 点。点 e_1, e_2 分别为 a_3a_1, a_3a_2 轴上的单位长度。a_1, a_2, a_3, e 这 4 个点称为该坐标系的参考点，设它们在自身所构成的射影坐标系中的坐标分别为(1,0,0)、(0,1,0)、(0,0,1)、(1,1,1)。该坐标称为 2D 射影坐标系的 4 个参考点的典范坐标(Canonical Coordinates)。

在图 8.1.1 中,对平面上的一点 p,过 p 点作 a_2p_1 交于 p_1 点,过 p 点作 a_1p_2 交 a_3a_2 于 p_2 点，令：

$$\begin{aligned} x_1 : x_3 &= a_3p_1/a_1p_1 : a_3e_1/a_1e_1 \\ x_2 : x_3 &= a_3p_2/a_2p_2 : a_3e_2/a_2e_2 \end{aligned} \tag{8.1.1}$$

则成比例的实数组(x_1, x_2, x_3)就称为 p 点在射影坐标系 $\{a_1, a_2, a_3, e\}$ 下的坐标。射影坐标与 3 个分量 x_1, x_2, x_3 的比值密切相关，并且凡是成比例的实数组$(\lambda x_1, \lambda x_2, \lambda x_3)(\lambda \neq 0)$ 都对应同一点。

射影坐标的定义借用了直线上 4 点的复比概念。直线上 4 点的复比经过中心投影是保持不变的。从数学上说，射影坐标系的定义以及坐标形式的定义都是为了使无穷远处的元素(点、线、面)与其他正常元素有相同的表达形式。射影几何中消除了无穷远的概念。

在建立 3D射影坐标系时,选取不共面的 4点 A_1、A_2、A_3、A_4 以及不在这 4点所组成的四面体上的任一点 E,由这 5 个点就构成一个射影坐标系 $\{A_1, A_2, A_3, A_4, E\}$,如图 8.1.2 所

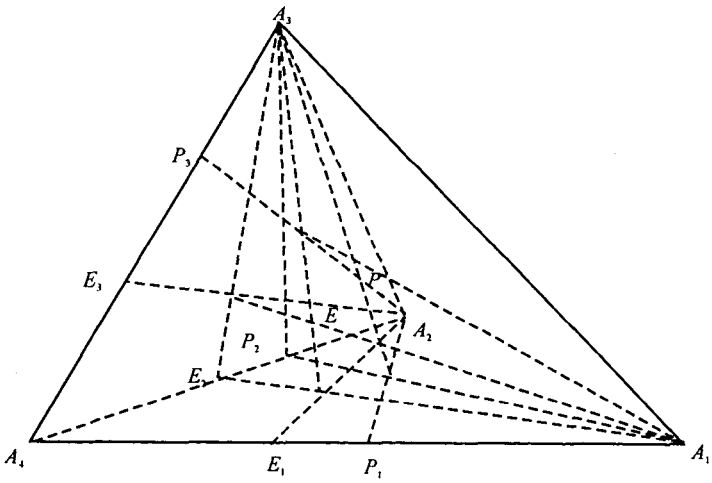


图 8.1.2　3D射影坐标系

示。其中，由 A_1,A_2,A_3,A_4 组成的四面体称作坐标四面体；E 称为单位点。这 5个点称为该坐标系中的参考点，设它们在自身所构成的射影坐标系中的坐标分别为（1,0,0,0）、(0,1,0,0)、(0,0,1,0)、(0,0,0,1)、(1,1,1,1)。该坐标称为 3D射影坐标系的 5个参考点的典范坐标。

在图 8.1.2 中，平面 E-A_2-A_3，E-A_1-A_3，E-A_1-A_2 与直线 A_4A_1,A_4A_2,A_4A_3 分别交于点 E_1,E_2,E_3。对射影空间中的任一点 P，用 P_1 表示平面 P-A_2-A_3 与 A_4A_1 的交点，用 P_2 表示平面 P-A_1-A_3 与 A_4A_2 的交点，用 P_3 表示平面 P-A_1-A_2 与 A_4A_3 的交点，令：

$$\begin{aligned} x_1 : x_4 &= A_4P_1/A_1P_1 : A_4E_1/A_1E_1 \\ x_2 : x_4 &= A_4P_2/A_2P_2 : A_4E_2/A_2E_2 \\ x_3 : x_4 &= A_4P_3/A_3P_3 : A_4E_3/A_3E_3 \end{aligned} \tag{8.1.2}$$

则成比例的实数组(x_1,x_2,x_3,x_4)称为点在射影坐标系$\{A_1,A_2,A_3,A_4,E\}$下的坐标，并且凡是成比例的实数组$(\lambda x_1,\lambda x_2,\lambda x_3,\lambda x_4)(\lambda\neq 0)$都对应同一点。

2）射影空间与欧氏空间下的坐标转换关系

在 2D平面上同时建立一个欧氏坐标系和一个对照坐标系，如图 8.1.3 所示。射影坐标系的 4个参考点 a_1,a_2,a_3,e 在欧氏坐标系中的坐标为$(x_i,y_i)(i=1,2,3,4)$。把坐标改写为(x_i,y_i,c)的齐次形式，其中 c 为任意非零常数，则由这 4点的典范坐标到(x_i,y_i,c)的对应关系可以惟一确定一个变换矩阵。该矩阵表示为：

$$T_{3\times3}=\begin{bmatrix} x_1\Delta_{423} & x_2\Delta_{123} & x_3\Delta_{124} \\ y_1\Delta_{423} & y_2\Delta_{143} & y_3\Delta_{124} \\ c\Delta_{423} & c\Delta_{143} & c\Delta_{124} \end{bmatrix} \tag{8.1.3}$$

式中：

$$\Delta_{ijk}=\begin{bmatrix} x_i & y_i & c \\ x_j & y_j & c \\ x_k & y_k & c \end{bmatrix} \tag{8.1.4}$$

变换矩阵的逆矩阵把射影坐标系的参考点的齐次坐标(x_i, y_i, c)变换成它自身的典范坐标，同时也把其他点的齐次坐标变换到该射影坐标系下的坐标。

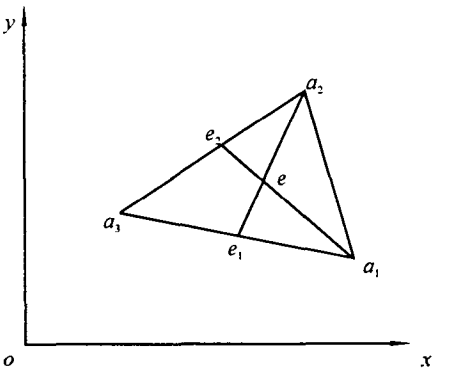


图 8.1.3　欧氏坐标系与射影坐标系

结合射影坐标($\lambda x_1, \lambda x_2, \lambda x_3$)($\lambda \neq 0$)对 λ 的不变性，在该变换矩阵中，对所有的 x_i 或 x_j 任意加减一个常数 c，射影坐标仍保持不变。即可以任意建立一个像平面坐标系来度量像点。射影坐标与 4 个参考点的欧氏坐标的度量坐标系无关，只与它们的相对位置有关。从欧氏坐标向射影坐标的变换抹煞了像主点和焦距的具体意义，从而使得非量测相机像点的像素坐标可以直接使用。

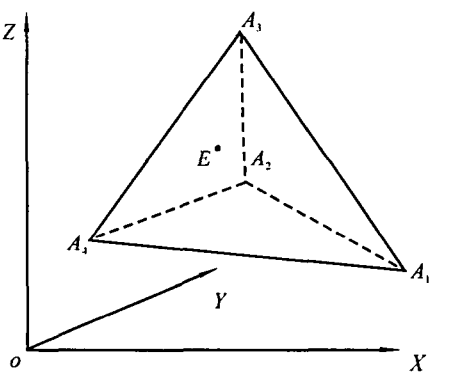


图 8.1.4　3D欧氏坐标系和射影坐标系

对 3D空间也有类似的情况。在三维空间中同时建立一个欧氏坐标系和射影坐标系，如图 8.1.4 所示。设射影坐标系的 5 个参考点 A_1, A_2, A_3, A_4, E 在欧氏空间坐标系中的坐标为(X_i, Y_i, Z_i)($i=1,2,3,4,5$)。把空间直角坐标(X_i, Y_i, Z_i)改写为(X_i, Y_i, Z_i, C)的齐次形式，其中 C 为任意非零常数。则由这 5 点的典范坐标到(X_i, Y_i, Z_i, C) 的对应关系可以惟一确定一个变换矩阵。该矩阵表示为：

$$T_{4\times4}=\begin{bmatrix} X_1\Delta_{5234} & X_2\Delta_{1543} & X_3\Delta_{1254} & X_4\Delta_{1235} \\ Y_1\Delta_{5234} & Y_2\Delta_{1534} & Y_3\Delta_{1254} & Y_4\Delta_{1235} \\ Z_1\Delta_{5234} & Z_2\Delta_{1543} & Z_3\Delta_{1254} & Z_4\Delta_{1235} \\ C\Delta_{5234} & C\Delta_{1543} & C\Delta_{1254} & C\Delta_{1235} \end{bmatrix} \tag{8.1.5}$$

式中：

$$\Delta_{ijkl}=\begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i & C \\ X_j & Y_j & Z_j & C \\ X_k & Y_k & Z_k & C \\ X_l & Y_l & Z_l & C \end{bmatrix} \tag{8.1.6}$$

该变换矩阵把物点的射影坐标变换到欧氏坐标系下的齐次坐标（X,Y,Z,C),则(X/S, $Y/S,Z/S$)就是该点在欧氏坐标系下的坐标。

这些变换矩阵建立了射影空间与欧氏空间的联系，因而可以灵活选择合适的几何空间来进行处理。在处理过程中，首先需要把像点的像素坐标变换到它的射影坐标，然后利用物像之间的基本几何关系式求出物点的射影坐标,最后用 3D 变换矩阵求得物点的空间直角坐标。

8.1.2 射影空间中的基本几何关系式

1) 物像之间的共线条件关系式

现以欧氏空间中比较直观的构像比例关系来推导射影空间中的构像关系式。如图 8.1.5 所示,以透镜中心为原点,以主光轴方向为 Z 轴建立一个空间直角坐标系。根据构像比例关系得：

$$x_i/X_i=y_i/Y_i=f/Z_i=1/\lambda_i \tag{8.1.7}$$

式中,(x_i,y_i,f)为像点在该坐标系下的坐标;(X_i,Y_i,Z_i)为物点在该坐标系下的坐标；λ_i 为比例因子,把该式用矩阵表示为：

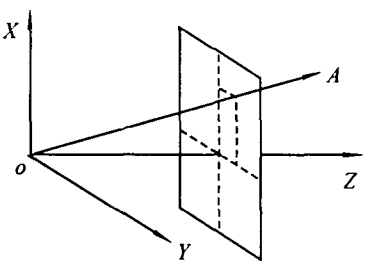


图 8.1.5 构像比例关系

$$\lambda_i\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \tag{8.1.8}$$

利用射影坐标与欧氏坐标之间的转换关系，把以上欧氏坐标的齐次形式用射影坐标代换并经过整理可得：

$$\lambda_i\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ T_i \end{bmatrix} \tag{8.1.9}$$

式中,(u_i,y_i,w_i) 为像点的射影坐标;(X_i,Y_i,Z_i,T_i)为物点的射影坐标,系数矩阵 $C_{3\times4}$称为相机矩阵(Camera Matrix)。需要说明的是，虽然物点的欧氏坐标与射影坐标都用到了 X, Y,Z 这 3 个符号，但它们在意义上和数值上都是不一样的。

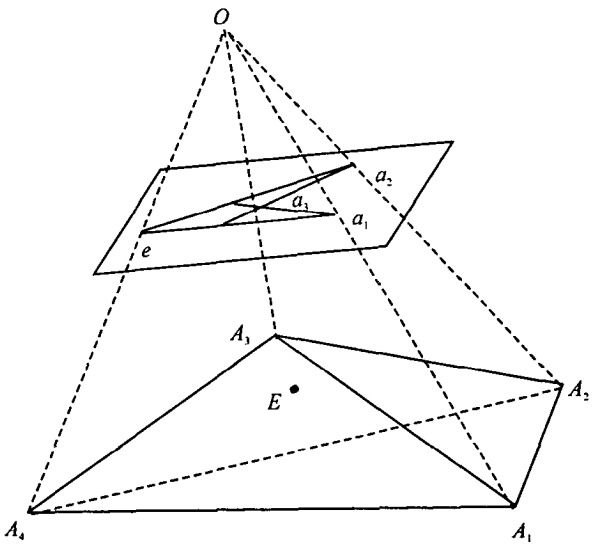


图 8.1.6　射影空间中的构像关系

如图 8.1.6所示,如果把像平面上的 4个参考点的典范坐标和它们对应的物点的典范坐标代入式(8.1.9) ,可以得到：

$$\lambda_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & \lambda_4 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \lambda_4 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ T_i \end{bmatrix} \tag{8.1.10}$$

简写为：

$$\rho_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & c_{22} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & c_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ T_i \end{bmatrix} \tag{8.1.11}$$

式(8.1.11)就是射影空间中物像之间的共线条件方程式。在该式中，只有 $c_{ii}(i=1,2,3)$3个元素是对所有点保持不变的，而是随每个像点而变化的。

欧氏空间下的共线条件方程是一个非线性方程，而射影空间下的共线条件方程得益于射影坐标系的建立及坐标形式上的特殊性，用相机矩阵建立起来。该方程式在形式上和计算上非常简单,并且是线性方程。

需要说明的是，以上的推导虽然借用了欧氏空间下像主点和透镜中心的位置，但事实上，

由于像点的射影坐标值只与参考点的相对位置有关。而与最初采取何种直角坐标系对参考点进行度量无关，所以采用任何直角坐标系下的像点坐标都可以，最简单的形式就是像点的像素坐标。

2 物像之间的直接关系式

如果再把物方射影坐标系的中单位点 E 和另外一个未知点 i 的射影坐标以及它们所对应的像点坐标代人式(8.1.10)中,可以得到：

$$\lambda_5\begin{bmatrix}u_5\\v_5\\w_5\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\lambda_1&0&0&\lambda_4\\0&\lambda_2&0&\lambda_4\\0&0&\lambda_3&\lambda_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\1\\1\\1\end{bmatrix} \tag{8.1.12}$$

$$\lambda_i\begin{bmatrix}u_i\\v_i\\w_i\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\lambda_1&0&0&\lambda_4\\0&\lambda_2&0&\lambda_4\\0&0&\lambda_3&\lambda_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_i\\Y_i\\Z_i\\T_i\end{bmatrix} \tag{8.1.13}$$

展开并整理，写成矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix}1&0&0&1&-u_5&0\\0&1&0&1&-v_5&0\\0&0&1&1&-w_5&0\\X_i&0&0&T_i&0&-u_i\\0&Y_i&0&T_i&0&-v_i\\0&0&Z_i&T_i&0&-w_i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\lambda_1\\\lambda_2\\\lambda_3\\\lambda_4\\\lambda_5\\\lambda_i\end{bmatrix}=0 \tag{8.1.14}$$

因为并非所有的 $\lambda_k(k=1,2,\cdots,5,i)$全为零,所以对该方程式,有系数矩阵的行列式为零。由此可得：

$$\begin{aligned}&w_i(u_5-v_5)X_iY_i+v_i(w_5-u_5)X_iZ_i+u_i(v_5-w_5)Y_iZ_i+\\&u_5(v_i-w_i)X_iT_i+v_5(w_i-u_i)Y_iT_i+w_5(u_i-v_i)Z_iT_i=0\end{aligned} \tag{8.1.15}$$

该关系式建立了物点与像点射影坐标之间的直接关系。它不包含任何中间参数，在求解物点的射影坐标时非常有用。

3 像像之间的共面条件关系式

如图 8.1.7 所示,矢量 sA、ss'、$s'A$ 位于同一平面内,根据共面关系,它们组成的行列式为0,即

$$\begin{vmatrix}B_x&B_y&B_z\\X&Y&Z\\X'&Y'&Z'\end{vmatrix}=0 \tag{8.1.16}$$

式中，(B_x, B_y, B_z)、(X, Y, Z)、(X', Y', Z')分别表示矢量 sA，ss'，$s'A$ 在物方坐标系下的坐标。

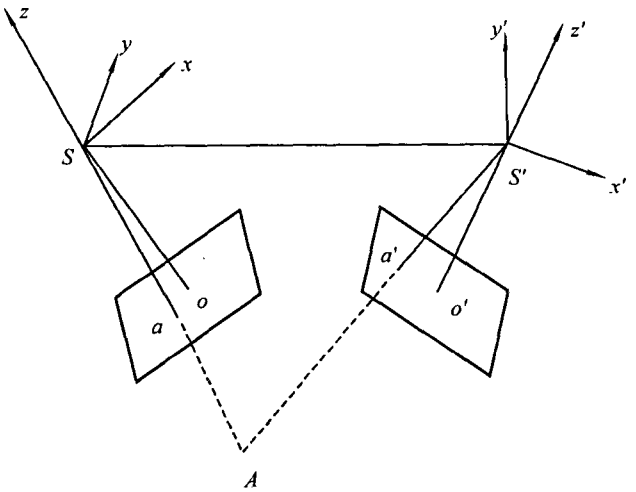


图 8.1.7　共面条件

在左右两片上，A 点所对应的像点和所构成的矢量，同样满足共面条件。代入对应的像点坐标，并用矩阵表示为：

$$[x \quad y \quad -f]\begin{bmatrix} 0 & -b_z & b_y \\ b_z & 0 & -b_x \\ -b_y & b_x & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}[x' \quad y' \quad -f']^{\mathrm{T}} = 0 \tag{8.1.17}$$

式中，$(x, y, -f)$和$(x', y', -f')$分别为 a，a'在坐标系 $s\text{-}xyz$ 和 $s'\text{-}x'y'z'$ 中的坐标；(b_x, b_y, b_z)为基线 ss' 在 $s\text{-}xyz$ 下的坐标 矩阵 $R_{3\times3}$为坐标 $s\text{-}xyz$ 和 $s'\text{-}s'y'z'$之间的旋转矩阵。整理式(8.1.17)得：

$$[x' \quad y' \quad -f']\begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = 0 \tag{8.1.18}$$

上式称为本质矩阵，其秩为 2。

利用射影坐标与欧氏坐标之间的转换关系，把以上欧氏坐标用射影坐标代换，并经过整理得：

$$[u' \quad v' \quad w'] \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = 0 \tag{8.1.19}$$

上式称为基础矩阵,其秩为 2。该形式就是射影空间中同名点之间的共面条件关系式。

如果把像平面上射影坐标系的前 3 个参考点的典范坐标代人式（8.1.19)中,可得如下简单形式：

$$[u' \quad v' \quad w'] \begin{bmatrix} 0 & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & 0 & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = 0 \tag{8.1.20}$$

该式中只含有 6个非零参数，如果再把其中一个非零参数作为比例因子提出来，那么便有更简单的形式。如把 f_{32}设置为 1 ,则有：

$$[u' \quad v' \quad w'] \begin{bmatrix} 0 & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & 0 & f_{23} \\ f_{31} & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = 0 \tag{8.1.21}$$

该式中只有 5个非零元素。在计算中，也可以采用此式来计算基础矩阵。

从上面的讨论可以看出，射影空间中物点与像点之间的共线条件关系式、直接关系式以及同名点之间的共面条件关系式，与欧氏空间中的关系式相比，前者不但在形式上比较简单，更重要的是由于采用了射影坐标，抹煞了相机主点与焦距的具体意义，使得像点的坐标可以采用任意坐体系进行度量。它在应用上弥补了非量测相机或变焦相机的内方位元素不可知的缺陷 同时,由于这些关系式为线性关系式,在计算上不需要线性化迭代求解,也不再需要外方位元素的初始值。

物像之间的基本关系式是摄影测量的基础。利用这些关系式可以解决 CCD,GIS 和 GPS 集成中的目标点定位(参见 8.4 节)问题。

8.2 CCD 阵列相机的几何标定[3]

传统的光学成像相机的几何标定方法在摄影测量领域已成为作业规范，且被其它学科所应用。其标定技术最基本的方法是基于共线约束的空间后方交会法。由于这种传统的标定方法很难顾及视频图像传感器的许多内部参数，许多学者提出了多种视频相机的标定方法。Curry和 Baumrind[4]提出了基于共线条件的附加参数法，用于固体阵列相机的几何标定;Fryer 等[5]也提出了用附加参数标定 CCD 阵列相机的光学畸变和行抖动。非测量用相机标定的另一种处理是采用直接线性变换(DLT) 已被许多视觉系统的标定所采用。这种变换方法的

思想是仅仅用来寻找相机的空间物像变换关系，而不顾及相机方位元素的具体参数。 Tsai[6] 提出的通用相机标定方法采取了多级标定处理，其他人在此基础上作了一些改进。上述的这些方法都是基于建立点——点对应的几何约束关系。另一类标定方法是通过寻求线特征的对应关系建立关于相机方位元素的几何约束以实现相机标定。除此之外，还有多种标定方法的报道。这也从一个方面说明了图像传感器标定技术的不完善性。

纵观现有的相机几何标定方法，一个最一致性的地方，在于关于求解的未知数的准确性评价，都是采用样本点的物像空间正反换算与标准样本点进行比较作为评价尺度。实际上这种评价尺度并不全面，因为它没有顾及到求解相机参数间各未知数间存在的“复合关系”。尽管在某些空间位置加密出的几何坐标也许与标准样本点符合较好，但这并不能保证求解的相机参数是准确的。因此如何寻找完善的评价相机参数的标准尺度，并在相机标定过程中作为约束条件，对于图像传感器的标定具有重要意义。尤其是在主动视觉中，在需要对相机进行动态驱动规划和检测时，就显得尤为重要。

这一节主要根据文献[3]，介绍针对传统 CCD 相机标定处理中的困难所提出的一种多级标定方法。它把相机内部参数的估计分为 3个独立阶段进行，从而最大限度地克服了整体求解过程中未知参数间的相关性影响，具有较好的标定精度和数据一致性。

8.2.1 CCD 相机的几何成像过程

CCD 相机的几何成像过程，实际上就是通过一定的空间投影变换原理，把一个三维空间点最后变换为图像平面上的 2D 像点。这个变换过程可以分解为下述的 4步变换。

1) 从物方空间⇔像方空间

设摄相机的投影中心记为（X_S, Y_S, Z_S），对于物方任意点在物方空间坐标系中的坐标记为（X_T, Y_T, Z_T），它在像空间坐标系中的坐标记为（$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$），则由空间变换关系可得下述公式：

$$\begin{bmatrix}\bar{x}\\ \bar{y}\\ \bar{z}\end{bmatrix} = R\begin{bmatrix}X_T - X_S\\ Y_T - Y_S\\ Z_T - Z_S\end{bmatrix} = R\begin{bmatrix}X'\\ Y'\\ Z'\end{bmatrix} \tag{8.2.1}$$

式中 R 为旋转矩阵，它是相机 3个独立方向角（φ, ω, κ）的函数。

2)像方空间⇔理想像平面坐标

根据坐标系的定义、容易得出下述变换关系式：

$$\left.\begin{aligned} x &= -f\frac{\bar{x}}{\bar{z}}\\ y &= -f\frac{\bar{y}}{\bar{z}}\end{aligned}\right\} \tag{8.2.2}$$

3) 理想像平面坐标⇔光学几何畸变坐标

由式(8.2.2)计算的像点坐标是理想条件下的像平面坐标，实际上光学成像系统总是存在光学畸变。这种光学畸变包括径向畸变和切向（偏心）畸受。在通常情况下仅顾及径向畸变。由应用光学知识可知，径向畸变和视场的三次方成正比。若忽略高次顶，有：

$$\delta r = kr^3 \tag{8.2.3}$$

其中 k 为畸变系数，r 表示视场，那么 δr 在 x、y 两个方向的分量为：

$$\delta x = \delta r \cdot \frac{x}{r} = xkr^2$$

$$\delta y = \delta r \cdot \frac{y}{r} = ykr^2$$

则有

$$\begin{cases} x = x_d - \delta x = x_d(1 - kr^2) \\ y = x_d - \delta y = y_d(1 - kr^2) \end{cases} \tag{8.2.4}$$

式中 $r=\sqrt{x_d^2 + y_d^2}$，(x_d, y_d) 是畸变后的坐标，(x, y) 是理想坐标。

4）畸变坐标⇔图像平面坐标

CCD相机形成数字信号的过程是把成像在每个光敏元的光点进行光电转换，形成视频信号，然后再进行 A/D 转换，即量化。由于量化的间隔（像素大小）并不完全对应于光敏元的尺寸，因此图像平面坐标和畸变坐标之间存在一个比例因子。此外，由于 CCD 在行、列两方向的扫描频率不同，使得它在 x，y 两个方向的比例因子（p_x，p_y）不相同。所以顾及到像主点参数 (c_x, c_y)，则畸变坐标和图像平面坐标 (x_f, y_f) 有下述关系存在：

$$\begin{cases} x_f = \dfrac{x_d}{p_x} + c_x \\ y_f = \dfrac{y_d}{p_y} + c_y \end{cases} \tag{8.2.5}$$

8.2.2 CCD 摄相机几何标定的多级标定方法

1）相机主点的确定

我们知道，光学镜头的辐射畸变将引起像点在像平面上的偏移。根据辐射畸变的性质可知，由此引起的位移只能位于光心和像点的连线方向上。图 8.2.1 示出了畸变引起的位移方向。这个性质对于相机几何标定具有重要意义，从这个性质出发可以得到文献[3]中提到的等比定律。根据等比不变性可以得到相机主点的一种解法，不过，这是一种仅顾及径向畸变的解法，一般仅使用于大畸变镜头的情况。若畸变很小，或没有畸变时，这种解算过程可能不稳定。这是因为，当不存在畸变时，从几何上可以发现光心的位置与等比定律没有关系。所以在镜头畸变为微小量的情况下，可以用下述的基于延伸焦点的方法确定主点位置。

在日常生活中都有这洋的体验，当观察者向正前方行进，且视线也正对行进方向时，会感

觉到整个场景扑面而来。由于观察者与场景的相对运动而产生的图像瞬时位置速度场的方向来自于观察者正前方的某一点,这一点被称为延伸焦点 FOE。延伸焦点的性质在序列图像的运动分析中非常有用。这里将依据 FOE 性质确定像片主点位置。

如图 8.2.2 所示,在(a)中,设有一目标物 AB,在初始状态时,其中的 A,B 两点在像平面上成像于 a,b 点。当目标物沿着与光轴平行的方向移动到 $A'B'$时,则根据几何成像原理,可知它成像于 a'、b'点。那么,根据中心投影原理,$a\rightarrow a'$和 $b\rightarrow b'$的移动方向线必然交于 FOE 点 o。图 8.2.2(b) 示出了目标物上存在 4个目标点的成像情况,显然像主点 o 也就是 FOE 点,即直线 aa',bb',cc'和 dd'的交点。

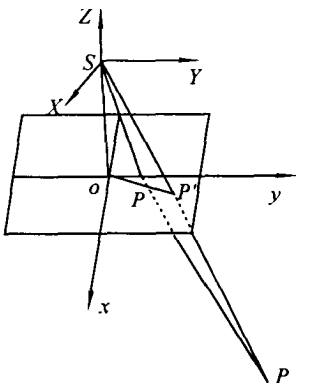


图 8.2.1 径向准直约束

若我们设计一个平板,平板上分布若干个目标点 $A_i(i=1,2,\cdots,N)$,让相机光轴垂直于平板,平板移动时沿着一个平行于光轴的导轨运动,对于平板的不同位置分别求得目标点的像点 a_i,a'_i 和 a''_i,那么对于每一个像点在像平面上的运动轨迹就构成了 N 条直线,利用这 N 条直线求直线的交点,即可得主点位置(c_x,c_y)。

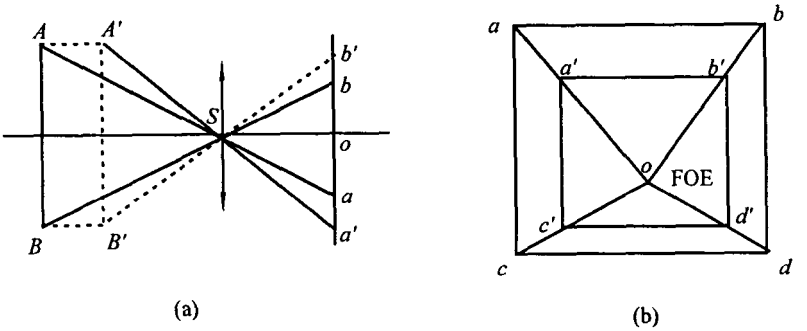


图8.2.2 FOE 的解释

2) 畸变系数的确定

对于变形的像点 $p_i(i=1,\cdots,4)$,在经过畸变改正后应为 $p'_i(i=1,\cdots,4)$,而 p_i 应满足共线条件,这就是我们推求畸变系数的几何共线约束条件。

如果用 $(\bar{x}_i,\bar{y}_i)$表示畸变改正后 p'_i点的像点坐标,用(x_{fi},y_{fi})表示图像坐标。参照式(8.2.4)和式(8.2.5),则对任意像点 $p'_i(i=1,\cdots,4)$,其改正后的像点坐标可表示为:

$$\begin{aligned}\bar{x}_i &= (x_{fi} - c_x)p_x(1 - kr_i^2)\\ \bar{y}_i &= (y_{fi} - c_y)p_y(1 - kr_i^2)\end{aligned} \tag{8.2.6}$$

其中，

$$r_i^2 = (x_{fi} - c_x)^2 p_x^2 + (y_{fi} - c_y)^2 p_y^2 \tag{8.2.7}$$

若在 p'_i 中任选 3个点，如 p'_1, p'_2, p'_3，它们共线的条件可以写为：

$$(\bar{y}_3 - \bar{y}_1)/(\bar{x}_3 - \bar{x}_1) = (\bar{y}_2 - \bar{y}_1)/(\bar{x}_2 - \bar{x}_1) \tag{8.2.8}$$

把式(8.2.6)代入式(8.2.8)，并进一步化简可得关于畸变系数 k 的二次方程为：

$$ak^2 + bk + c = 0 \tag{8.2.9}$$

则畸变系数为：

$$k = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \tag{8.2.10}$$

式(8.2.10)表达的求解 k 系数的公式是针对一条直线的情况，若像平面上存在多条直线时，可以采用文献[3]介绍的参数一致性约束，求得 k 的最优解。

3) 比例因子与主距的确定

所谓 CCD 相机的比例因子是指 CCD 相机单位像素的几何尺寸大小。由于 CCD 相机在行列两方向的扫描频率的不同，使得 CCD 图像在行列方向的比例因子是不同的，比例因子的确定对于精密测量 3D形状具有重要意义。

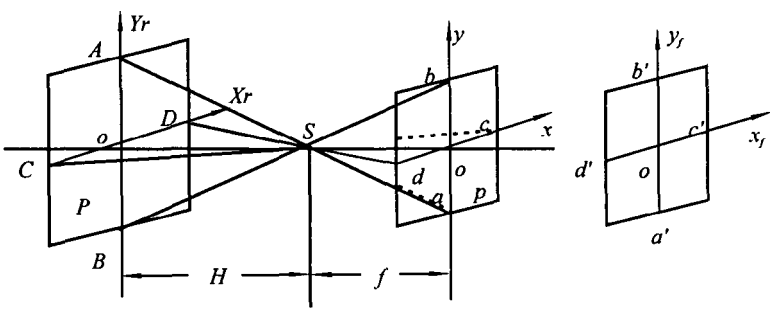


图 8.2.3 几何成像模型

如图 8.2.3 所示，设 $ABCD$ 位于同一平面 P 内，S 为几何投影中心，物平面 P 与几何像平面 p 平行，a, b, c, d 是物方点 A, B, C, D 的几何像点，a', b', c', d' 分别是在图像坐标系中的像点，若用 D_{ij} 表示点 i, j 的空间距离，d_{ij} 表示 i, j 点在几何像平面的距离，d'_{ij} 表示在图像平面内 i, j 点的距离。根据几何光学原理，有：

$$\begin{aligned}D_{AB}/H &= d_{ab}/f\\ D_{CD}/H &= d_{cd}/f\end{aligned} \tag{8.2.11}$$

设选取的 A,B 点平行于 X_T 轴，C,D 点平行于 Y_T 轴，又因为平面近似垂直于主光轴。那么根据比例因子的定义，可得其计算公式为：

$$\begin{aligned} p_x &= d_{cd}/d'_{c'd'} \\ p_y &= d_{ab}/d'_{a'b'} \end{aligned} \tag{8.2.12}$$

式(8.2.12)中，D_{CD}，D_{AB} 可以在像方量测，$d'_{c'd'}$ 和 $d'_{a'b'}$ 可以在像坐标系中量测。显然要精确测定比例因子 p_x 和 p_y，必须首先精确测定 f 和 H。f 和 H 的确定可以采用空间后方交会方法求解，而空间后方交会需要在物方 3D 空间分布的控制点。为此可采用下述方法获取 3D控制点。

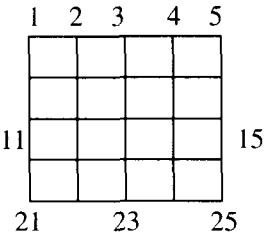


图 8.2.4 平面控制点分布

设在像平面 P 上分布不仅仅只有 A,B,C,D 四个点，而是设置如图 8.2.4 所示的 25 个平面点，当平面 P 沿光轴方向(Z 方向)作平移运动时，设移动到 N 个位置，那么我们在像平面共可以得到 $25\times N$ 个像点，它们分别对应于空间的 $25\times N$ 个控制点，这些控制点共分成 N 组，每一组具有相同的 Z_T 坐标。这样，根据这 $25\times N$ 个控制点的物像坐标，就可以采用空间后方交会求解相机的方位元素和主距 f。

8.3 车载测量系统中影像信息的处理

ALV (Autonomous Land Vehicle)中的影像信息通常为由 CCD彩色摄像机获取的彩色图像以及由激光测距雷达(Laser Range Finder，缩写为 LRF) 获取的距离图。由于彩色摄像机具有较快的成像速度且其提供的彩色图像具有较高的分辨率，但难以提供环境的三维描述，而 LRF 获取的距离图能很好地提供环境的三维描述但其精度低且通常图像含较多噪声，因此两者具有很强的互补性，两者的融合结果将给出更精确的环境描述信息[7]。

1) 多传感器信息的预处理

信息融合的首要工作是多传感器的标定，ALV 中传感器标定的关键是 CCD 彩色摄像机的标定，而 LRF 的标定则较简单。参照上一节介绍的方法，可得到精度较高的摄像机标定结果。

一旦将传感器标定好后，可以 ALV 行驶的地平面为基准，在 ALV前方建立大小为 $m_g\times n_g$ 的全局公共栅格图，每个栅格的实际大小一般取为 LRF最小分辨率的整数倍，这样，就可把获得的各种用于融合的信息都投影到此全局公共栅格图上，进行信息融合处理，并根据融合结果来构成立体像对，其结果可用于 3 维重建或地物测量，以及判断每一个栅格区域是属于可通行区域。

为了得到更好的融合结果，还需要对多传感器信息的进行其它的预处理。

原始距离图像中的数据是球坐标格式的，距离图像的预处理可归纳为：对距离图像进行中值滤波——将相对距离转换为绝对距离——将球坐标系下的距离图像转换为笛卡尔直角坐标系下的高度图——对高度图取阈值，得到障碍图。

彩色图像预处理包括滤波和彩色压缩等。

2 识别框架的定义

在节 2.1 中曾介绍过互补信息融合的途径之一是利用 Dempster－shafer(简称 D－S)证据理论将多个数据源分别提供的有关空间对象的证据综合为一致的结果描述。在基于 D－S 证据理论的融合算法中，如何针对具体问题确定合理的且包含最少元素的识别框架 Θ 是解决问题的关键。此处信息融合针对 ALV 室外行驶时的两类常见道路网环境进行：一类只有路与非路,另一类除路与非路外,还有路中的障碍物。

对前一类环境,可定义识别框架为

$$\Theta_1 = \{R, B\} \tag{8.3.1}$$

其中，R 为道路区域，B 为非路即背景区域。因此，Θ_1 的非空幂集有 $\{R\}$、$\{B\}$ 及 $\{R,B\}$。

对于后一类环境,我们定义识别框架为

$$\Theta_2 = \{F, O, U\}$$

其中，F 表示 ALV 可自由行驶的平坦区域，O 表示障碍区域，U 表示未知区域。因此，Θ_2 的非空 幂集有 $\{F\}$,$\{O\}$,$\{U\}$,$\{F,O\}$,$\{F,U\}$,$\{O,U\}$及$\{F,O,U\}$。

3 证据的选取

由于彩色图像的精度高,噪声小,信息量大,一个证据已能提供比较丰富的信息,增加证据并不能明显提高融合后结果的可靠性，相反却大大增加处理时间，而原始距离图精度低，噪声大，可靠性低，因此必须利用多个证据才能保证可靠的融合结果。然而，从高度图中得到的多个证据显然存在相关与冲突,这样,传统的 D－S 证据理论便不再有效并将产生与直觉相悖的融合结果,因此可利用文献[7]推广后的 D－S证据理论。

(1)从高度图获取特征。选择高度图中以下四个特征作为分类证据：

* 每个栅格内 LRF 采样点的数目 N_s。由于 LRF 的采样点分布很不均匀，且信噪比低，因此单个点的信息不是很可靠，而一个栅格内的采样点越多，其反映的信息就越真实。

* 栅格表面的法线方向与地平面之间的夹角 θ。

* 栅格区域的平均高度 h。最终应对 h 取阈值而判断某栅格是否为障碍区域。

* 每一栅格的高度方差 σ_h^2。利用高度方差有利于消除一些由于噪声点的影响而使 $\bar{h}$ 偏离所造成的假象。其中，$\bar{h}$ 和 σ_h^2 定义为：

$$\bar{h} = \sum_{i=1}^{N} \frac{z_i}{N},\ \sigma_h^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(z_i - \bar{h})^2 \tag{8.3.2}$$

(2)从彩色图像中获取特征。对经彩色压缩后的彩色图像，我们可用事先统计出道路与障

碍物区域的彩色分布 C_r 与 C_o 的方法决定彩色图像中的路面、道路边缘及障碍物等。如彩色图像中道路与障碍物是连续的、无中间的较大跳变(这在很多情况下都是成立的),那么,C_r 与 C_0 一般是稳定的。因此,若某一栅格中的彩色集为 C_{ij},则我们可利用下列函数值作为此栅格是否为平坦区域、障碍区域或未知区域的依据:

$$f_{cr}=\frac{|C_{ij}\cap C_r|}{|C_r|}\text{ 或 }f_{co}=\frac{|C_{ij}\cap C_o|}{|C_o|} \tag{8.3.3}$$

式中,$|C_r|$ 与 $|C_o|$ 分别表示集合 C_r 与 C_o 中元素的数目。

4)合理且有效的 BPAF 的定义

在 2.1 节中曾介绍过集函数 $m:2^{\Theta}\to[0,1]$,它又称基本概率赋值函数(Basic Probability Assignment Function,缩写为 BPAF),在基于 D-S 证据理论的融合算法中有重要作用,应合理且有效的定义。

(1)前一类环境下的高度图。因这类环境只涉及路与非路两类区域,道路为我们感兴趣的目标,其所处环境即为背景,因此可假设图像的边缘部分没有目标(这一假设在大多数情况下是成立的),这样,我们就可利用图像边缘部分的信息来抽取背景区域的特征。

若背景区域中 $\bar{h}$ 和 σ_h^2 的均值分别为 μ_h^F 和 μ_σ^F,概率密度函数分别为 $p_h^F(x)$ 与 $p_\sigma^F(x)$。我们用一个 $n\times n$ 的窗口扫描整个图像,窗口内像素的 $\bar{h}$ 和 σ_h^2 的均值分别为 μ_h^W 和 μ_σ^W,概率密度函数分别为 p_h^W 与 $p_\sigma^W(x)$,则可定义:

$$d_{BW}^{\bar{h}}=2\left|\int_{\mu_{\bar{h}}}^{\mu_{\bar{h}}^F}p_h^F(x)\mathrm{d}x\right|,\ d_{WB}^{\bar{h}}=2\left|\int_{\mu_{\bar{h}}}^{\mu_{\bar{h}}^F}p_h^F(x)\mathrm{d}x\right| \tag{8.3.4}$$

式中,B 代表背景区域,W 代表 $n\times n$ 窗口。

同理,我们可由 $p_\sigma^F(x)$,$p_\sigma^W(x)$ 求得 $d_{BW}^{(\sigma)}$ 与 $d_{WB}^{(\sigma)}$。其中,$p_h^F(x)$,$p_\sigma^F(x)$ 与 $p_h^W(x)$,$p_\sigma^W(x)$ 可以通过样本训练自动求得。

利用式(8.3.4)可以求得背景区域的 BPAF(参见文献[7])。

彩色图像的 BPAF 可直接利用式(8.3.3)定义(参见文献[7])。

(2)后一类环境下因除路与非路外,还有障碍物,因此可构造 BPAF 如下。

首先对于彩色图像,构造 BPAF 如表 8.3.1 中 $m_3(*)$ 所示,其中 f_c 定义为:

$$f_c=\sqrt{f_{cr}f_{co}} \tag{8.3.5}$$

表 8.3.1 路、非路及障碍物环境中的 BPAF 的定义

	$\varnothing$	$\{F\}$	$\{O\}$	$\{U\}$	$\{F,O\}$	$\{F,U\}$	$\{O,U\}$	Θ_2
$m_1(*)$	0	$k_\theta f_\theta$	$1-k_\theta f_\theta$	0	0	0	0	0
$m_2(*)$	0	$2(1-k_Nf_N)/3$	k_Nf_N	$(1-k_Nf_N)/12$	0	$(1-k_Nf_N)/4$	0	0
$m_3(*)$	0	k_cf_c	$(1-k_cf_c)/3$	$2(1-k_cf_c)/3$	0	0	0	0

注:表 8.3.1 中,k_θ,k_N 及 k_C 均为常数。

至于高度图，可以定义如下函数：

$$f_N = N_s / N_g \tag{8.3.6}$$

式中，N_s 为栅格内 LRF 采样点的数目，而 N_g 为整个栅格的总点数，其 BPAF 如表 8.3.1 中 $m_2(*)$ 所示。另外，

$$f_\theta = \cos\theta \tag{8.3.7}$$

显然，如果某一栅格表面为一平面，则 θ 近似为 90°。因此，使用 f_θ 描述某一栅格是否为障碍点是合理的，其 BPAF 如表 8.3.1 中 $m_1(*)$ 所示。

5）融合过程

在完成了上述准备工作后，接下来就可利用推广后的 D-S 组合规则（参见文献[7]）得到所有证据联合作用下的 BPAF，并把最终的 BPAF 转换为相应的信度函数和似然函数，得到一置信区间。最后，利用以下决策规则，选择联合证据作用下支持度最大的假设：

$$\begin{cases} m_{\text{object}} > m_{\text{other}} \\ m_{\text{object}} - m_{\text{other}} > T \\ m_{\text{object}} > m(\Theta) \\ m(\Theta) < T_{\text{uncertainty}} \end{cases} \tag{8.3.8}$$

上述规则 1 表示具有最大信任函数值的类是目标类；规则 2 表示每一证据对所有不同类的支持程度应保持足够大的差异；规则 3 表示当对某一目标知之甚少时，不能对其进行分类；规则 4 表示对目标类的无知程度或证据的不确定度不能太大。

8.4 移动式 GPS、GIS 和多传感器集成系统[8]

在 GIS 开发中有两方面的问题一直制约着其发展。其一是难以快速产生和实时获得地球空间数据；其二是开发高精度，高质量并且具有符合要求的时空分辨率的空间数据库成本较高而效率较低。

传统的数据汇集是一个艰苦的过程，需要人工数字化数据和人工实地采集和记录数据。这些工作不仅沉闷、费时，并且导致 GIS 系统开发费用的增加和开发周期的加长。另一方面，在常规的摄影测绘调查中，空中照片经常由于比例尺过小，也难以充分提供复杂地物的细节信息。利用地面测站系统进行的数据采集，地物的特征能被精确的测绘，但通常时间很长，有些项目因为时间原因而无法实施。

然而，以 CCD、GPS 和 GIS 为基础的移动式测绘系统（Mobile Mapping System，简称 MMS）在一定程度上可以解决上述问题，这主要是由于它们具有以下一些特点：

（1）增加了覆盖范围、减少了重复采集数据的时间，提高了现场数据获得的效率。

(2) 通过多种传感器的集成，使高质量的空间和属性数据能更有效地被获得。

(3) 利用直接来自导航传感器或 GIS 提供的控制数据，目标的几何测绘过程可以被简化。

(4) 初始数据可以被储存为文档数据，从而数据处理过程可以被安排在任何时候进行。

总之，来自移动式测绘系统的序列影像为自动目标识别和 GIS 数据的更新提供了新的重要手段。因而，移动式测绘系统可以被看成是一个具有多种传感器的移动平台，并被集成为能近似连续地提供平台路径位置和同时可进行地球空间数据采集的系统。

20 世纪 80 年代末，GPS 技术逐渐被广泛应用，导致许多国家开始研制和开发移动式测绘系统。现在已研制出多种类型的移动式测绘系统，表 8.4.1 列出了截止 1998 年的此类系统[9]。

表 8.4.1 移动式测绘系统

系统	开发商/研究者	导航传感器	测绘传感器
GeoVAN	GeoSpan Corp., USA	GPS/DR	10VHS, Voice Recorder
GPS Van	The Ohio State University, USA	GPS/Gyro/Wheel Counter	2 CCD, Voice Recorder
GPS Vision	Lambda Tech. Int. Inc, USA	GPS/INS	2 Color CCD Optical Disc
Kiss	Univ. of Bundeswher Munich and GeoDigital, Germany	GPS/IMU/Inclination Odometer/Barometer	ISVHS, 2 BW CCD, Voice Recorder
ON-SIGHT	TransMap Corp., USA	GPS/INS	4 Color CCD
RGIAS	Rowe Surveying and Engg, Inc. USA	GPS	Video, Laser
TruckMAP	John E. Chance and Engg Inc., USA	GPS/Gyro/WA-DGPS	Laser Rang Finder, 1 Video Camera
VISAT	The Univ. of Calgary and Geofit., Canada	GPS/INS/ABS	8 BW CCD 1 Color SVHS

从表 8.4.1我们能看到，不同种类的传感器通常是被集成在移动式测绘系统中，根据这些传感器的功能能将它们分成两类：导航传感器和测绘传感器。导航传感器包括 GPS、INS DR、陀螺仪、气压计等；测绘传感器包括视频或数字的摄影机，激光测距雷达，激光扫描仪等。

8.4.1 WUMMS 系统的硬件组成

WUMMS是由武汉测绘科技大学设计的移动式测绘系统，图 8.4.1 是 WUMMS 系统的硬件组成的图解表示。该系统由工业计算机、电视摄影机、视频交换器、影像处理板、激光测距仪、GPS、某些环境传感器、LCD监视器和电源系统等组成。图 8.4.2是 WUMMS 系统的外观照片，图 8.4.3 是 LCD 监视器和系统界面(见插页)。下面对其主要部分予以介绍。

1) 影像采集系统

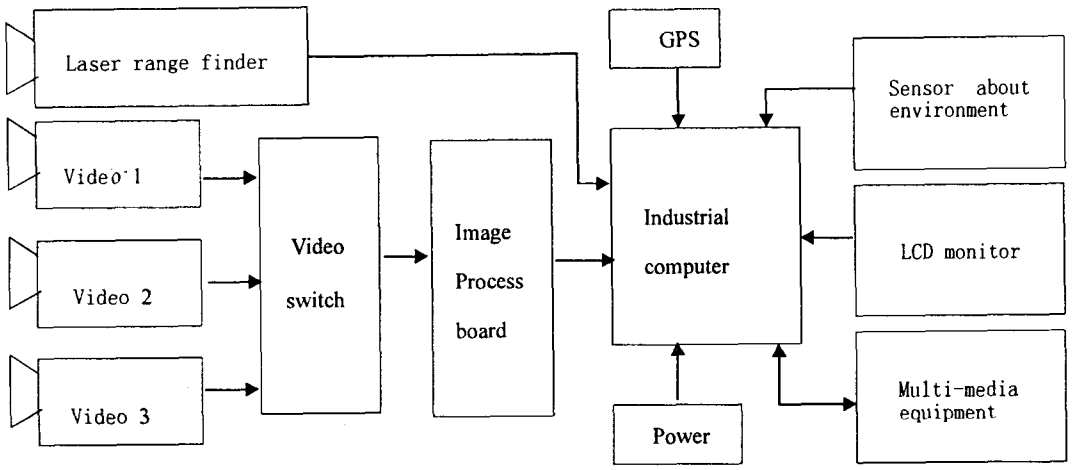


图 8.4.1 WUMMS硬件配置

影像采集系统包括 3 个影像传感器，一个视频交换器和一个影像处理板。每个影像传感器是一个 1/2″帧 CCD，它由电子快门操作，通过增加的钟频和读取交错图像的一半行数，得到 25Hz 的采样频率和 288行和 768像素宽的影像分辨率。所选取的 CCD 可以对背景光线具有一定的抑制作用，并且在一定程度上可以防止因移动产生的模糊。影像处理板的功能是实现 A/D转换，通过这个过程，每个影像传感器的模拟输出信号被相继转换成 8 bit 数字影像。同时，通过 PCI 总线可实时将数字影像输入计算机。

影像采集系统有两种数据采集方式，一种是用于后处理的 2D 数据采集方式，它仅使用一个 CCD相机 另一种是实时的 3D数据采集方式，它使用两个 CCD相机，主要用于 3 维重建和道路跟踪。后一种数据可以被输送到另外的设备或存贮在磁盘上。

摄像机的详细情况被汇集在表 8.4.2 。图像处理板的详细情况被汇集在表 8.4.3。

表 8.4.2 CCD相机详细情况

Scanning system	CCIR standard, 625TV Lines, 50fields/sce
Image device	1/2″ frame transfer CCD
Picture Elements	800(H)×600(V)
Resolution	Horizontal: more than 570TV Lines Vertical:more than 400TV LInes
Electronic shutter	1/120－1/40000 sec
Gain control	NOR/LIGHT (+6db)
Environmental	Temperature: －10°c to 50°c

表 8.4.3　图像处理板的详细情况

Resolution of image	768×576
Computer bus	PCI
Data of input	256×8 bit
Windows of collection	User installation
Number of input channel	4
Mode of use	Plug & play
Environment of use	Dos, Windows, WindowsNT

2）GPS装置

选择 GPS接收器通常要考虑性能与价格比，其性能一般包括定位精度和动态跟踪能力等。WUMMS 选择 Motorola GPS 系统作为接收器，它具有良好的可操作性，能适应多种 OEM 配置。其高度集成的数字接受器具有两个用户定制（数字信号处理器）的 Zodiac 芯片，它们具有存储功能，需要很少的外部配件，构成了低能耗、高效率、易于操作的 GPS OEM 接受装置。其主要参数参见表 8.4.4。

表 8.4.4　GPS 主要参数

Ability of tracking	12 satellites
Dynamic features	Speed:950 meters/sec acceleration:6g
Requisition	2 seconds typical with 10 seconds blockage
Position accuracy	Less than 25 meters (SA off) Less than 100 meters (SA off)
Timing accuracy	0.001 second(1 pps output)
Solution Update Rate	Once per second
Time Mark	Once per second

3）激光测距仪

Leica DATA DISTO RS232 激光测距仪是 WUMMS 中重要的测绘传感器，它具有下面两个特征：

(1) 不需要协作目标，

(2) 非接触的点测绘。

通过 RS232 接口，不仅 DATA DISTO 能利用计算机进行操作，而且可存储的数据也能无限制地被传递。

由于 DATA DISTO具有更丰富的空间 3 维信息但含有较多噪声，因而一个摄影机被连接到 DATA DISTO，以便实现 3 维测绘。

DATA DISTO 的主要参数参见表 8.4.5。

表 8.4.5 激光测距仪主要参数

Typical measuring accuracy	±3mm
Smallest unit displayed	0.1mm across interface
Measuring range to natural surfaces	0.2m to 30m
Measuring range to target plate	20m to 100m
Time for a measurement	2.5sec to 10 sec
Operation temperature	−10℃ to +50℃

8.4.2 系统功能

WUMMS 是一个基于 GPS、GIS 和 CCD相机的多目的移动式测绘系统。它可以用作车辆导航、地物量测、环境数据采集以及其它用途。

1) 车辆导航

WUMMS 有两种导航方式，一种是随意导航，另一种是最佳路线选择。前者主要是实时地在电子数字地图上给出车辆所在位置；后者通常是在一定距离内，确定从某个始点到某个终点的最短路径，并且在监视器的屏幕上用特别的颜色加以区别。

屏幕上的界面可以被分成两个部分，左边部分用来表示驾驶员坐标系统，右边部分用来表示数字地图坐标系统。信息的输入和输出除了通常的方式以外，还可以在多媒体环境下通过声音实现。

车辆导航过程中若遇到暂时的 GPS 信号丢失,可在 GIS系统支持下利用惯性导航装置进行补偿。

2) 地物测绘

在 WUMMS 中,有一种绝对定位传感器,即 GPS 接受机。另外，还有两种相对定位传感器,他们分别是被动式传感器 CCD摄像机和主动式传感器激光测距仪，后者是一种前景看好的精确距离测绘仪器。

通过 CCD摄像机 WUMMS可以同时获取多景地物的影像，并可构成立体像对。这些立体影像可利用有一定滞后的 GPS 数据作为地理参考数据,其结果可用于 3 维重建。

3 环境数据采集

除了测绘地物位置的传感器，WUMMS还可以加载温度、湿度、压力和温度等反映环境参数的传感器。采集这些数据可以直接利用来自人声的指令，也可以利用存放在磁带里的声音指令。利用声音采集环境数据是很有用的，特别是当环境数据与路名和街名以及地址有关时。数字声音可以像其它与地址相联系的属性数据一样存贮。

4) 数据获取、处理、贮存和管理

集成了多种传感器的移动式测绘系统一般由数据获取、处理、贮存和管理等过程组成（参见图 8.4.4)[10]。这样的移动式测绘系统通常装有定位传感器（如 GPS）以确定测绘车辆的绝对位置。此外，还会配有相对定位传感器和其它测绘传感器。一般情况下，绝对定位数据被首先获得,然后再获取相对定位数据。

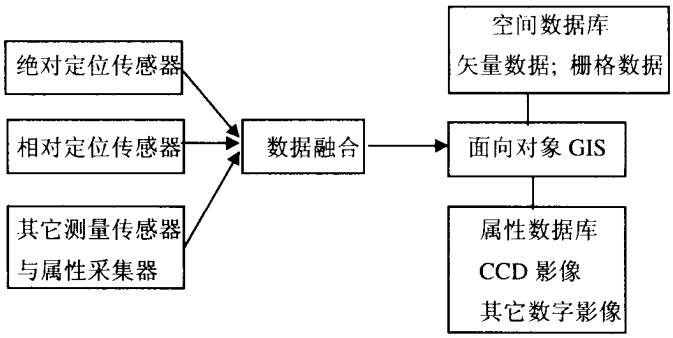


图8.4.4 集成了多种传感器和多种功能的移动式测绘系统的概念模型

从图 8.4.4可以看出,各种传感器收集的数据必须被集成,以便产生一个综合的多媒体空间数据库,它包括空间数据、属性数据、图像数据以及其它测绘数据。在数据集成的过程中,应对被集成的数据进行评价。例如,在 GPS数据和 INS数据的集成过程中，应该评价在什么情况下使用 GPS和 INS集成数据，以便最大程度地克服因卫星信号被遮挡所产生的定位信息缺失问题。

总的来说,按照图 8.4.4设计的移动式测绘系统是建立空间和属性数据库的一种重要辅助手段,但还不够完善。WUMMS除了具有图 8.4.4所提出的功能外，还考虑了老的 GIS数据库的利用问题，其中比较突出的就是空间数据挖掘和知识发现问题。例如，从老的 GIS数据库可以得到有用的控制点和线状特征，它们是利用 CCD和激光测距仪数据进行地物 3 维重建中的重要地理参考数据。

WUMMS既是一个完整的系统,同时,各个模块又具有相对的独立性。例如,可以独立地安装道路测绘模块或地物测绘模块。为了便于多媒体空间数据的管理，在 WUMMS 的多媒体 GIS 数据库中,将数据分为空间和属性两种数据,其中空间数据又有 3 维矢量数据和地学编码栅格数据构成。

8.4.3 应用前景

WUMMS 已经被用于自动车辆导航、建筑物的测绘与绘图、道路网的测绘。除了这些应用,它还可被用于交通信号管理、监测车辆速度和停车场的违规现象、高速公路路面测绘、城市 3 维模型绘制等。此外,由于 WUMMS能在较短时间内重复测绘各类对象，因而可成为更新

空间数据库的重要手段。总之，类似 WUMMS 的移动式测绘系统具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] 王兴文，李德仁．射影空间中摄影测量基本几何关系式的建立，武汉测绘科技大学，1999,24(3)：227～229.

[2] 方德植,陈奕培.射影几何．北京 高等教育出版社，1983

[3] 李德仁,王新华．CCD阵列相机的几何标定．武汉测绘科技大学学报，1997,22(4)：309～313

[4] Curry, Baumrind. Calibration of an Array Camera. PERS , 1986, 56(3): 627～636

[5] J.Fryer, S. Mason. Rapid Lens Calibration of a Video Camera. PERS, 1989 , 55(4): 437～442

[6] R.Y.Tsai. A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using off－the－shelf TV Camera and Lenses, IEEE RA. 1987, 3(4): 323～344

[7] 张奇等 ．基于 Dempster－Shafer 证据推理理论的 ALV 视觉信息融合．计算机学报，1999, 22(2): 193～198

[8] Li Deren et al. A Mobile Mapping System Based on GPS, GIS and Multi－sensor, Proc. Int. Workshop on Mobile Mapping Tech., 1999, Bangkok, Thailand

[9] C. Tao. Towards Sensor International Workshop on Urban Multi－Media/3D Mapping (UM 3'98) , 1998:97～104

[10] K. Novak. Mobile Mapping Technology for GIS Data Colletion, PE&RS, 1995, 61(5), 493～501

第 9 章　空间数据库及其组织

在这一章中，我们将从空间信息集成的角度，首先对不同性质和要求的各类数据库做一介绍。然后就空间信息集成中的热点问题之一，一体化的空间数据结构进行一些探讨。在大型空间数据库中，地理数据的几何接边和逻辑接边问题也不容忽视，它们关系到如何保持地物的连续、完整和一致性表达。为此，本章也将就这方面的问题作一些介绍。为了对空间信息进行统一的存贮和处理，需要选择合适的空间对象描述，以便有利于各种软件模块之间信息的交换。针对这个问题，本章提出了空间象系统的形式化描述的概念。此外，本章还介绍了矢量与栅格集成的二维和三维数据模型以及基于集成的数据库的 3 维可视化模型。

9.1　多样性的数据库

在空间信息的处理中，除了用于一般数据处理的数据库以外，还涉及到不同性质和要求的其它数据库类型。这些数据库有的着重考虑数据时空特点，有的着重考虑数据的数学和物理特点，还有的对数据的信息特点比较关注。这些数据库类型在空间信息集成中都会遇到，有必要作一些讨论。

对于从事地球空间信息研究的人员来说，地理信息系统(GIS)对大家都不陌生，其核心部分是地理数据库。在普通的数据库中，要表示对象之间的空间关系是很困难的，而地理数据库借助各种时空准则,能对对象的长、宽、高,对象之间的距离,对象的边界等进行详细的描述。对这类数据库，时间也是很重要的，因为用户可能想知道影像资料是何时获取的，想知道建筑物何时拆卸以及随时间所发生的各种变化等。其它有意义的概念还有相邻性和包含性等，如一座特定的建筑可能属于公园，而其邻近的建筑物可包括政府的办公楼。这里的邻近往往是从最近的意义上讲的，如相距一座房子最近的学校或消防站。所有这些特殊要求就构成了地理数据库系统的特色。

作者在研究空间信息系统集成的过程中，把实况数据采集系统当成了一个重要的组成部分，并着重用于环境参数的采集、组织和管理。在环境信息处理中，有一些专业性很强的信息如噪声强度、温度、大气中的有害气体含量等，它们的具体数值通常是由实验和观测得到的。这些数值之间往往遵守方程式表示的科学定律，这些定律一般可用作对数据库的约束。例如，

有三个属性,即某风向的污染系数(λ)、某风向的风向频率(f)和某风向的污染风频（ f_p）,其约束为 $f_p=\lambda f$。这种约束与关系数据库中的函数依赖是不同的。在函数依赖情形下，每个符号或名称都是直接或等价地通过示例加以定义。也就是说，在定义数据库中的符号或名称时，我们指定一个实在或抽象的对象，并标出或隐含它与所论符号的兼容程度。符号或名称之间的关系是纯外延的，不能由某一过程产生出来。而这里的约束不仅可由某一过程产生出来，它还存在与真实数值之间的精确性和近似性问题，可能由于这类问题的存在使得不能满足约束。在这类数据库中，还存在单位与对象之间的转换，以及实验中数值随时间改变等。

空间现象和空间过程是非常复杂的，既有必然的规律又有偶然的因素影响。因此，研究空间问题既要弄清主要因子之间的关系，又要处理许多次要因子的随机影响，所以通常将成因分析与统计分析相结合去解决问题。由此形成的数据库一般用识别算法和生成算法表征。在景物的识别和构型中，目前常用的方法有三种，一种是由图像恢复表面的方法，它是通过一系列不同层次的表象进行的。原始层由局部图像特征直接计算，而更高层由前层小区域内包含的信息计算。第二种方法是使用高层次特殊模型系统。目前，一般是在“教师”的监督下把新的模型类别输入到已知模型的数据库中。另一种方法兼有前两种方法的特点，它设想把世界模型化为一系列不断出现的相对简单的基本形态，通过大量不同组合形式将这些基本形态结合起来，可以产生我们周围环境的表面复杂性。这几种方法的共同特点是都包含了识别过程和生成过程，都需要相应的数据库支持。

还有一类较有特色的空间数据库系统是面向自动车辆定位与导航的数字地图数据库系统[1]。一个自动车辆定位与导航(AVLN）系统可以看成是能够集中并且自动确定、显示和控制汽车在某一区域的位置和运动情况的技术与设备组合。所有过程都不同程度地依赖于数字地图。数字地图所起作用的大小和性质由 AVLN的用途决定。

AVLN系统分 4类：(1)车队管理系统，包括调度系统；(2)自主型系统；(3)咨询系统,接收实时交通信息；(4）特征信息采集系统或编目系统，采集道路状况和与道路有关的交通基础设施信息。

不同系统对地图的需求有差异。自主型系统和咨询系统需要依靠数字化道路图完成车内导航功能。这两种系统的主要区别在于后者使用一个通讯链来接收交通拥挤信息和辅助数据，运用实时信息处理器更有效地避免交通问题。车辆收到实时数据时，确定最佳线路，并赋予相关路线一个阻抗值，降低它们符合需要的程度。

调度型 AVLN系统可应用于许多领域。这类系统的用户可以是商业部门（例如出租或公交车队、投递和收集车队等）、市政部门(如消防车辆及救护车辆等)或者安全部门(如要员保护）。尽管用途各异，但都具有监视并且分配一队车辆的共同任务。这就要求调度中心和车辆操作人员之间具有一个通信链。调度工作主要在调度中心完成，只有少量在车辆内进行。位于每个车队管理中心的数字道路图的调度或控制中心对其车辆进行跟踪监视时，被跟踪的车辆是否需要车内数字道路图要根据系统的用途而定。跟踪被盗车辆的系统显然不需要车内地

图，而急救车辆调度系统却能从车内具有的线路指南地图得到极大帮助。

在这 4 类系统中，只有编目系统不需要车内数字道路图，因为该类驾驶员一般不需要导航系统。

以上几类数据库是包含了独特对象的数据库。这些数据库与在数据处理中被标准规格化的极其有用的表是不同的。不过，在特定应用中有可能涉及若干种不同类型的有用数据：如文本、声音、图像和表格化的数据等，含有这些数据的数据库称为多媒体数据库。多媒体数据库的问题包括不同类型数据的有效存贮以及将不同对象类型综合到单个相同的框架中。用户需要具有输入不同数据类型的能力以及用直接方式扫描不同数据类型的能力。

多媒体空间数据库结合空间数据库和多媒体数据库的特点，采用两者的数据存储与处理方法，以空间对象为主框架，将多媒体数据附着于对象上，解决多媒体数据与空间数据之间的整合关系[2]。在空间数据的具体组织中主要涉及以下几方面内容：

(1)属性数据组织

属性数据是指一个对象的非空间、非多媒体数据，如对象的名称和类型等，属性数据是由多个属性数据项组成的。

(2)空间数据组织

空间数据是多媒体空间数据库系统的核心，是整个系统的主体。基本空间数据类型有点、线和面。为了减少数据冗余，可采用以结点和弧段为基础的数据组织形式，即只有结点和弧段才包含空间位置信息，其他空间对象都是由这些基本结点和弧段构成的。

(3)静态图像数据组织

静态图像数据是指通过分析和处理（如压缩）后以某种图像格式存储的图像数据，可以是一般的景物图像，也可以是遥感图像。

(4)动画数据组织

动画数据是指可连续播放的动画帧数据（如车载 CCD 数据),帧之间用特殊的符号区分、这类数据一般较大。

(5)声音数据组织

声音数据是指音乐或文字的声音文件数据。

在上述的各种数据中,空间数据的操作最为重要,文献[2]认为它应有这样一些功能组成：

①功能较强的点对象编辑,提供修改、增加、删除、复制点对象图元等。

②灵活的线对象编辑,能将图上各种线性符号表示的要素(如铁路、公路和街道等)以线为单位作为线图元进行编辑,并可对线对象进行连接、组合、增加、删除、修改、剪裁、提取、平滑、改向、旋转和产生平行线等。

③方便有效的面对象编辑功能、可对任何区域的边界进行剪裁、连接、移动、删除和增加等。

④能通过对象的类型进行分层管理和分层操作，以便进行空间数据分析。

目前，标准的空间数据库系统通常不具有推理新事实的能力。随着从空间数据库中发现知识和空间数据挖掘技术的进步，在建立专家系统中苦于无法建立专家知识库这一类困难正在逐步得到解决。由于这样的原因，建立专家空间数据库系统正成为新的研究方向。这一类数据库将专家系统的空间知识表示和空间推理能力相结合，具有访问、恢复、并发以及大型数据库其它方面的特点。

9.2 矢量栅格一体化数据结构[3]

9.2.1 一体化数据结构的概念

从文献[3]所介绍的几种基于四叉树的数据结构可以看出，人们为了解决矢量与栅格数据能够直接交互的问题不惜设置大量复杂的指针，花费大量的存贮空间设计矢量与栅格的混合数据结构。

按照传统的观念，矢量和栅格似乎是两类完全不同性质的数据结构。矢量数据是面向地物的结构，即对于每一个具体的目标都直接赋有位置和属性信息以及目标之间的拓扑关系说明。但是矢量数据仅有一些离散点的坐标，在空间表达方面它没有直接建立位置与地物的关系，如多边形的中间区域是空洞，其间的任何一点并没有与某个地物发生联系。与此相反，栅格数据是面向位置的结构，平面空间上的任何一点都直接联系到某一个或某一类地物。但对于某一个具体的目标又没有直接聚集所有信息，只能通过遍历栅格矩阵逐一寻找，它也不能完整地建立地物之间的拓扑关系。因而，从概念上形成了基于矢量和基于栅格两种类型的系统，分别用于不同的目的。为了设计一种系统用于多种目的，我们希望找到一种一体化的数据结构能够具有矢量和栅格两种结构的特性。

从几何上说,空间目标通常有 4 种表达方式[5]:

(1)基本实例表达(Primitive Instancing,简称 PI),即是说一个几何目标可由一组固定参数表示,例如,一个正方形仅由一个边长参数描述;

(2)元子空间充填表达(Spatial Occupancy Enumeration,简称 SOE),即用一定数量固定大小的空间元子充填几何目标，这种方法主要用于计算机领域;

(3)元件分解表达(Cell Decomposition,简称 CD)，即一个几何目标可以认为是由各种不同形状和大小的简单元件组合而成，例如，一栋房子可以由一个长方体的房体和四面体的房顶组成;

(4)边界表达(Boundary Representation ,简称 BR),即一个目标由几种基本的边界元素,即点、线、面组成。

在解析几何、地图制图和传统的基于矢量的 GIS 中,人们主要使用边界表达方法,这种矢量结构用一组取样点坐标表达一条弧度或一个多边形，这是人们使用地图引申的习惯概念。用这种数据结构，人们可以求弧段的长度或多边形的面积及其它解析几何问题。因而人们也就习以为常。这里忽视了一个重要的差别，即目视的几何目标与计算机内部表达不是同一概念，在地图或屏幕上看到的一条连续的弧段，在计算机内部只是一些离散的点坐标。在屏幕上看到光标落在直线上，在计算机内部并不能直接反映出来，只能借助于解析计算进行判别。

对于 GIS 中的几何目标,理想的方法是用数据直接表达,而不是借助其它方法“反映”出来。否则,由于数据结构的不完善;“反映”也就不能及时。显然,GIS 中使用元子空间充填表达是一种理想的方法。在基于栅格的 GIS 中，人们已经用元子空间充填表达方法表示面状地物。对于线性目标，以往人们仅使用矢量方法表示，事实上，如果也采用元子空间充填表达方法表示线性目标(如弧段),可以将矢量和栅格的概念辩证统一起来,进而发展矢量栅格一体化的数据结构。假设在对一个线性目标数字化采样时，恰好在路径所经过的栅格内部获得了取样点，这样的取样数据就具有矢量和栅格双重性质。一方面，它保留了矢量的全部特性，一个目标跟随了所有位置信息,并能建立拓扑关系;另一方面,它建立了路径栅格与地物的关系,即路径上的任意一点都直接与目标建立了联系。

因此，我们用填满线性目标路径和充满面状目标空间的表达方法作为一体化数据结构的基础，每个线性目标除记录原始取样点外，还记录路径所通过的栅格，每个面状地物除记录它的多边形周边以外，还包括中间的面域栅格。无论是点状地物、线状地物、还是面状地物均采用面向目标的描述方法，即直接跟随位置描述信息并进行拓扑关系说明，因而它可以完全保持矢量的特性，而元子空间充填表达建立了位置与地物的联系，使之具有栅格的性质。这就是一体化数据结构的基本概念。

为了设计 GIS 中的点、线、面状地物的具体数据结构,文献[3]的作者作了如下约定：

(1)地面上的点状地物是地球表面上的点,它仅有空间位置,没有形状和面积,在计算机内部仅有一个位置数据。

(2)地面上的线状地物是地球表面的空间曲线，它有形状但没有面积，它在平面上的投影是一连续不间断的直线或曲线，在计算机内部需要用一组元子填满整个路径。

(3)地面上的面状地物是地球表面的空间曲面，并具有形状和面积，它在平面上的投影是由边界包围的紧致空间和一组填满路径的元子表达的边界组成。

从原理上说，我们要设计的一体化数据结构是一种以栅格为基础的数据结构。但文献[3]已经指出,栅格数据结构的精度较低,为此,提出细分格网方法用以提高点线的栅格表达精度。

9.2.2 细分格网方法

GIS几何目标的精度主要是指点、线(包括面状目标边界线)数据的表达精度。这里提出的细分格网方法即是为了提高点、线目标的表达精度,使一体化数据结构中的精度达到或接近

传统矢量表达精度。

细分格网方法的要点是在有点、线目标通过的基本格网内，再细分 256×256 个细格网(精度要求低些时，可细分成 16×16 个细格网)。为了与整体空间数据库的数据格式一致，基本格网和细分格网可都采用线性四叉树的编码方法，将采样点以及线性目标与基本格网边的交点，用两个 Morton 码表示。(后面所用的 Morton 码，都是指十进制码，并简称 M 码)前一个码 M_1 表示该点(取样点或附加的交叉点)所在的基本格网的地址码，后者 M_2 表示该点对应的细分格网的 Morton 码，亦即将一对 x,y 坐标转换成两个 Morton 码。例如，$x=210.00$，$y=172.32$ 可以转换为 $M_1=275$，$M_2=2\ 690$。

这种方法可将栅格数据的表达精度提高 256 倍，而存贮量仅在有点、线通过的格网上增加 2 bytes(当细分成 16×16 个格网时，存储量仅增加 1 byte，精度提高 16倍)。

9.2.3 粗网格线性四叉例索引

在数据库技术中，人们通常使用 B树或 B^+ 树索引大型数据文件，这是提高数据库操作效率的一项重要技术。栅格矩阵数据转换成四叉树或二维行程编码以后，也是一个大型的线性数据文件，因而索引技术亦是非常重要的。一些学者建议采用通常的 B+树索引线性四叉树文件，而文献[3]认为，对于线性四叉树或二维行程编码数据文件，仍采用线性四叉树索引方法更为有利。

1) B^+树索引方法

对于一个线性表列的顺序文件，最通常的方法是把顺序文件分成一定大小的数据块，把每块最后一个记录的主关键字和该块的开始地址组成一个索引项。再把所有这样的索引项，按主关键字值的顺序排列组成索引文件，而索引本身亦构成顺序文件，可用顺序文件的查找方法查找索引项。当索引项很多时，也可以建立更高一级的索引，以提高查找的效率。

对于插入、删除、修改操作频繁的数据文件，常采用 B^+ 树代替一般的索引树，B^+ 树定义如下：

凡满足条件：

(1)根结点至少有两个孩子；

(2)树中所有叶子都在同一级；

(3)所有关键字都放在叶结点上，上层结点的关键字是其对应低层结点或孩子中低位（或高位）关键字的复写；

(4)各叶结点按顺序链接；

(5)除根结点外，每个结点不少于 m 个孩子；

(6)每个结点不多于 $2m-1$ 个孩子；

的树称为 M 阶 B^+ 树。

B^+ 树不同于一般索引树的地方在于：对它进行任何插入，删除都必须满足 B^+ 树的定义，

在 m 阶 B^+树中，所有索引块结点中至多能有 $2m-1$ 个索引项,(除根外)至少有 m 个索引项。这些条件为数据的插入和删除提供了方便，在一般的索引树中，由于数据文件和索引文件都是密集存放的、当要插入一个数据时，不仅要引起主数据文件的大量记录移动，还可能引起索引树的修改或增加。而使用 B^+树索引，情况则不相同，它只会引起数据的局部移动或修改。为使数据块和索引项满足 B^+树的第 5、第 6两项条件，数据文件和索引文件已余留一些空块,这样便于直接插入数据,同理,对于删除操作,也仅需作局部调整,不需要引起整个数据库的大量变化。这是 B^+树具有的优点。然而，我们注意到，无论是一般的顺序索引树还是B^+树，都是以数据块的大小建立索引项的。而 GIS 中的几何数据，特别是线性四叉树(LQ)或二维行程编码(2DRE)数据是与位置有关的。在 LQ 和 2DRE文件中,一般将 Morton 地址码作为关键字,Morton 码本身隐含了位置信息，而前面所述的两种索引方法部不能利用这一优点。它们仅按数据的大小分块,例如以 512 bytes分成一个数据块。这样，一个数据块对应的几何位置可能是随意的，因而查询某个记录只有按索引树逐级查找。如果采用粗网格的线性四叉树索引方法，建立索引文件与几何位置的直接关系，则可省去查找索引文件的时间，而根据关键字(隐含了位置信息)直接进入某个索引项。

2) 粗网格线性四叉树索引方法

将 16×16 个基本格网组成一个粗网格，每个粗网格也用十进制的 Morton 编码。这些粗网格形成一个索引表。显然它的顺序是按 LQ 的地址码排列的。索引表中每个记录用一个指针指向对应粗网格包含的第一个记录在 LQ 或 2DRE 文件中的起始地址。为了统一起见，每个 LQ 的叶结点或 2DRE 的游程段不能超过一个粗网格。这样，便建立了索引记录与 LQ 或 2DRE 线性表的关系,如图 9.2.1 所示。

根据某点的位置可直接进入索引记录，进而找到该点对应于 LQ 或 2DRE 文件的记录。例如,查找 $M_1=4235$ 的叶结点的属性值，先求出它的粗网格地址码 $M_0=4235/256=12$,直接进入索引中的第 13号记录(记录号＝ M_0+1) ,根据指针找到该粗网格在 LQ或 2DRE 表中的起始记录号,再往下查找,即可得到该叶结点的属性值,注意到这里不需要搜索索引表,而是直接进入第 13 号记录。此外，由于粗网格 Morton 码与记录号存在直接的联系，还可以省去索引文件中的 Morton 码，而用隐含的记录号代替。

粗格网索引与普通索引树索引相似，只是前者是面向位置设置的索引，而后者是面向数据块设置的索引。使用线性四叉树索引方法，只要设置一级索引表，因为查找时可直接按主关键字(Morton 码)进入索引项,没必要再建立更高一级的索引。

为了便于插入和删除操作,可以引人某些 B^+树的思想。首先将 LQ或 2DRE 的向量数据按一定规格分成数据块,如以 512 bytes为一数据块。分块时,按照两项原则,第一项原则是每个数据块不超过 512 bytes ，另一原则是一个数据块中对应的栅格数据不能跨越一个粗网格，即是说一个数据块中不能包含有两个粗网格的 Morton码。这样,每个粗网格索引,总是从某一数据块的起点开始，若一个粗网格的数据不满一个数据块，则该数据块后面的存储区为空；

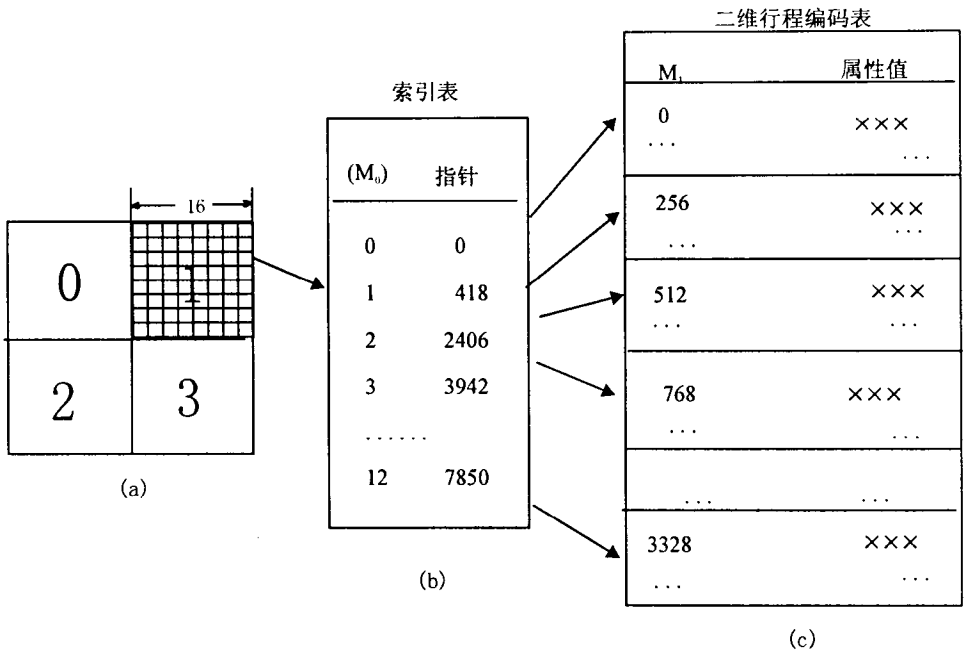


图 9.2.1 粗格网索引

若一个粗网格的数据量大于一个数据块，则开辟两个或两个以上的数据块，并且与 B+树一样将所有数据块用链指针串起来，链指针放在每个数据块的最末尾。

对于插入和删除操作,这种方法具有与 B^+树相同的效率。当要在 LQ和 2DRE文件中插入一个记录时，如果该记录对应的数据块不满 512 bytes,则直接插到这一块,必要时,只需移动该数据块中的有关记录，索引指针和其它数据块都不必变化，当该数据块记录已满时，开辟一个新的数据块，并修改原数据块末尾的指针，指向新数据块，以及把新数据块的指针指向原数据块老指针所指的地址。

9.2.4 一体化数据结构的设计

线性四叉树编码，多级格网方法和前面所述的三个基本约定为建立矢量与栅格一体化的数据结构奠定了基础。在一体化数据结构中，所有几何位置数据采用线性四叉树地址码为基本数据格式，保证了各种几何目标的直接对应；采用细分格网方法使我们有可能不存贮原始采样的矢量数据,用转换后的数据格式亦能保持较好的精度;三个约定是我们设计点、线、面数据结构的基本依据。

1 点状地物和结点的数据结构

根据基本约定 1)，点仅有位置，没有形状和面积，不必要将点状地物作为一个覆盖层分解四叉树,只要将点的坐标转化为 Morton 地址码 M_0 和 M_1，而不管整个构形是否为四叉树。这种结构简单灵活，不仅便于点的插入和删除操作，而且能处理一个栅格内包含多个点状目标的情况。

所有的点状地物以及弧段之间的结点用一个文件表示，其结构见表 9.2.1。

表 9.2.1 点状地物和结点的数据结构

点标识号	M_0	M_1	高程 Z
…	…	…	…
10025	43	4082	432
10026	105	7725	463
…	…	…	…

这种点状地物的数据结构几乎与矢量数据的结构完全一致。

2）线性地物的数据结构

线性地物的四叉树表达被认为是最困难的[5]，它需要解决与面域的四叉树数据直接对应的问题,文献[3]介绍的几种方案都相当复杂，而且对于线性地物的插入和删除操作相当困难。采用下面提出的填满路径的元子充填表达方法，它的数据结构将变得相当简单，而且能非常容易地进行与其它地物类型的四叉树数据的交互和插入、删除等操作。根据对线性地物的约定 2),线性地物有形状没有面积,而且表达形状应包含整个路径,没有面积意味着,线性地物与点状地物一样不必用一个完全的覆盖层分解四叉树，只要用一串数字表达每个线性地物的路径即可，要表达整个路径则要求该线性地物所经过的栅格地址要全部记录下来。一个线性地物可能由几条弧段组成，所以先建立一个弧段的数据文件如表 9.2.2 所示。

表 9.2.2 弧段的数据结构

弧标识号	起结点号	终结点号	中间点串(M_0,M_1,M_z)
…	…	…	…
20078	10025	10026	58,7749,435,92,4377,439…
20079	10026	10032	90,432,502,112,4412,496…
…	…	…	… … … …

表 9.2.2 中的起结点和终结点是该弧段的两个端点，它们与表 9.2.1 联接可建立弧段与结点之间的拓扑关系。表 9.2.2 中的中间点串不仅包含了原始取样点（已转换成 M_0 和 M_1 表示），而且包含了该弧段路径通过的所有格网边的交点，它所包含的码填满了整个路径。这样的结构也充分考虑了线性地物在地表的空间特征，一条线性地物是在崎岖的地面上通过的，只有记录曲线通过的 DEM 格网边上的高程值才可能较好地表达它的空间形状和长度。

这种数据结构比单纯的矢量结构增加了一定的存储量，但它解决了线性地物的四叉树表

达问题，使它能与点状及面状地物一起建立统一的基于线性四叉树编码的数据结构体系，这对于点状地物与线状地物的相交，线状地物相互之间的相交，以及线状地物与面状地物相交的查询问题变得相当简便和快速。

有了弧段的数据文件,线性地物的数据结构仅是弧段的集合表示,如表 9.2.3 所示。

表 9.2.3　线状地物的数据结构

线标识号	孤标识号串
…	… …
30031	20078, 20079
30032	20092, 20098, 20099
…	… …

3)面状地物的数据结构

按照基本约定，一个面状地物应包含边界和边界所包围的整个面域。面状地物的边界也是由弧段组成的，它同样引用表 9.2.2 中弧段的信息。除此以外它还要包含面域的信息，面域信息则由 LQ 或 2DRE 文件表示。

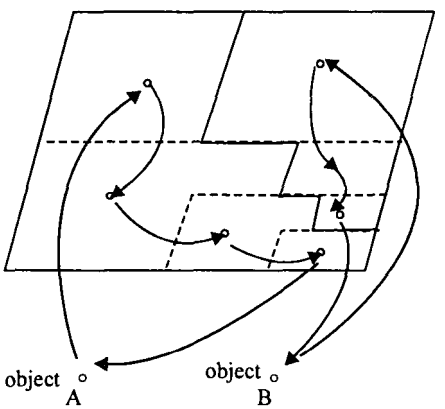


图 9.2.2　面向地物 2DRE

各类地物可能形成多个覆盖层,例如,地面上的建筑物、广场、耕地、湖泊等可视地物可作为一个覆盖层，而行政区划和土壤类型又可形成另外两个覆盖层。这里规定每个覆盖层都是单值的，即每个栅格内仅有一个面状地物的属性值。一个覆盖层是一个紧致空间，即使是岛也含有相应的属性，每个覆盖层需要分解一颗四叉树或用一个 2DRE线性表表示。为了建立面向目标的数据模型，叶结点的格网值不是基于地物的属性，而是基于目标的标识号，并且用循环指针将同属于一个目标的叶结点链接起来,形成面向地物的结构。图 9.2.2 是一面向地物的二维行程编码，表 9.2.4 是对应的 2DRE 线性表。

2DRE 线性表是按基本格网的 Morton 码顺序排列的，表中的循环指针指向该地物的下一个子块的记录（或地址码），并在最后指向该地物本身。只要进入第一块就可以顺着指针直接提取该地物的所有子块，这样可以避免象栅格矩阵那样为了查询某一个目标而遍历整个矩阵，从而大大加快了查询速度。

表 9.2.4　2DRE 线性表

基本格网 M_0 码	循环指针
0	32
16	52
32	56
52	61
56	62
61	B
62	A
…	…
…	…

对于面状地物中的边界格网，采用以面积为指标的四舍五入方法确定它的格网值，即是说两地物的公共格网其值取决于哪个地物占该格网的面积比重大。如果要精确进行面状地物的面积计算或叠置运算，可以进一步引用弧段的边界信息参与计算或修正。

表 9.2.2 的弧段文件和表 9.2.4 的 2DRE 文件是面状地物数据结构的基础，文件结构如表 9.2.5所示。表中的面块头指针指向 2DRE 表中该地物对应的第一个子块。

表 9.2.5 面状地物的数据结构

面标识号	弧标识号串	面块头指针
40001(A)	20001, 20002, 20003	0
40002(B)	20002, 20004	16
40003	20004	64
…	…	…

这种结构是面向目标的，并具有矢量的特点，通过面状地物的标识号可以找到它的边界弧并顺着指针提取出所有中间面块。同时它又具有栅格的全部特征，2DRE 表本身就是面向位置的结构，表 9.2.4 中的 Morton 码表达了位置的相关关系，前后两个 Morton 码之差隐含了该子块的大小。一个覆盖层形成一个 2DRE 表，从第一个记录到最后一个记录表示面块覆盖了工作区域的整个平面。给出任意一点的位置都可在 2DRE 表中顺着指针找到面状地物的标识号确定是哪一个地物。

4）复杂地物的数据结构

单独用一个点，或一条线，或一个面状地物组成的地物称为简单地物。由几个或几种简单地物组成的地物称为复杂地物。例如我们可以将一条公路上的中心线，公路面，交通灯，立交桥等作为一个复杂地物，用一个标识号表示。复杂地物的数据结构如表 9.2.6 所示。

表 9.2.6 复杂地物的数据结构

复杂地物标识号	简单地物标识号串
…	… …
50008	10025，30008，30025
50009	30006，30007，40032
…	… …

9.3 空间数据结构与索引机制

当把图像数据和图形数据叠置在一起时我们会有多种不同的组织和查询信息的方法。首先，可以假定在图像上已划分了不同的区域，这时我们可能会考虑被不同的区域所覆盖的范围包含了那些种类的图形数据；如果把这些区域当成整体看待区域之间又可以具有什么样的关系。其次，如果把图像数据看成是栅格数据，把来自 GIS 的图形数据看成是矢量数据，那么栅格和矢量在空间位置的表达上又如何统一。第三，如果把图形数据看成是矢量，这些矢量穿越栅格边缘时又会形成什么样的结构。下面我们将就这些问题做一些讨论。

9.3.1 覆盖了多种空间对象的图像区域与空间对象的关系

图 9.3.1 是某工地的一部分。图上有工地、工棚、工程设施、道路等，其中圈有较深色调图块的区域表示图像上的区域，也就是说这些区域作为一个整体与图上其它区域或空间对象发生关系。图上有一条道路和一条河流没有被晕线覆盖，它是来自 GIS 的图形数据，具有坐标、名称、等级等属性。在有些情况下可能需要分别知道(检索或查询)工地、工棚、工程设施与道路的关系，但在另一些情况下，可能只需要从整体上知道(检索或查询)工地、工棚、工程设施与道路的关系，在这种情况下直接用圈有较深色调图块的区域更方便。不过，图 9.3.1 只是一个直观地说明，若需要实际地分析图 9.3.1 上的问题，需要引入某种有利于组织和查询这些关系的数据结构。在此，我们将引入超图数据结构[6]，它是建立一体化的空间数据结构及其索引机制的重要方法之一。

超图通常可以写成 $G=(V,E)$，式中 V 代表节点集，E 代表连接节点的枝集合。V 中的节点和 E 中的枝都可以附属属性集合。属性可用属性对 (A_i,a_i) 表示，其中 A_i 是属性名，a_i 是属性值。图 9.3.1 的区域 R_1 包含三种地物：工地、工棚、工程设施，区域 R_2 包含两种地物：工地、工程设施。这些地物中的每一个地物都可以被认为是一个节点，这样在区域 R_1 中有三个节点，在区域 R_2 中有两个节点。在图 9.3.1 中，连接区域 R_1 和区域 R_2 主要有两种方式，一种是两个区域之间的道路；另一种是两个区域之间的河流。若把它们都当做连接两个区

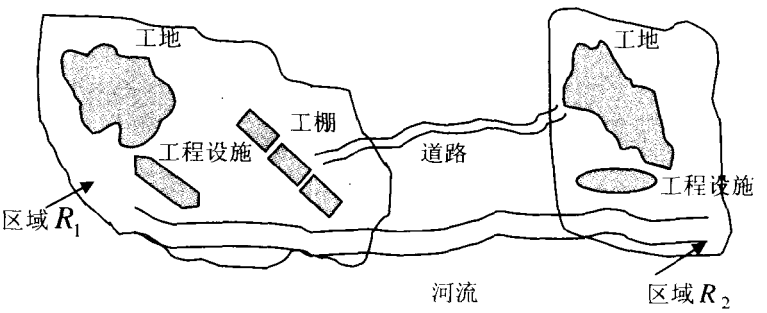


图 9.3.1 覆盖了多种空间对象的图像区域图

域中所包含的节点的枝，则枝集合有两个元素构成。根据这些说明，图 9.3.1 可被表示为图9.3.2，它实际上就是超图的图解表示。超图的两个超节点分别为 G_1 和 G_2，它们本身也是图。其中 $G_1=(V_1,E_1)$，它由以下的节点和边构成：

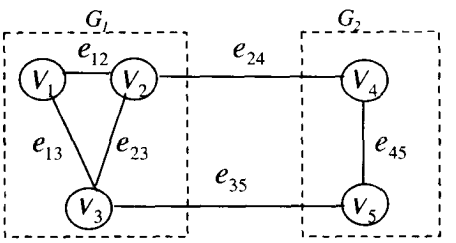


图 9.3.2 根据图 9.3.1 得到的超图的图解表示

v_1 {(type, building - site), (color, white)}

v_2 {(type, work - shed), (color, gray)}

v_3 {(type, establishment), (color, brown)}

e_{12} {(type, mosaic), (building - site, v_1), (work - shed, v_2)}

e_{13} {(type, mosaic), (building - site, v_1), (establishment, v_3)}

e_{23} {(type, neighbor), (work - shed, v_2), (establishment, v_3)}

$G_2=(V_2,E_2)$为：

v_4 {(type, building - site), (color, white)}

v_5 {(type, establishment), (color, brown)}

e_{45} {(type, mosaic), (building - site, v_1), (establishment, v_3)}

两个图 G_1 和 G_2 的连接如下：

e_{24} {(type, passage - road), (work - shed, v_2), (building - site, v_4)}

e_{35} {(type, passage - river), (establishment, v_3), (establishment, v_5)}

上述处理过程可以递归地使用，产生复杂的空间对象描述：以基本属性图描述栅格化的 GIS 数据，接着以图像分割块作为超节点构造超图，然后以等质区作为超节点构造更高层次的超图[7]等。上述过程也可以和图像金字塔相联系，可以按分辨率提取图像金字塔，各层按空

间划分成格网，每块进行压缩存储。在此基础上再提取图像分割块、等质区等。

9.3.2 空间对象在不同表现形式下的索引

如果把图像数据看成是栅格数据，把来自 GIS 的图形数据看成是矢量数据，那么栅格和矢量存在空间位置的表达上的统一问题，它至少包含两个方面的含义：(1) 如何从某一空间位置的矢量表示得到其栅格表示，或者从栅格表示得到其矢量表示;(2) 如何从矢量表示得到相关栅格数据的概略信息，或者由栅格表示得到矢量数据的概略信息。综合起来就是如何得到空间对象在不同表现形式下的索引。

我们在上一节已介绍了建立在线性四叉树索引机制基础上的矢量一栅格一体化数据结构。以此为基础,文献[8]针对面向对象的 GIS 数据结构和空间对象的位置分布特点，采用基于十进制的 Morton 码编码方案，使用自下而上的合并方法建立四叉树。在这种分块思想的指导下,将建库基本工作单元的工作区(一幅或多幅地图)均分成 $n \times n(n=2^k, k>1)$个粗格网，每个格网作为一个桶(Bucket)，将经过该小块的地物对象放入该小块对应的存贮桶中。为使 GIS 一体化数据结构适应精度要求，可对点、线对象通过的粗格网进一步细分。通过这样的过程，可利用块与矢量数据的关系建立空间对象的索引。

对于上述的粗细格网还可以进一步明确粗细格网的地址码与矢量数据的坐标之间的转换关系。为此,文献[9]提出了如下的实施方法。

1) 三级划分策略

第一步是将图幅空间栅格化，考虑到不同目的的空间查询及数据精度要求，这里采用三级划分的策略。首先将图幅区域均等地分成 $M_1 \times M_1$ 个部分,其中 M_1 应为 2 的整幂次方。一级划分得到的块称之为索引块，主要用来存贮线状地物的索引信息。

二级划分是在索引块的基础上进行的，其划分原理与一级划分一样，把每个索引块均等地分成 $M_2 \times M_2$ 个小格，每个小格称作基本格网，基本格网的概念可以同传统栅格图像像元的概念相联系。经一级和二级划分后，基本格网的尺寸已经比较小，因此面状地物充填数据的精度通常只需精确到二级划分。

三级划分是在二级划分的基础上进行的，其目的是为了提高点状地物、线状地物及面状地物边界线空间位置的表达精度，使一体化数据结构的精度达到传统矢量数据的精度。三级划分同样也是将各个基本格网在逻辑上分成 $M_3 \times M_3$ 个细小格子，每个细小格称作细分格网，它是空间划分的最小单位，其大小尺寸决定了一体化数据结构的空间定位精度，因此取值可尽量大一些。

在栅格 - 矢量一体化数据结构中，M_1 和 M_2 的取值对空间数据的检索、编辑及精度有极其重要的影响。M_1 值越大,索引块的尺寸就越小,每一个索引块中包含的目标数也越少,这虽然有利于提高空间目标检索能力,但同时也增加了索引存贮量,特别当 M_1 大到一定的程度时，就可能会出现许多没有目标通过的空索引块；反之，M_1 值越小,索引块的尺寸变大,块内

目标数增多，从而降低了空间索引能力。另外，M_2 的取值直接影响到弧段索引文件的存贮量。

2)存贮结构

在栅格 -矢量一体化数据结构中，点要素的存贮结构可以采用与矢量数据结构完全一致的方法。所不同的是,矢量数据存贮的是(x,y)坐标，而一体化结构中则需将坐标转化成索引块、基本格网和细分格网的地址码 N_1,N_2 和 N_3.

线要素的存贮引入了部分栅格元子充填的策略。所谓部分栅格元子充填即只对一级划分的索引块进行充填，存贮时仍采用角点（索引块点）串的形式存贮。部分栅格元子充填的目的是使充填数据量少，通过充填点串很容易查得该线要素经过的索引块号。

面要素数据仍通过建立面要素标识号与其边界弧段之间的拓扑关系来存贮。所不同的是多边形标识码对应的不是面域中的某一点，而是面域中所有基本格网的集合，即面要素边界区内是通过元子充填的方法表示。

3 空间索引机制

对于线要素索引结构，考虑到索引数据量及操作方便程度，选择了以一级划分格网（索引块）地址码为关键字，采用桶方法建立其空间位置与弧段标识码之间的关系。由于索引块以行次序法编码，其关键字本身隐含了位置信息，且可直接作为线性索引文件数据的下标，即根据索引块编码直接进入某个索引项，从而省去了索引文件中关键字的查找过程。为提高弧段信息的检索速度,弧段信息区的每条记录由三部分组成 弧段标识码,弧段指针,弧段基本格网比特阵。其中弧段指针直接指向该弧段在弧段文件中空间分布数据的存贮位置，而弧段基本格网比特阵存贮弧段在该索引块基本格网中面向空间的分布信息。弧段基本格网比特阵这种面向空间的存贮结构大大地弥补了弧段文件面向目标存贮结构的不足，为空间检索及空间分析提供了极大的方便。

对于面要素索引结构，主要考虑紧凑二叉树表示。其虽也按四叉树的线性代码序列存贮，但它显式存贮四叉树层次结构的特点为自由地组织面要素索引结构提供了可能。文献[9]引入面要素自适应的空间索引结构，其基本思想是在四叉树各层中选择合适的索引结点，存贮该索引结点范围内图像的概略信息，从而达到快速空间检索的目的。概略信息由三部分内容组成：索引结点范围内的属性数，属性值，代码字节数。自适应空间索引结构的关键是索引结点的大小不是固定的，它与面要素的分布有关。

9.3.3 空间对象穿越栅格边缘时的空间关系表示

对于粗细格网法，我们已经看到它较好地确定了不同大小的块与空间对象坐标之间的关系。但也应该注意到，上面提到的粗细格网与空间对象之间的关系实际上被限定在粗细格网的内部，也就是说它反映的是粗细格网的内部作为一个整体与空间对象发生的关系。若把格网结构作一些变化(见图 9.3.3),我们会发现格网与空间对象还有另外的关系。从表面上看，

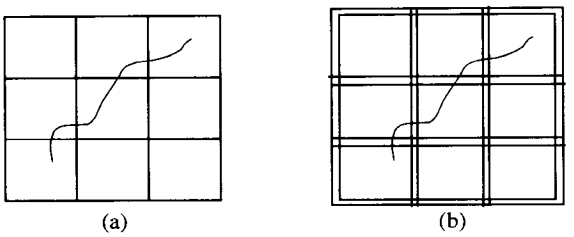


图 9.3.3　格网的扩展

图 9.3.3(b)与图 9.3.3(a)的不同主要在于每个块的边缘用双线突出了块与块之间的界限。实际上，块的边缘用双线表示并不是为了视觉效果，而是提供了一种新的结构，它可用来记录空间对象进出某块的状态。从图 9.3.4 可以看出,利用扩展块的双线边缘结构,我们可以记录空间对象的进出位置和性质，把它们联结在一起就能得到这一块的结点性质。

在粗细格网的结构中，为了达到快速空间检索的目的，有必要选择合适的索引结点，存贮该索引结点范围内图像的概略信息。在这种情形下若把图 9.3.4 的结点特性也作为概略信息存贮,不仅可以把图像数据与来自 GIS 的空间对象数据更紧密地联系在一起，而且更便于将两种数据融合在一起进行空间分析。

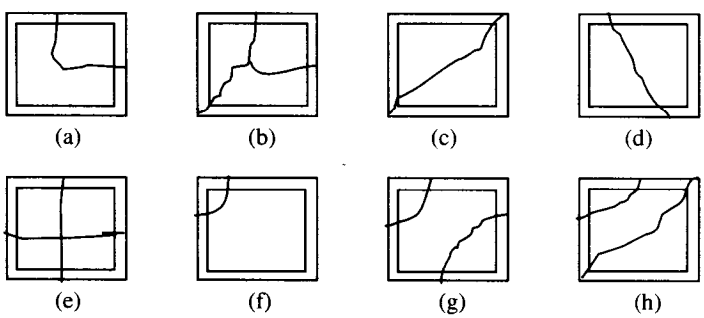


图 9.3.4　通过扩展块提取块的结点特性

9.4　空间数据的无缝组织

空间数据主要包括矢量数据和栅格数据。现有的 G1S系统主要是基于矢量的,具有比较成熟的管理和建立矢量数据库的能力。同时，目前多数 G1S 软件都可以将数字正射影像数

据、遥感数据作为背景影像与矢量数据、DEM 数据进行套合显示。不过，随着遥感技术的不断发展，采集的影像数据量正在呈几何级数增长，现有的 GIS 软件难以组织、调度、存储与管理这样的海量数据，因此，研究和开发能对多数据源、多比例尺、多时相影像数据进行统一管理和集成的大型空间数据库管理系统显得十分迫切[10]。

从影像数据存储与管理的方式来看，目前主要有两种方式可用于这方面的开发：(1)利用现有的商业化程度较高的（扩展）关系数据库能支持影像这样的二进制大对象（BLOB)的特点，影像数据直接入库进行存储与管理；(2)利用文件系统进行存储与管理。基于扩展的关系型影像数据库系统由于采用了传统的关系系统的存取方法主要适合于整型、实型、布尔型和字符型，而未提供对影像数据这类复杂数据类型的快速存取访问，因此效率较低。近年来开始出现了与数据库开发商联合开发并完全支持空间数据的数据库系统。基于此，采用文件系统方式开发大型空间数据库中的影像数据库系统不失为一种行之有效的方法。

为了图像与各级比例尺地图分幅统一，便于影像数据与矢量数据、DEM 数据等综合应用，便于影像数据新产品的分发与共享，使空间数据库系统在应用中走向标准化。以各级比例尺的图幅平均大小作为建库最基本的工作单元是许多 GIS数据库的主要组织形式。这种形式虽然具有不少优点，但也存在一些严重的缺陷，主要表现为[11]：

(1)查询往往涉及到多幅图或在不同的专题间进行。例如，某条路穿越多幅图，系统就必须在多幅相邻图和专题间靠地物标识进行空间和逻辑上的匹配、关联等操作。

(2) 地理实体的完整性和一致性难以维护，同一实体分布或穿越多幅图，在系统中分块或分段存储具有多个编码，存储分散必然导致地物整体一致性维护的复杂性和困难。

(3)分幅管理对于数据共享和地理实体一级的安全性管理增加了难度。

为解决以上各种问题，许多学者和 GIS 软件公司进行了大量的研究。例如，Intergraph 的 MGE，ESRI 的 ARC/INFO等都能建立无缝 GIS 地理数据库。它们能够完成地理数据的几何接边和逻辑接边，但物理上仍然按照图幅的概念进行存储管理，对同一地理实体的多个几何标识进行后台关联处理，对用户来说是不可见的，因而被称为逻辑上的无缝组织。

与上述系统不同的是，文献[11]针对大型地理数据库提出了从逻辑和物理概念上都真正实现地理数据无缝组织的想法。其出发点是基于 Client/Server结构，突破传统图幅分块，在地理数据分布存储前提下，保持地物的连续、完整和一致性表达。

在空间数据库的组织中，完整地表达和存储空间关系和事物间的语义是一项重要的工作。由于位置网络可以把几何的、模拟的数据与一个语义网络相结合，因而可以考虑在空间数据库的组织中引入位置网络，并通过它来实现空间和语义相结合的无缝组织。下面就有关的工作做一些具体的介绍。

9.4.1 工程和工作区

从逻辑上和物理上的无缝组织出发，一个完整的无缝空间数据库可以被看成是一个工

程，换句话说工程中的地物要保持存储、表达的完整性和一致性。例如，一条铁路，在工程中具有惟一的几何标识和地物标识。可以说工程是抽象表达客观世界中完整地物的数据仓库或数据服务器 而‘ 工作区 ’的概念是为了方便使用空间数据库,可以说是在应用时的工程的临时子集，可以按规则大小划分，也可以相互嵌套，最大甚至可以为整个工程。工作区可以包含任何区域、任意一层或多层地物,如图 9.4.1 所示[11]。

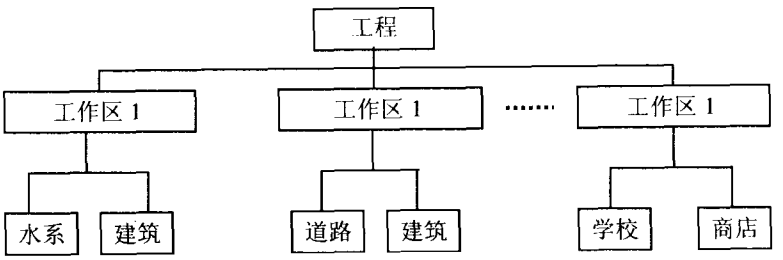


图 9.4.1　工程和工作区关系

不过，为了更好地与各级比例尺地图分幅统一，以各级比例尺的图幅平均大小为工作区更为常见。若工作区的确定还与图像的划分有关，则称此工作区为图像工作区。为了便于快速调度与索引，也为了便于图像快速压缩与解压缩，入库时可对工作区重新组织。对于采用文件系统方式开发大型空间数据库中的影像数据库系统，可建立工作区文件的索引机制，使系统可支持有效的内部影像数据文件。系统以图幅编号命名工作区文件。在连续的一定规模的空间区域内,以同一比例尺的若干个(至少一个)图像工作区数字影像为单位建立的影像库,称为图像工程。对同一比例尺的图像工程，若在工程范围内的工作区数目大，为便于快速地空间索引与历史数据的归档管理，可规划并创建若干这样的同一尺度的图像工程，称为此图像工程的子工程。它具有相对独立的空间索引信息、便于对同一尺度影像数据的调度、历史资料的归档管理、数据产品的分发。

参照各级地图的比例尺以及工作区和工程的划分，可将图像按分辨率分级存储与管理，最底层的分辨率最高,并且数据量最大,分辨率越低,其数据量越小,这样,不同的分辨率遥感图像形成了塔式结构。称此结构为图像金字塔。采用这种图像金字塔结构建立的遥感影像数据库,便于组织、存储与管理多尺度、多数据源遥感影像数据,实现跨分辨率的索引与浏览。

9.4.2　空间数据的无缝组织

对于逻辑上和物理上的无缝组织要求所有地物保持完整性存放，因而每一完整地物无论大小通常只能拥有惟一的几何对象标识符（OID)。不过，地物完整性的确定主要依赖于用户或应用的要求。例如,对于长江,可以将它作为面对象(较大比例或中等比例尺建库时)、线对象(小比例尺,长江主流或主要长江水系),或者将整个长江水系构建成一个复杂地物来管理和

描述。

为了适应逻辑上和物理上的无缝组织需要，所有空间地物的属性数据在工程中统一管理，用关系型数据库管理系统（RDBMS)进行管理，属性数据以表的形式进行存储。用户可参照标准对工程中的地物进行统一分类(如分成各等级的控制点、道路、居民地、水系、植被等),并指定惟一的地物分类码。任一完整地物通常只能对应一条属性数据记录，空间地物与相应的属性记录间靠惟一的对象标识进行联结。

为了在工程中有效地组织和表达空间实体，可以按照地物的大小（这里指地物覆盖的最大范围）对其进行分级抽取，然后对不同大小地物的几何对象标识进行整理、分层，建立空间索引。在文献[11]中，采用了如下的具体做法。

参考建库比例尺、内容、性质等因素将地面沿坐标轴方向分割成若干层正交格网、层与层间格网大小不同，相差倍数可根据经验选择（此处格网的划分并非对空间的实际分割，只是为空间索引和数据组织服务）。与按照地图分幅思想建立的空间数据库相比，这里的空间数据库的最大特点，是没有分幅的概念。地物入库时，必须进行几何和逻辑（指属性和语义数据）接边。同一地物在工程中合成为一完整实体（对象），该对象记录地物的完整空间信息和属性数据,由系统分配给它一个惟一的 OID,并按其实体大小将该 OID 存入相应的某层格网中。在每一层格网中记录它所在范围内相应区域的地物 OID,再对规则格网进行空间编码,就能建立起无缝空间数据库的空间索引。

若以图幅平均大小为工作区，并以多种分辨率的航天、航空多源遥感影像数据为数据对象(主要以正射影像为主),则可将图像金字塔与多层次结构文件系统(也可以是关系数据库、面向对象数据库）相结合，实施对影像几何空间和色调空间的管理，并通过拼接实现无缝特性的空间数据库系统。这种多分辨率无缝空间数据库可跨尺度、跨投影带、跨图像(子)工程、跨图像工作区，以便实现方便、快捷的空间索引、调度与无缝浏览及影像数据产品的分发与国家影像空间数据共享。

另外，以图像子工程为对象的分布式管理对象的技术，可以方便地实现跨服务器平台的连接与交互，以实现真正意义上的分布式管理，从而提高系统的安全性维护，这样的分布式策略也便于完全控制影像数据的分发和访问。在这样的系统中，目录结构的拓扑信息的维护与管理不只局限于单一的服务器或客户机。文献[10]特别提到以信息文件作为动态式的图像(子)工程注册表。这个注册表动态地记录了存储图像（子）工程的所有的服务器／客户机的分布式的影像数据库文件系统的拓扑信息，并且在动态的访问中，将这些拓扑信息同步地复制到 Windows NT 局域网网络操作系统的每个服务器(客户机)上,从而将多尺度,或同尺度不同的图像子工程逻辑上构成为一个无缝的空间数据库系统，进而可实时查询与漫游。

9.4.3 语义信息在空间上的完整表达

空间数据库涉及众多的空间对象，它们大致可分成如下一些类别[11]：

(1) 点对象：包括单点(如烟囱、控制点)、有向点(如桥、涵洞)、点群(如路灯、散树)等；

(2) 线对象：相互连接的点串或弧段串，可是网状的，但必须互相连接，如河流、河网、道路、路网等；

(3) 面对象：由一个或多个封闭不相交的多边形或环组成，可包含多个岛，如地块、房屋等；

(4)复杂对象：由任意两个或两个以上的基本对象(点、线、面)或另外的复杂地物组成，如学校可作为一复杂地物，它包含有道路、房屋、水塔等基本地物要素；

这些空间对象具有空间和语义上的双重性质。从空间上讲，它们可以是几何的或模拟的数据；从语义上将，它们可以表示地物或特定专题中的要素之间的相互关系。鉴于这种原因，在空间数据的无缝组织中可以考虑引入位置网络，并用它实现空间对象在逻辑上的无缝组织[12]。

位置网络是一组几何点的网络表示。这组几何点由集合理论以及如集合的交运算、并运算、距离运算等几何运算联系在一起。这些运算相应于对有关位置的限制。这些限制（规则）或是由思维方面的或是由物理上的因素所决定。

位置网络中的每个内部接点包含几何运算、运算所需的变量表以及运算结果。例如，一个结点可以表示两个变量点集的并，其运算结果是一个点集。推理是由对网络进行求值来进行的，即对网络中所有的运算求值，以求取顶结点(根结点)运算的点集。

在一般的应用场合中，工程中所期望的地物特征的相对位置都已表示在网络中，这样网络就把工程所期望的结构模型化了。在位置网络的操作中，以下几种涉及地物之间几何关系的基本运算具有重要作用：

(1)方向性运算(左、反射、北、上、下等)：以相对于其它点集的位置和方向来规定点集。

(2)区域运算(靠近于、在四边形内、在圆周内等)：建立一个和其它点集无方向关系的点集。

(3)集合运算：完成并、交以及求差等集合运算。

(4) 谓词运算：对区域进行的谓词运算可通过测量某些数据的特征来删除某些点集。例如，把年代，绿地面积，文化水平相对某个数值进行测试的谓词运算，可以限制在允许范围内集合的大小。

以下是一个利用位置网络来确定道路改建的简单例子。在道路改建中，存在许多需要考虑的问题，如不能破坏某些文化古迹和著名景点，在改建道路旁应留有足够的绿化带等。根据这样的设想，可以对改建的道路作以下限制。

规则 1："道路应避开文化古迹和著名景点"。

规则 2："路旁应有容易拆迁的地段或较空旷的地段"。

规则 3："文化古迹、景点和绿地应合理地配置在道路的近旁"。

按照上述 3 条规则，可得到图 9.4.2 ，它描述了道路改建中可用到的位置网络。

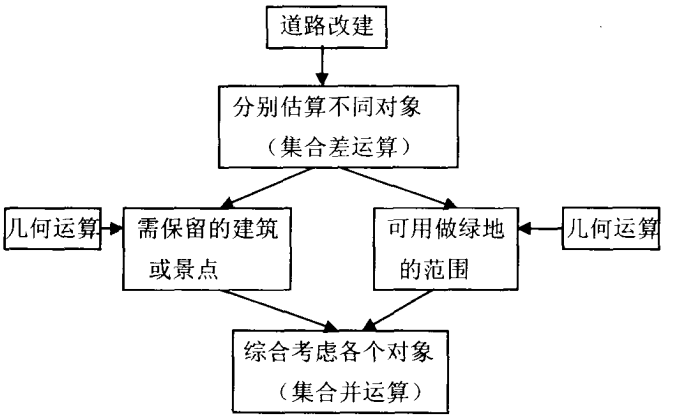


图 9.4.2　道路改建的位置网络

在位置网络应用中，空间对象或结构对象及其属性的表达是很重要的，它直接涉及位置网络的几何运算和谓词运算。例如，一个城市区域有许多属性，年代，绿地面积，文化水平和主要干道等都是一个城市区域的属性，对这些属性的不同选择和表达，其几何运算和谓词运算的效果是不一样的。为了解决这方面问题，不妨从空间对象及其属性的符号化入手。例如，某个城市区域可被标记为：

$$S = f(x, y, z, t) \tag{9.4.1}$$

式中，x，y，z 为地点参数，t 为时间参数。与此同时，可把城市区域与属性相联系并可采用以下方式进行表达：

$$\begin{aligned} &\text{年代(城市区域 1)} \\ &\text{绿地面积(城市区域 1)} \\ &\text{干道长度(城市区域 1)} \\ &\cdots\cdots \end{aligned} \tag{9.4.2}$$

括号中的被研究对象可采用标记 S，而属性则可分别用 A_1, A_2, A_3 等表示，那么上面的表达形式可写为更一般的形式：

$$\begin{aligned} &A_1(S) \\ &A_2(S) \\ &A_3(S) \\ &\cdots\cdots \end{aligned} \tag{9.4.3}$$

假定被研究的对象已知，可以把 S 忽略，只留下 A_1, A_2, A_3 这些符号。A_1, A_2, A_3 代表了对象的属性，在数学上被称为变量。

使变量具体化的过程称为赋值。例如，城市区域 1 最初建城时间在 1951 年，距今 47 年，可写为：

$$A_1 = 47 \tag{9.4.4}$$

表示把值 47 赋予变量 A_1。

在很多情形下，并不需要知道 A_1, A_2, A_3 这些变量的具体数值，只需要知道它们所归属的类型。如称某城市区域为旧城，这实际上是把旧城作值赋予变量 A_1，即：

$$A_1 = \text{旧城} \tag{9.4.5}$$

旧城可以被看成是一个赋值区间(或集合)，因而式(9.4.5)的赋值过程可以写为：

$$A_1 = u : u \in \text{旧城} \tag{9.4.6}$$

若旧城这个集合由 F 表示而其可能性分布函数为 $\pi_X(u)$[13]，那么，我们说：

$$A_1 = u : u \in F; \tag{9.4.7}$$

或

$$A_1 = u : \pi_X(u) \tag{9.4.8}$$

在此，有必要对可能性和或然性作一些说明。在某些情况下，高程度的可能性未必意味着高程度的或然性，低程度的或然性也不一定意味着低程度的可能性，然而，一件事件若不可能，它的出现的或然性必定为 0。低的可能性一般与低的或然性同时出现，高的或然性一般伴随着高的可能性。鉴于这种情况，可将可能性与或然性等同看待，这有利于用各种统计推断方法推求被研究对象的各种属性的可能性分布函数。

以上以城市区域为例，不仅对空间对象与属性之间的关系进行了符号化，而且还给予了模糊表达，把这种表达与位置网络相联系，更有利于表达空间对象在空间和语义的联系，因而更容易实现空间对象在逻辑上的无缝组织。

9.5 空间象系统的形式化描述及其相互间的关系

在 9.1 节中介绍了多种不同类型的数据库，这些数据库在空间信息处理中都会遇到。这就表明为了对空间信息进行统一的存贮和处理，需要选择合适的空间对象描述，以便有利于各种软件模块之间信息的交换，有利于在空间信息处理中形成共同的操作基础，有利于在相同的形式描述下设计不同的用户接口。以下将就这方面的问题作一些讨论。

9.5.1 空间象系统的形式化描述

图像信息处理是空间信息处理的一个重要方面，它常表现为视觉信息的存贮、管理、操作、推理等。通常的图像处理方法一般都是围绕图像本身的各种问题提出的，而没有将图像与人

的认识联系在一起，因而对图像的描述也主要局限在对图像的物理部分的描述。实际上，只有当作为信息载体的图像为特定的人群表达出一个对象，它才能形成一种概念。从这一点出发，文献[6]提出了广义象理论。这个理论扩展了传统的图像描述方法，将图像上的物体分成两个部分，即逻辑部分(意义)和物理部分(图像)。也就是说广义象是物体的二元描述，它包括逻辑部分和物理部分。按照不同的要求可对广义象进行组织，形成相关象的结构集合，称为象系统。应用广义象概念可以形式化地描述象系统，它是一五元组 $G(VL,VP,S,X_0,R)$，其中 VL 是逻辑物体集合 VP 是物理物体集合；$X_0 S$ 是有限非空象名称集合；X_0 是 S 中的一元素，表示为首的象名称集合；R 是自 S 到 $(VL \cup S) \times VP$ 的映射，表示象规则。结合空间信息处理的特点，我们从以下两个方面对广义象概念进行了拓展。

1) 将象名称看成是作为信息载体的符号

上面已经提到广义象是物体的二元描述，它包括逻辑部分和物理部分。也就是说象名称既代表空间对象又代表空间对象的意义。虽然说名称通常会与某个概念相关联，但这里的象名称显然只是一种标记。标记是作为信息载体的符号的表现形式之一，除此之外，作为信息载体的符号还会具有性质和类型。因此，我们把象名称称为象描述符，简称象符。同时，由于所讨论的对象除了图像以外还涉及其它空间对象，因而把广义象称为空间象。对于空间象，仍然可以像广义象一样定义象规则 R。

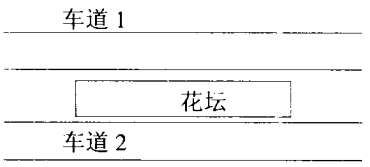


图 9.5.1 具有车道与花坛的图像区域示意

例 9.5.1 假定有如图 9.5.1 所示的图像，其形式化象系统是：

$$G(\{c_1,c_2,c_3\},\{p_0,p_1,p_2,p_4\},\{x_0,x_1,x_2,x_3,x_4\},x_0,R)$$

其中，象规则 R 是：

$r_1: x_0 ::= (\{x_1,x_2\},p_0)$

$r_2: x_1 ::= (\{x_3,x_4\},p_1)$

$r_3: x_2 ::= (\{c_1\},p_2)$

$r_4: x_3 ::= (\{c_2\},p_3)$

$r_5: x_4 ::= (\{c_3\},p_4)$

在此，规则 r_1 以逻辑部分 $\{x_1,x_2\}$ 和物理部分 p_0 定义象 x_0。x_1 和 x_2 二者都是 S 中作为标记的象符，由规则 r_1 确定为象的两个子象。物理部分代表图 9.5.1 中两个长条和一个矩形区域。规则 r_2 与 r_1 类似，用来单独定义两个平行的长条。规则 r_3 定义象 x_2，其逻辑部分是 c_1(代表花坛)，物理部分 p_2 代表图 9.5.1 中两个长条间的矩形。规则 r_4 和 r_5 分别用来定义图 9.5.1 中的两个长条，其逻辑部分是 c_2 和 c_3，分别代表车道 1 和车道 2；其物理部分是 p_3 和 p_4，代表图 9.5.1 中两条车道的具体位置。

以上是把象符看成是某种标记，因而与原来广义象中象名称基本相同。不过，有一点要说明一下，这里的标记并不是单纯的标记，它用来表示问题的论域。如上例中的 x_0, x_1 表示道路与花坛的集合,而 x_2, x_3, x_4 仅涉及道路或花坛。

象符除了用作标记以外，还可用来表示论域的属性。如 x_0 表示道路和花坛加在一起的面积，x_2 表示花坛的面积。另外，象符也可用来表示论域的结构。如 x_0 表示由道路和花坛组成的道路系统，x_2 表示该道路系统中的成分花坛。也就是说，对于图像上物体的二元描述，在同样的象规则下，有三种不同的含义。因而，对空间象进行的处理可以在三种不同的含义下进行，也可以把三种含义结合在一起进行。

2 不同粒度的空间象

文献[6]所列举的广义象系统基本上采用了问题归约的方法，也就是把一个复杂的原问题分解为若干子问题，这些子问题一般比原问题简单。然后分别求解子问题，子问题又可进一步分解为更简单的子问题，直到可以解决为止。上面的例 9.5.1 可以说明这种思想。如把一个区域分为道路与花坛，道路又分为平行车道等。从文献[6]也可以看出，采用问题归约方法的广义象，可以解决许多图像数据库设计问题。然而，它还不能描述空间数据库设计中的某些重要特点，而这些特点对于空间数据库设计又是相当重要的。

设想一位正在某个城市进行城市规划的规划师。当他考虑全市的整体规划时，他会忽略掉城市的许多具体细节：学校是什么样子，建设在什么地方等等。这时，城市在他看来只不过是由若干个功能区组成的‘方块图’而已,即他以很粗略的眼光来考察城市。随着规划的深入，当不能不考虑学校内部的细节，如有多少学生宿舍，各宿舍又有几层时，于是他又用更细致的眼光观察城市和分析问题。一旦需要重新考虑某个全局性的问题时，他又马上返回城市这个层次上。

另一方面,我们认识一个城市总是由一座桥、一条路、一幢房屋等开始,然后进一步认识由这些桥、路和房屋等构成的小区，最后对整个城市形成一个整体的印象。这个过程实际上就是先在不同层次、不同角度上对城市进行观察和了解，再通过对这些零星、片面的了解的综合汇总得到较系统、全面的了解。

上述的事实说明，人类的创造活动和认识活动虽然有所差别，但有一个共同的特点，就是具有粗细、层次和角度上的不同。为了把这个重要的特点反映在空间数据库设计的过程中，有必要引入粒度的概念。就一般而言，粒度反映了空间对象在粗细、层次和角度上的不同，也就是说粗略的对象,高层次的问题,全角度的考察都是粒度大的表现,反之,细微的对象、低层次的问题、独特角度的考察都是粒度小的表现。在空间信息的处理中，我们把粒度与空间信息的共同处理单元相联系。若处理这些单元需要较强的功能，则称其为大粒度的；反之称其为小粒度的[14]。

前面已经提到象符可以有三种不同的含义：(1)问题的论域,用 X 表示；(2)论域的属性,用 f 表示；(3)论域的结构,用 T 表示。把这三者结合起来可构成一个三元组（X, f, T），它

代表完整的象符。假定 X 表示论域中最细的粒度,若对 X 进行简化，产生一个较粗粒度的论域 $[X]$。那么就把原象符(X, f, T),变成新层次上的象符($[X], [f], [T]$)。

因为我们用象符代替了象名称，又加入了粒度的概念，因而有关广义象的一些概念也会有所改变。以 $W = (X, f, T)$ 表示象符,其形式化表示是(X_m, X_i),其中 X_m 是 $VL \cup S$ 的子集(在此,S 表示有限非空象符集合),X_i 是 VP 的元素。给定一象系统 G,象集合 R_G 可被定义为所有象的集合：

$$R_G = \{(W, X_m, X_i) \mid W::= (X_m, X_i) \in R\} \tag{9.5.1}$$

在此,R 为象规则。关于象集合(W, X_m, X_i)有如下一些情形：

(1) $X_m \cap S$ 为空。此时 X_m 是 VL 的子集，W 取({概念},{空间对象})的形式。概念可以是名称、过程或操作。这时称 W 为基本（空间）象。基本象的概念类似句法模式识别中的基元，它对应最简单的子过程或子操作。我们这里定义的基本象与文献[3]中的基本象有两点是不同的。它是一种象符，可以代表空间对象有关的属性、论域和结构。另外，由基本象确定的最简单的子过程或子操作只是一个相对的概念，它的最简单的性质只是相对于某个粒度而言的。存在特殊的基本象 空间象的 X_m 为空，写成({ },{空间对象}),也就是说此空间对象没有解释或意义。空间象的物理部分为空，写成({ 概念 },{ }),也就是说我们仅知道某个对象的意义并不知道对象本身。如果对一个对象本身及其意义都不清楚，可用哑象表达，写为 ({ },{ e }),符号“e”表示空的空间对象。

(2) $X_m \cap S$ 不为空，即空间象通过象符指向子象，此时称空间象为复象。若 $X_m \cap VL$ 为空,则子象间没有确定的关系,也没有确定的组合意义 若 $X_m \cap VL$ 不为空，表明对子象的某种组合施加某种操作或处理，不仅将改变空间对象本身，也将改变其意义。不过也要注意，不论子象间的组合有没有确定的意义，对这些子象的操作和处理总是在某个粒度上进行的；在某个粒度上有确定意义的操作或处理，在另外的粒度上未必有意义。

(3)假定空间象 $W::=(X_m, X_i)$。若由空间象的 X_m 可以确定 X_i(称物理化),同时由空间象的 X_i 可以确定 X_m(称逻辑化),此时空间象称为纯象。纯象实际上就是指空间对象与它的解释之间具有一一对应关系。对于纯象同样也有个粒度概念。例如，对一幅遥感图像，即使我们可以把图像上的区域惟一地解释为农田，但我们未必能把这些图像区域惟一地解释为水稻田。因为水稻田具有更小的粒度，它与图像的对应关系比农田更具体。通常我们都希望空间象是纯象，因为它可以为空间信息处理带来很多方便。不过，纯象仅是一种理想状态，在某些情形下，非纯象的存在会给空间信息的处理带来意想不到的好处。

9.5.2 空间象系统之间的关系

空间象用象符、逻辑物体和物理物体描述空间对象，给空间信息的处理和数据库的设计带来许多方便。这一部分将进一步分析象符、逻辑物体和物理物体之间的关系，以及如何在实际的空间信息处理过程中运用这种关系建立对象间的联系。

下我们举一个例子进一步说明这个问题。

假定我们驾驶装有 CCD、GIS 和 GPS 的监测车，可把电子地图（或图像）、CCD 影像和人的实际观测结合起来，考察道路旁的垃圾堆放状况，并按不同情形对监测车提出如下的一些要求：

(1)利用 GPS 和电子地图确定道路旁堆放垃圾的装置所在的位置，然后用 CCD 相机摄取这些位置的影像：

· 影像没有变化，监测车正常行使；

· 影像有变化，但垃圾堆放装置没有被损坏，监测车正常行使；

· 影像有变化，同时垃圾堆放装置损坏，监测车减速或停下，记下位置，加以必要的说明。

(2)利用 GPS 和电子地图确定道路旁某些较为混乱并容易被乱堆放垃圾的位置，用 CCD 相机摄取这些位置的影像：

· 影像没有变化，监测车正常行使；

· 影像有变化，但未出现乱堆放的垃圾，监测车正常行使；

· 影像有变化，经证实为乱堆放的垃圾，监测车停下，记下位置，打印出罚款单。

(3)工作人员沿道路直接观测，若发现某些地方垃圾被乱堆放，监测车停下，记下位置，打印出罚款单。

上面的叙述可用空间象进行形式化描述。对于情形 1)的信息获取部分，可将其与式(9.5.2)对应，式中每个成分的具体意义如下：

W^1 = 电子地图；

X_m^1 = {CCD 信息处理，GPS 信息处理，CCD 信息和 GPS 信息的说明}；

X_i^1 = {CCD 信息，GPS 信息}；

R^1 = 将电子地图，CCD 数据、GPS 数据分成各种成分、部分和层次进行处理，以及建立它们之间关系的各种规则；

R_G^1 = 按照 W^1, X_m^1, X_i^1 提供的空间象和提供的规则所给出的在道路旁用于堆放垃圾的装置的各种现状。

对于情形(1)的监测车行为，可将其与式(9.5.3)对应，式中每个成分的具体意义如下：

W^2 = 信号流程图及其表示；

X_m^2 = {监测车的控制，车载系统的控制，各种记录和说明}；

X_i^2 = {监测车的运行状况，车载系统的运行状况，工作人员}；

R^2 = 组成不同层次或不同部分的信号和控制的各种规则；

R_G^2 = 按照 W^2, X_m^2, X_i^2 提供的空间象和提供的规则所确定的监测车、车载系统和工作人员的各种行为。

在确定了情形 1)的信息获取部分和情形 1)监测车行为与式(9.5.2) 及 式(9.5.3) 中的

从象符的实际应用可以看出，它是空间对象的信息载体，是一种符号。这个信息载体与某个空间对象关联；空间对象自身在空间象中称物理物体，它的解释和处理称为逻辑物体，也就是说逻辑物体是一种概念。象符作为符号表现为直接的信息和间接的信息之间的一种联系。所谓的直接信息指的是直接来自空间对象的信息，如直接来自对象的视觉信息、触觉信息等。所谓间接信息指的是经过计算、处理和转换的信息，如地图上的等高线、居民点注记等。按照对象符这样的理解，物理物体也可以认为是可以提供直接信息的对象。顺便提一下，间接信息是一个相对的概念。因为从间接信息可以提取更加间接的信息，在这种情形下，被提取信息的间接信息就可以被认为是‘直接信息”。

在空间信息处理中，有一类问题主要涉及根据所提供的信息作出某种反映。例如，根据所出现的画面，使被控制的对象加速、减速或停止等。如果把所出现的画面看成是一个对象，被控制的对象的行为看成是另一个对象，我们就可以用两个象集合来描述它们：

$$R_G^1 = \{(W^1, X_m^1, X_i^1) \mid W^1 :: = (X_m^1, X_i^1) \in R^1\} \tag{9.5.2}$$

$$R_G^2 = \{(W^2, X_m^2, X_i^2) \mid W^2 :: = (X_m^2, X_i^2) \in R^2\} \tag{9.5.3}$$

在此，W^1, X_m^1, X_i^1 和 R^1 代表对象 1 的象符、逻辑物体、物理物体和象规则；W^2, X_m^2, X_i^2 和 R^2 代表对象 2 的象符、逻辑物体、物理物体和象规则。在实际的应用中，两个空间象之间可以有如下一些关系：

(1)对象 1 的物理物体直接对应对象 2 的物理物体。例如，当传感器上出现了某个画面，则被控制的对象就表现出某种行为。

(2)对象 1 的物理物体与对象 1 的逻辑物体相结合，然后与对象 2 的物理物体对应。例如，先对传感器上出现的画面进行某种处理，再根据处理结果直接控制对象 2 的行为。

(3)对象 2 的物理物体与对象 2 的逻辑物体相结合，然后与对象 1 的物理物体对应。例如，传感器上出现的某个画面直接对应某个控制信号(如红、黄、绿指示灯等)，再根据控制信号确定对象 2 的行为。

(4)一方面对象 1 的物理物体与对象 1 的逻辑物体相结合，另一方面对象 2 的物理物体与对象 2 的逻辑物体相结合，然后把两种结合的结果相对应。例如，先对传感器上出现的画面进行某种处理，接着根据处理结果选择控制信号，然后根据控制信号确定对象 2 的行为。

以上就空间象的二元描述对对象间的关系进行了分析。实际上，对象间的关系也包括象符之间的关系，以及象符与逻辑物体和物理物体之间的关系。例如，我们既可以利用从传感器得到的信息控制某个对象的行为，也可以利用事先准备好的符号图(如街区图)，按照操纵者的意图，将某个符号集合与被控制对象的某个行为对应起来。将象符引入到对象间关系的分析中有一个明显的好处，就是可以将象符的获取与逻辑物体和物理物体的结合相联系。通常情况下，空间象的逻辑物体对物理物体的作用带有符号化的性质，其结果应该是某种类型的符号。如果在象符集合中还没有这样的符号，可以把它记下当作新的象符；如果在象符集合中已有这样的符号，可以用新产生的符号与已有的象符进行比较，使已有的象符更加准确可靠。以

各个符号的关系以后，可对情形(1)中的三种具体情况作进一步的形式化描述。

(1)“影像没有变化”可以写成：

在电子地图上予于标记(W^1)=(影像没有变化(X_m^1),某个位置的CCD影像($\frac{1}{i}$))

“监测车正常行使”可以写成：

赋予某种指示符(W^2)=(正常行使(X_m^2)，车载系统在某个位置的行为(X_i^2))

(2)“影像有变化,但垃圾堆放装置没有被损坏”可以写成：

在电子地图上予于标记(W^1)=(影像有变化并且装置没有损坏(X_m^1),某个位置的CCD影像(X_i^1))

“监测车正常行使”可以写成：

赋予某种指示符(W^2)=(正常行使(X_m^2)，车载系统在某个位置的行为(X_i^2))

(3)“影像有变化,经证实为乱堆放的垃圾”可以写成：

在电子地图上予于标记(W^1)=(影像有变化并且乱堆放垃圾(X_m^1),某个位置的CCD影像(X_i^1))

“监测车停下,记下位置,打印出罚款单”可以写成：

赋予某种指示符(W^2)=(监测车停下并且记下位置并且打印出罚款单(X_m^2),车载系统在某个位置的行为(X_i^2))

以上按照空间象的概念,对具有RS(或CCD)、GIS和GPS集成系统的监测车的某些行为进行了形式化描述。这种描述不仅为空间信息数据库的设计提供了方便，而且还可以利用象代数、粒度理论、符号理论等对其进行操作，因而也为形成空间信息集成过程中的各种软件的统一接口提供了方便。

9.6 矢量与栅格集成的三维数据模型[15]

当前的地理信息系统一般只能处理地球表面的信息，通常是将带有地形起伏的椭球表面投影在二维平面上,有些GIS软件，还采用建立数字高程模型的方法来处理和表达地形的起伏。但涉及到地底下真三维的自然和人工现象则显得无能为力。地理信息系统在地质、矿山、水文、大气等方面的应用已面临着严峻的挑战，许多地理、地质学家以及计算机专家和软件公司都在寻找解决的方案。

研制一个信息系统软件首先需要解决的问题是寻找一种合适的数据结构和数据模型，GIS也不例外。人们为了推出三维地理信息系统，对三维空间数据结构和数据模型进行了大量的研究工作。人们最初的研究是集中在栅格或者说体元方面。模仿二维栅格的方法，将一个三维物体按照一定的规则划分成一些体积相等的体元。每个体元是一个三维坐标的变量，

不同的体元所含的元素成份不同或元素的含量不同。如铁矿体的含铁量不同。考虑到邻近的体元,常出现元素含量相同的情况,为了减少存贮容量,模仿二维平面的四叉树方法,发展了一种与之相似的八叉树方法。这种数据结构存在两个明显的缺点：其一，它的位置表达精度太低,即使它能表达矿体,也无法精确表达矿体或岩层的界面,以及开采矿山的各种巷道和矿井；其二,它无法表达实体之间的关系,对于一些重金属或贵金属矿山,矿体小而又比较复杂,而且通常矿脉与断层密切联系，这些都是纯体元方法无法表达的问题。对于错综复杂、千丝万缕的各种巷道和矿井，这种结构更显得无能为力。

因而人们又开始重视三维的矢量数据模型的研究[16,17]。扩充二维矢量数据结构，将点、线、面要素扩展到体。体由面组成，面由线构成，线性元素通过矢量坐标表达。除了表达各种元素的空间位置以外，还表达它们之间的拓扑关系。 Molenaar教授提出的三维矢量数据模型，对表达比较规则的实体有实用价值，但对于一些特殊的三维现象，如矿井、巷道则无法表达。另外,这种方法把一个三维实体假设成均值,实际上,绝大多数矿体都不是均值的。所以，前述的将三维矿体划分成栅格体元的方法还是必需的。这样，一个功能比较完善的三维空间信息系统，采用矢量与栅格结合的数据结构是适宜的。

三维空间信息系统比二维 GIS要复杂得多,这不只是增加一个三维坐标和将点、线、面扩展到体的问题。在数字表达时，三维对象比二维对象多而复杂，致使目前许多涉及到三维 GIS的工作进展缓慢，甚至美国最近发布的空间数据交换标准(SDTS,1992),都将三维的问题搁置下来。虽然最近有几个系统在三维数据处理和三维目标显示方面表现出比较好的能力，但对三维的数据结构和数据模型远没有达成共识。这一问题已成为三维空间信息系统的瓶颈问题。

以下首先对三维空间现象进行剖析，然后在第二部分抽象、归纳各种空间现象，整理出几种能够用数字表达的空间对象 在第三部分,文献[15]的作者根据三维空间对象设计了一个面向对象的数据模型以及各类对象的逻辑数据结构。

9.6.1 三维空间现象及其表达

首先澄清以下两个概念问题：

(1) 现象。它是指现实世界或者经过科学加工处理（如摄影或遥感）的自然或人工现象。例如,一栋大楼、一个县、一条巷道、一个岩层的界面.都可以看做是现象。

(2)对象。它是现象的数值化表达。一个现象可能直接用一个对象表达，也可能分成几个对象表达。例如，一条巷道通常由若干个横断面表达。在地理信息系统中，通常将空间对象进行有条理的划分和组织，使之比较容易地在计算机世界表达各种现象。

1) 地表现象

我们多数人接触到和熟悉的三维空间现象主要是地表的各种人工和自然地物。我们日常见到的是房子、道路、河流、草地、水田、旱地、菜地、公园等等。这些现象在二维 GIS 中研究得

比较透彻，通常把它们归结为点、线、面空间对象进行逻辑表达。余下的几个需要重新考虑的现象是，一栋大楼有许多层，各层的用途和形状布局等不尽相同，当前在二维 GIS 中,只是把它投影在二维平面上，用一个面状地物来表达它的平面形状。在一个真三维的 GIS 中,需要将表达扩展到三维空间。另外，我们在表达许多起伏地形表面的地物时，作了许多近似假设，例如,一条在崎岖山间的道路,它的长度并不等于它在二维面上的长度;一块斜坡上的小麦地，它的实际面积也大于它的投影面积。这些现象需要在一个三维的地理信息系统中才能解决。

2 地质现象

地质现象极为复杂。GIS涉及到的最主要的现象是地层、断裂、矿体和矿床。地质学家根据地壳运动、火山喷发和海洋沉积等，将地表层分成不同的地层。地层通常是一个不规则的曲面,它不能用数学表达式表达,在三维 GIS 中，也可以采用与数字高程模型类似的方法表示地层的界面。断裂与地层比较接近，但是，它通常有一定的宽度，另一方面它也往往垂直或斜交于地形表面。在 GIS 中如果采用 DTM的方法处理，需要考虑它的投影平面和投影角度。矿体是一个三维实体，但是往往极不规则，无法确定它由多少个面组成。一种近似表达的方法是模仿 DTM 的方法，表达它的上顶的数字表面模型和下底的数字表面模型，再考虑它的投影平面和投影的边界。矿体的另一个显著特征是，矿体各部位矿物质的含量是不相同的、甚至所含元素的个数都不相同。例如,一个铁矿体,它可能还含有金、银、铜、硫等矿物质,各部位的含量不尽相同，甚至相差很大，矿体的边缘部分比中间部位含量要低得多。实际上许多矿体的边界是人为圈定的，它是一个模糊的概念，只是某种或某几种矿物质达到一定的指标，才把它圈定在矿体范围内。所以矿体物质的不均匀性很大。地质统计学的克里格法在处理该问题时是将矿体划分成一定大小的矿块，内插估计出每一块中各种矿物质的品位。这一概念与 GIS 中栅格体元表达的思想一致。可以将克里格估算的结果存贮到栅格体元中，若考虑数据压缩可以采用八叉树方法。一个矿床可能包含若干个矿体，矿床可能有断层等地质现象，所以矿床是多种地质现象的复合现象，可以用复杂地物的方式进行表达。

地下水文与地质现象类似，可以采用相似的方法进行分析表达。

3) 矿山现象

一个开采的矿山实际上可能包含以上所述各种地质现象。除此之外，它还包含了各种矿山开采时的人工现象,如斜井、竖井、水平巷道、采空区、通风井、矿车铁道、电力与通信线路、安全与休息工作区，还有探槽、钻井等许多矿山勘探与开采的人工设施。这些现象是真三维的，并且它的位置是精确的，栅格的表达显然满足不了精度要求，它们必须用矢量方法表达。但是按照二维 GIS 的思路发展,甚至按 Molenaar 的三维数据模型，许多现象都无法表达。例如，把一个水平巷道作为一个空心的体对象,它又极不规则(图 9.6.1),它既不是长方体,也不是圆柱体,甚至四周都极不规则,它不是一个数学表面,也不宜用 DTM 的方式表达。它的位置精度要求很高，特别是水平底板的精度要求非常高。如何表达这种现象，需要引人新的空间对象。按照矿山测量的思路，引入断面对象和似柱体对象，来专门处理这种三维空间现象。

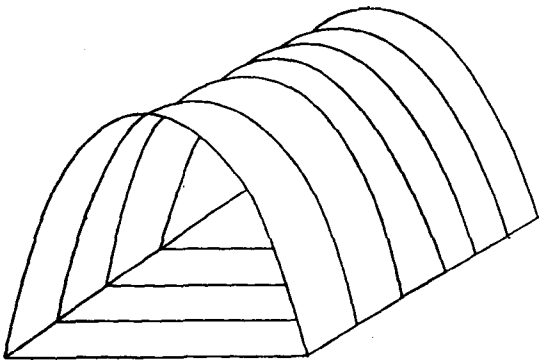


图 9.6.1 矿山巷道

9.6.2 空间对象及其定义

在文献[15]中,作者较详细地阐述了零维、一维对象及二维对象中的面状地物。这里进一步定义三维对象以及三维对象所涉及的二维对象。

1) 二维对象

(1)面状地物。面状地物的概念与二维 GIS 的多边形概念相似,它由周边弧段组成,有属性编码和属性表。它与平面多边形的一个显著区别是必须考虑到地形的起伏,即这里所述的面状地物是一个曲面,这种曲面可能是不规则的,所以需要将它联接到数字表面模型上。在三维 GIS 中,面状地物的另一个显著特点是它不仅可以表示地面上的地物,还可以表达地表下面的地层和断层等现象。

(2)面元素。它没有地物意义,不联接到属性表,只代表一个三维物体的某个表面,这种表面通常也是不规则的,亦用数字表面模型表达。这种元素的另一个特点是表面模型的投影面并不一定是水平面(X-Y 平面),而有可能是其它平面。

以上两种对象都是由边界和数字表面模型组成的,所以在处理方式上亦可以将它们设计成同一数据结构。当不带地物编码时,表明它仅是一个三维物体的表面;当它指向数字表面模型的指针为空时表示一个平面。

(3)数字表面模型。用数字表面模型来表示地球表面和地下地层面状实体的起伏现象,或三维物体的表面形状。数字表面模型可以有格网法和三角网法两种。这里与数字高程模型的区别是需要考虑投影方向问题,亦要说明它是一个物体的上顶板还是下底板。一个面状地物可以表示成一个数字表面模型,也可以多个面状地物共用一个数字表面模型。

(4)断面。断面被用来表示一种特殊的三维现象,如矿山的斜井、竖井、通风巷道等。矿山

测量一般仅获取这种三维实体的断面数据，而不管两个断面之间的顶板、底板及左右两壁的形状，这样实际上就没有用完全的表面来围成一个三维立体。这种情况下采用断面来解决这一问题，建立一系列断面的数据库，把它们联接起来，就形成了一个柱形的巷道。由于断面并不规则，不能用圆、椭圆元素表示，所以断面通常由不规则的闭合曲线构成。它作为三维柱形实体的基本元素。

(5)栅格影像。栅格影像是一个二维对象，主要用来表达遥感或航空摄影或扫描地图的数字影像。它可能是 8bit 的灰度或彩色影像,也可能是 16,24 或 32 bit 的影像,并可能有多个波段。

栅格影像可以表示面状地物的专题信息。数字表面模型的结构虽然与栅格影像的结构相似,但在 3D-G1S 中最好将它们分别定义。

(6)像素。栅格影像中的像元值通常直接存于栅格结构的矩阵中，此时像素不单独作为一个空间对象，它的空间特征如位置信息直接隐含在栅格矩阵之中。但是当一个像素具有多个数值，如同一像元位置具有多个专题信息或多个波段的灰度值时，可把像素作为一个空间对象,附属多个属性值。

2 三维对象

(1)均值体状实体。由若干个面元素构成，实体内部的物质成份相同。

(2)空心体状实体。与前面定义类似，但它的内部是空的，如矿山的采空区等。

均值体状实体和空心体状实体虽然本质上意义不同，但是在表达上相似，所以采用同一结构表示。

(3) 非均值体状实体。由若干个面元素组成，但实体内部所含物质的成份不同，如一个铁矿体，矿体不同部位所含铁或其它元素的品位不同。这种对象还不能完整表达一个三维实体，还必须联接到一个类似于二维表面模型的三维栅格数字模型。

(4)数字模型。将一个非均值的三维实体划分成大小相等的体元，用 X, Y, Z 或三维数组的行、列以及第三维系列编号表示体元的位置,每个体元对应于一个元素值,从存贮结构上说，由于计算机只能方便地存贮二维表格型数据，所以可以将真三维模型转换成用 Peano 键表达的线性表。

(5)体元。一个 Peano 键表示一个体元的位置。体元实际上被看做成一个空间对象，特别是在许多情况下，一个体元内含有多种元素，每种元素占用三维表的一列。如果许多相同体元含有相同的物质成份，可以采取线性八叉树的方法，将符合分解规则的相邻体元合并成八叉树的结点。一个八叉树结点包含 8 个或更多的体元，以节省存贮空间。

(6)柱状实体。由一系列断面构成。柱状实体一般是空心的,如斜井、竖井、柱道等。这一实体概念可以扩展到高层建筑，将每一层看作一个断面，每一层的布局表示该层的形状，并且可能将它联接到属性表。

9.6.3 面向对象的三维空间数据模型

面向对象的方法可以用来构造三维空间数据模型。在本节的第二部分和文献[15]中,作者已经定义了各种空间对象，将它们适当合并可归结为 12 种。每一种空间对象是面向对象概念中的一个类,可以用概括、联合、聚集的概念表达这些类之间的关系。

不过概括的概念在这里很少用到，因为空间对象主要涉及拓扑关系、对象组合及层次结构，这些关系主要用到聚集和联合的语义概念。

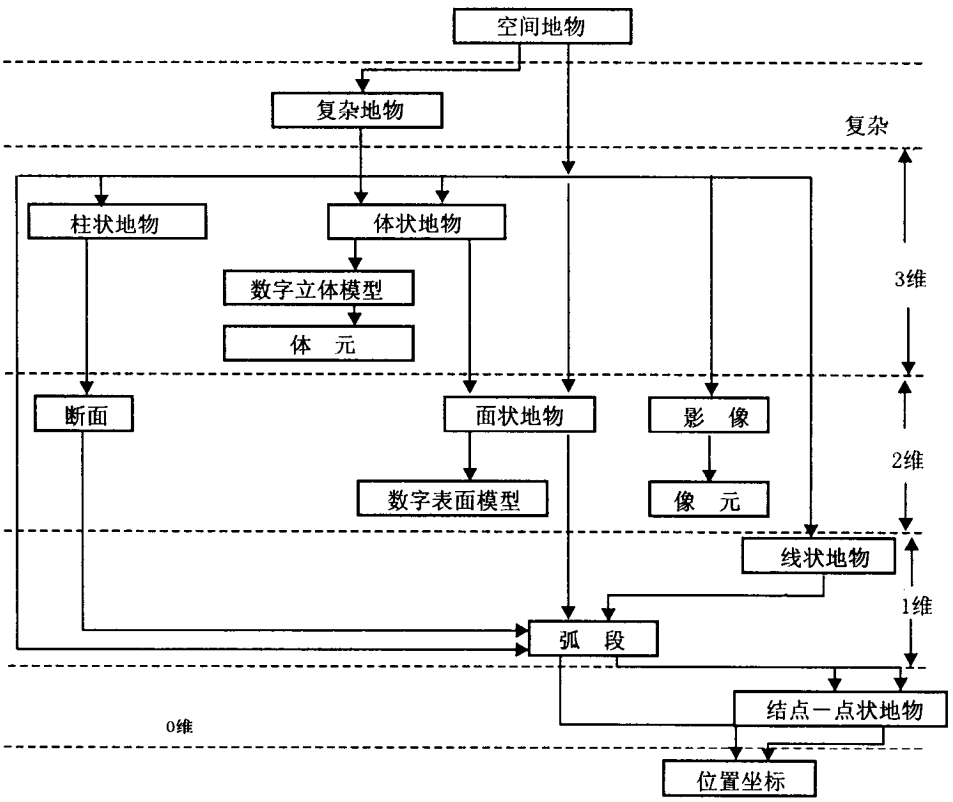


图 9.6.2 三维空间信息系统的数据模型

在这 12 类空间对象之上，作者设立一个超类，称为空间地物，以便将一些共特征的操作包含在这里面,它是点状地物、线状地物、面状地物、体状地物、柱状地物、复杂地物的超类。在

这种情况下需要用到概括的概念。

为便于表达和处理，我们再设立一个数据结构——位置坐标(Location，见表 9.6.1)。它与类不同，类中的对象必须有对象标识，位置坐标不带标识，在二维 GIS 中是两个浮点数，在三维 G1S 中是三个浮点数。

这样，我们已经抽象 13 类空间对象和一个数据结构，它们包括结点一点状地物、弧段、线状地物、面状地物、数字表面模型、断面、影像像素、体状地物、数字立体模型、体元、柱状地物、复杂地物和空间地物及位置坐标。它们之间的关系可以用图 9.6.2 所示的数据模型表示。

表 9.6.1 位置坐标结构

字段名	字段类型	字段描述	字段域	字段特征	说　明
X	浮点				如果是地理
Y	浮点				坐标经纬度，
Z	浮点				则在 Matedata 说明

1) 空间对象的数据结构

面向对象数据模型的一个显著优点是一个类使用一个相应的数据结构，无论多么复杂，包含多少对象的嵌套关系，一个对象对应于结构表中的一条记录。当然，对象的记录可能不符合关系模型的范式要求，同一条记录中，一个属性项可能有多个属性值(变长记录)或多个对象标识。

表 9.6.2 结点－点状地物

字段名	字段类型	字段或描述	字段域	字段域说明	字段特性
NodeID	长整	系统给定的目标标识			
NodeDes	字符	结点的性质	NA	结点状地物	
			NB	纯结点	
			NC	纯点状地物	
UserID	字符	地物的编码			
Position	Location	点的位置			
ARCID	长整	关联的弧段			变长
ComplexID	长整	所属的复杂地物			变长

表 9.6.3 弧段结构

字段名	字段类型	字段描述	字段域	字段域说明	字段特征
ARCID	长整	弧段标识			
ARCDes	字段	弧段的性质	AA	无拓扑不光滑曲线	
			AB	无拓扑圆弧(3 点)	
			AC	无拓扑光滑曲线	
			TA	不光滑拓扑弧段	
			TB	圆弧拓扑弧段	

续表 9.6.3

字段名	字段类型	字段描述	字段域	字段域说明	字段特征
			TC	光滑拓扑弧段	
			TD	B样条拓扑弧段	
			TE	直角拓扑弧段	
UserID	字符	地物编码			
StartNodeID	长整	起结点			
EndNodeID	长整	终结点			
LeftSurfaceID	长整	左多边形			
RightSurfaceID	长整	右多边形			
LineID	长整	指向线状地物			变长
ComplexID	长整	指向复杂地物			变长
Shape	Location	弧段上的点			变长

表 9.6.4 线状地物

字段名	字段类型	字段描述	字段域	字段域说明	字段特征
LineID	长整	对象标识			
UserID	字符	地物编码			
ARDID	长整	所包含的弧段			变长
ComplexID	长整	所用的复杂地物			

表 9.6.5 面状地物

字段名	字段类型	字段描述	字段域	字段域说明	字段特征
SurfaceID	长整	对象标识			
SurfaceDes	字符	对象特征			
UserID	字符	地物编码			
ARCID	长整	边界的弧段			
ComplexID	长整	复杂地物			变长
LeftBodyID	长整	左面体状地物 ID			
RightBodyID	长整	右面体状地物 ID			
DSMID	长整	指向数字表面模型			

表 9.6.6 数字表面模型

字段名	字段类型	字段描述	字段域	字段域说明	字段特征
DSMID	长整	对象标识			
DSMDes	字符	模型描述			
			DA	上顶板	
			DC	下底板	
Alpha	浮点	投影面方位	0°～360°		
Angle	浮点	投影倾斜角	0°～90°		
Origin	Location	原点			
Row	整型	行数			
Column	整型	列数			
Dx	浮点	行方向间距			
Dy	浮点	列方向间距			
Elevation	浮点	高程值			变长

表 9.6.7 断面

字段名	字段类型	字段描述	字段域	字段域说明	字段特征
SectionID	长整	对象标识			
Angle	浮点	倾斜角	0°～90°		
Alpha	浮点	断面方位角	0°～360°		
ARCID	长整	组成断面的弧段			变长
ColumnID	长整	指向柱状实体的指针			变长

表 9.6.8 体状地物

字段名	字段类型	字段描述	字段域	字段域说明	字段特征
BodyID	长整	对象标识			
BodyDes	字符	实体特征	BA	均值实体	
			BB	空心实体	
			BC	非均值实体	
UserID	字符	地物编码			
SurfaceID	长整	周围的面			变长
DBMID	长整	数字立体模型			
ComplexID	长整	指向复杂地物			

表 9.6.9 数字立体模型

字段名	字段类型	字段描述	字段域	字段域说明	字段特征
DBMID	长整	对象标识			
Alpha	浮点	投影面角度	0°～360°		
Angle	浮点	投影面倾角	0°～90°		
Origin	Location	原点			
Nx	整型	*X* 方向行数			
Ny	整型	*Y* 方向列数			
Nz	整型	*Z* 方向列数			
Dx	浮点	*X* 方向间距			
Dy	浮点	*Y* 方向间距			
Dz	浮点	*Z* 方向间距			
VatilxelID	长整	指针			
Value	浮点	体元的值 VatilxelID 为空时直接存贮体元的值			变长

表 9.6.10 体元

字段名	字段类型	字段描述	字段域	字段域说明	字段特征
VatilxelID	长整	对象标识			
Address	长整	地址码			
Value1	浮点	元素变量			
Value2	浮点	元素变量			

表 9.6.11 柱状地物

字段名	字段类型	字段描述	字段域	字段域说明	字段特征
Column	长整	对象标识			
UserID	字符	地物编码			
Angle	浮点	参考投影面角度	0°～90°		
SectionID	长整	所包含的断面			变长
ComplexID	长整	复杂地物的标识号			

表 9.6.12 复杂地物

字段名	字段类型	字段描述	字段域	字段域说明	字段特征
ComplexID	长整	对象标识			
UserID	字符	地物编码			
ObjectID	长整	子对象的标识			变长
ARCID	长整	边界弧段标识			变长

每个空间对象有一个系统给定的对象标识，并且约定对象标识包含了类型的标识，这样根据对象标识就可以直接判断该对象属于什么几何类型。

以上定义了 11 类空间对象及位置坐标的数据结构，剩下的影像和像素的数据结构可以参考其它标准的数据结构如 SDTS 等。超类空间地物的数据结构可以定义一些数据描述信息和版本信息。

上述说明要设计一个全新的三维空间信息系统，就要面对复杂的三维空间现象，比较完整和系统地抽象出有关的空间对象，并且不要作太多的简化和限制。为此，本节引人了几种新的空间对象,如数字表面模型、断面、柱状实体以处理复杂和特殊三维空间问题。

对于许多三维空间现象，单独用矢量数据结构不能解决所有问题，如三维实体内部物质不均匀问题，立体表面的不规则问题等。单独用栅格方法同样不能解决问题，因为一个开采矿山信息系统的测量精度和表达精度要求非常高，栅格结构根本无法满足精度要求。本节将矢量与栅格结合的方法引人到三维空间数据模型中，并且可以根据应用需要分别导出纯矢量的或纯栅铬的数据模型。

上面定义的数据结构涉及到大量的对象嵌套关系和变长记录，如果转化成关系数据模型，还要增加许多关系联接表，以符合范式的要求。这里采用的面向对象数据模型表明了一个显著的特点，即无论怎么复杂的对象都可以用一个结构表表示，使得理解这一模型非常容易和自然。

当前数据库管理系统已能完全支持这一数据模型。绝大多数面向对象的数据库管理系统不仅支持变长记录，而且支持多对象的嵌套和复杂对象的聚集。最近一些传统关系数据库管理系统也在进行扩展,以支持面向对象的数据模型(如 Ingres)。随着数据库技术和虚拟现实技术的发展，三维空间信息系统的一些问题将会逐步得到解决。

9.7 基于数据集成的 3D 可视化模型[18,19]

如果空间查询与分析等广泛用来提供辅助决策用的操作，以一种动态的交互式的三维影像形式表现出来，而不仅是用传统的基于特征的数据集形式甚至诸如地图这样的二维的静态非交互式的显示,那么即使像汽车驾驶员、旅游者、警察等这样的用户,GIS也是十分有效且富有吸引力的工具。现在的 GIS已经能够利用普通的桌面型甚至膝上型微型计算机和标准的软件系统来完成各种逼真的图形显示与处理，且能集成和操纵实时三维图形、声音与视频数据等多媒体信息,从而可望借助于仿真的视、声和力学感应等,为 GIS 的终端用户创造一个能实时漫游的虚拟现实环境[20]。

9.7.1 三维动态交互式可视化模型

基于 DEM的三维可视化模型有助于用户对空间数据相互关系的直观理解，不过，只把三维可视化模型作为信息表示的一种输出媒体是远远不够的。对于各种各样的 GIS用户来说，往往需要直接将其作为可交互查询的媒体，即 GIS 中的三维模型不仅能可视化，还能交互操作。基于这样的三维模型，便能提供一个动态的环境，用以在相应空间氛围里逼真创建和显示复杂物体,并为进一步的空间决策服务(见图 9.7.1)。诸如环境仿真、设施管理、洪水淹没与火灾蔓延等复条的模型分析和辅助决策更需三维可交互动态模型支持。

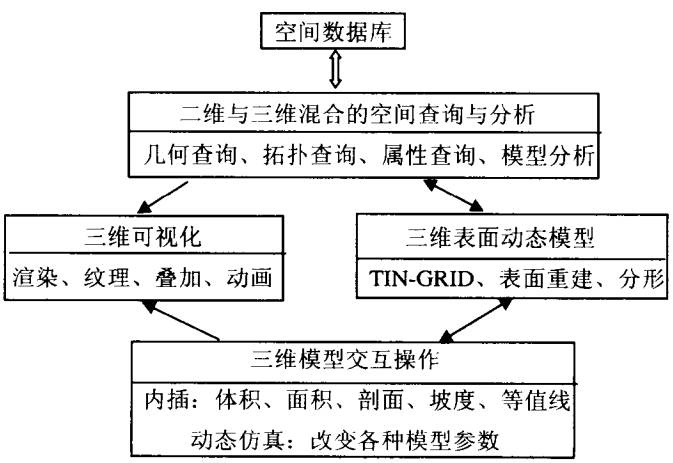


图 9.7.1 三维动态交互式可视化模型

1）基本的数据流

传统的二维系统往往只注意单一的数据流向，即从数据库检索所需的信息，这里则强调对数据库的更新问题。当然，这里的数据库可能是服务器上的源数据，也可能只是客户端的临时数据，其差别在于用户具有不同的操作权限。对于直接来源于摄影测量和地面测量的数据，每一个对象往往都具有完整的三维坐标；而从既有地图数字化获取的数据，则只有等高线和少量地形点高程信息。在进行三维查询和分析的过程中，有必要通过 DEM 内插及时补充第三维的信息。

为了更加直观地理解空间查询和分析的结果，提高空间分析的水平，有必要恢复三维空间关系，并进行透视显示，而三维表示的前提则是建立三维表面模型。由于需求不同，提出的问题千差万别,因此,基于来自查询或分析的不同数据,快速建立各种相应的表面模型十分关键，特别是基于三维的模型。在透视空间里还应该能实现常规二维空间的基本操作，如几何量测和拓扑关系查询等。并且，操作的结果还可以进一步重新建模。

2 多媒体数据集成的空间数据库系统

传统二维的 GIS 由于数据模型的局限，第三维信息如高程往往作为属性信息看待，从而制约了其灵活应用，并导致三维表示与三维分析功能及其它 GIS 基本功能之间的单向数据传输(如 Arc/Info)。因此,现有的大多数商业 GIS 软件，只能把三维表示作为有关空间查询与分析结果的辅助说明。这种三维表示是静态、不可交互的。由于不同的终端用户希望能直接在直观逼真的透视环境里进行各样空间查询与分析决策，而不只是面对单调难懂的平面图形或数表。这首先就对传统二维 GIS 的空间数据模型，数据结构和数据管理提出了严峻的挑战。在三维 GIS 中还有许多问题没有解决的时候,Geostar 将所有的矢量对象均设计为三维空间目标，即其空间位置信息包括 X, Y, Z 三个坐标分量，直接将常规的二维平面坐标数据模型推广到三维空间,并引入数字高程模型 DEM 和正射影像数据。其它复杂的声、视、图多媒体数据和三维空间拓朴关系描述则通过简单的数据库关联方法暂时加以解决。这种数据模型为后续的三维操作提供了基本保证。

3) 二维与三维混合的空间查询分析

二维操作的优点是可以无级放大、选择惟一和定位准确等，而三维操作的特点则是空间分布关系直观明了。所以，不同的应用目的往往需要这两种方式的交替运作，而不是单一的某一种。三维查询与分析最一般的要求是要将指定的矢量目标或结果叠加在三维模型上进行显示，或者直接从三维模型上选择目标进行查询与分析。为此，GeoStar 将常规二维空间的操作算子如几何量测和拓扑关系查询等扩展到 2.5 维空间(表面积、剖面、周长、距离、体积、坡度、坡向、可视域、相邻、包含、相交、相离等),使得在透视空间也能实现各种空间查询与分析。对于 2.5 维的几何量测算子的实现，关键是对三维坐标的检索与内插。而要将二维拓扑关系的查询算子推广到 2.5 维,包括两个基本步骤 首先从透视屏幕空间变换到三维真实空间,再使用常规二维空间的空间索引和数据检索策略。

4 三维表面动态建模技术

复杂特征目标的三维表示需要有效的表面建模技术，为此在 GeoStar 中混合使用基于不规则三角形网(TIN) 和方格网的表面描述方法。采用 TIN 结构,可以灵活、逼真、快速地建立具有任意边界形状的目标模型，这对于空间查询和分析结果的三维表示极为重要。 GeoStar 同时提供了基于“ 移动曲面法 ”的快速随机栅格转换功能，可以利用随机分布的等高线和地形点等数据内插方格网 DEM ,为后续空间操作提供基本的第三维数据。

5 数据内插引擎

数据内插是三维可视化模型的核心，也是实现模型交互操作的前提。该模型有两种不同的内插机制,即在同一个物理空间(如屏幕空间、透视空间或者实际三维空间)里的内插和在不同物理空间之间的内插（从世界坐标到透视坐标或者从透视坐标到屏幕坐标等）。要实现对所有要素的三维表示，必须要有第三维的信息，而一般的矢量数据即使是原有数字化数据往往也只有平面坐标。再有，许多常规分析查询结果如缓冲区边界和叠置产生的区域边界等也不会有第三维的信息。所有这些第三维信息都必须依靠系统动态地根据 DEM 内插计算产生。另外，在三维透视空间进行各种空间查询和分析操作也都离不开数据内插。比如，要在透视表面模型上选择某一特定的目标，可以用鼠标点取该目标的任意位置。但是，由于在透视空间的屏幕坐标和实际的三维空间坐标之间不存在一对一的关系，因此，必须要有可靠的内插机制。为了完成某一种操作，常常要进行多次从屏幕坐标到地面坐标和从地面坐标到屏幕坐标的内插计算。为此,GeoStar 三维可视化模型提供了所谓“ 基于三角形单元的扫描线增量法 ”内插引擎。

假定令三角形顶点 A,B,C 的空间坐标为$(x,y,z)_i(i=A,B,C)$,这里的 z 参量泛指位置(x,y)处的属性值,它可能是高程,也可能是灰度等。如果已知 3 个顶点的属性值，要内插该三角形内任意位置 p 处的属性值，那么先用顶点的坐标值线性内插当前扫描线 $(y=y_k)$与三角形的边之交点 L 和 R)处的值：

$$z_L = z_A + (y_k - y_A)/(y_C - y_A) \times (z_C - z_A)$$

$$z_R = z_A + (y_k - y_A)/(y_B - y_A) \times (z_B - z_A)$$

位于 L 和 R 之间的点 p 的灰度不是用常规的线性内插方法进行计算，而是用增量法沿扫描线从左到右逐一进行计算。任一点 p 的属性值为其前一位置处的值加上该扫描线上的增量：

$$z_p = z_{p-1} + \Delta z,(p=1,x_2 - x_1)$$

其中，$z_0 = z_L, \Delta z = (z_R - z_L)/(x_R - x_L)$。

由于扫描线增量法充分利用了沿扫描线的连贯性质 (scan - line coherence),避免了对整个三角形面的逐点判断和反复求交运算，大大减少了计算工作量。这一内插机制主要用于不同空间坐标系统之间的数据转换，如从世界坐标到屏幕坐标，反之依然。

，特别地，如果在透视空间集成显示影像数据，还可以人机交互式地从该模型上采集三维空间信息，即直接从模型得到特定目标的属性和三维空间坐标，从而为系统提供一种简便的一体

化的数据采集与更新手段。基于这一思路，GeoStar 正被用于建立中国省级 1:1 万基础地理信息系统框架的示范研究。

6）金字塔层次结构与三维可视化策略

图形显示效果与计算效率往往相互矛盾。由于计算机图形显示分辨率和人眼感官的局限，显示图形的信息容量总是有限的。也就是说，当计算的复杂程度增加到一定量的时候。计算机显示图形的变化将趋于零。因此，对于利用有限的个人计算机资源来完成复杂的三维可视化任务，有必要在这之间求得一种平衡或者说折中。

当前二维 GIS 的重点还只是对大量矢量与属性数据的管理与操作。数字地面模型的加盟，一方面可以补充三维表面分析功能，同时还在于增加对 GIS 各种空间查询与分析的三维表示，以便不同用户更好地理解各种空间分布关系。对于一个较大型的数据库，要实现整体与局部灵活交替的漫游操作，如果不考虑层次结构，其交互效率是无法想象的。与表达二维矢量数据的层次关系相比，建立合适的具有不同细节的 DEM 层次体系则要困难得多。为此，与矢量数据的层次结构相对应，在 GeoStar 中设计了多尺度 DEM 的金字塔层次结构。对于不同层次的矢量数据，通过对象标识码 OID 即可识别，不用重复存储；相反，不同层次的 DEM 则分别属于不同的数据库，其中，最底层的 DEM 为基本数据库，属于 GIS 的原始数据，允许具有多重分辨率、多数据源特性；而其余各层次的 DEM 则均从基本数据派生而成，通过数据融合，同一尺度的数据层具有一致的空间分辨率。为了提高对不同层次数据进行查询、显示与分析应用的效率，用金字塔结构组织多尺度数据，并利用分块阵列组织同一层次的数据，而在不同层之间建立相互引用机制。层→块→行列的层次结构组成了 DEM 数据的空间索引，它允许对数据的快速存取而不管其多大，且具有无缝性。这样，当需要观察整体概貌时，可以快速调取最上层最低分辨率的数据，而无须从庞大的底层数据库在线抽取数据。如果要了解局部的细节，则根据区域大小可以漫游不同层次不同分辨率的数据。

9.7.2 GeoStar 中的三维表示与分析

上述思想在武汉测绘科技大学的吉奥之星（GeoStar）的两个版本（Windows 和 Windows NT）中均有体现。在 windows l6 位版本中，在最底层进行光照模型计算、矩阵变换等一系列三维坐标变换和三维图形明暗绘制的处理，实现了动态交互式模型的基本框架。在这个版本中，由于受所采用的软硬件平台和数据组织的局限，三维可视化模型与矢量数据和属性数据的处理相互独立，不论是数据库还是交互操作都没有集成在一起。

而以 windows NT 为平台的新版吉奥之星，基于客户 /服务器体系结构，采用集成的数据库（参见图 9.7.2）。它包括矢量数据、属性数据DEM 、数字影像以及各种语音和视频图像等，并且，所有三维操作均在 OpenGL 环境下实现，从而避免了从底层进行光照模型计算、矩阵变换等一系列三维坐标变换和三维图形明暗绘制的处理，在很大程度上提高了图形处理的效率，并能使用标准的图形加速卡，使得借助于普通微机实现三维地形动态生成与准实时动态漫游

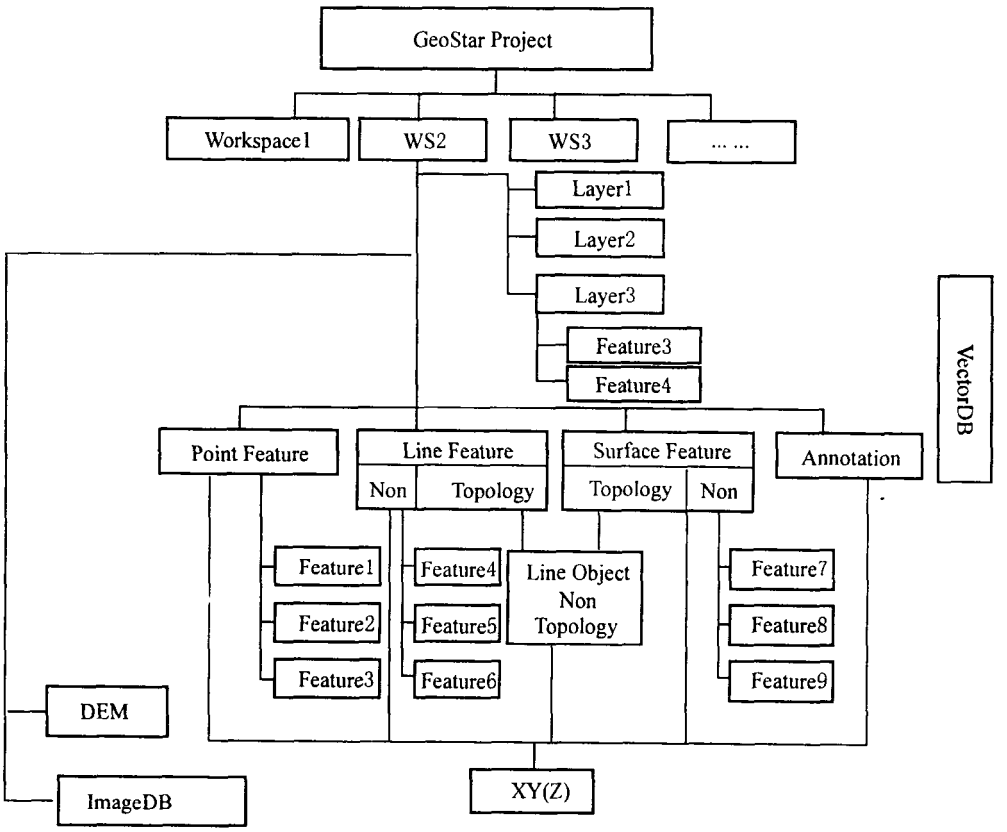


图 9.7.2 集成的数据库系统

成为可能。因此，系统的设计开发主要致力于各种复杂的数字建模、交互操作、动态变化以及模型仿真等。该系统可望用于有关的实际工程，诸如环境影响分析、土木工程规划与设计、洪涝灾害和森林火灾应急反应等。

9.7.3 应用范例

图 9.7.3(见插页)所示为 GeoStar 可视化应用的一个标准界面（见插页）。这里的三维可视化模型的显著特点是其可操作性，GIS 常规的空间查询与分析都可在这样一个动态的真实感环境里完成。二维平面显示与三维透视显示之间可以自由切换，能满足不同的应用需求。例如，可进行街区漫游(见插页 图 9.7.4)。

以上说明，在当前真三维 GIS 尚未出现的时候，这里提出的动态交互式可视化模型，有助于在二维 GIS 的支持下，满足不同用户对三维可视化越来越高的要求。同时，这里的模型扩展了传统二维 GIS 中可视化的概念，更加突出了其动态性和可交互性。特别是将常规二维空间操作算子扩展到 2.5维，为研究真三维空间操作提供了有益的尝试。

参考文献

[1] 徐爱功,刘经南．面向自动车辆定位与导航系统的数字地图数据库系统．武汉测绘科技大学学报，1998，23(2)：159～162

[2] 许云涛,李春葆,李华等．面向对象的多媒体空间数据库系统设计．武汉测绘科技大学学报，1999，24(3)：268～271

[3] 龚健雅．GIS 中矢量栅格一体化数据结构与面向目标数据模型的研究．武汉测绘科技大学博士论文，1992

[4] D. Fritsch. Acquisition, Topology and Structuring of Spatial Data, 1989. 42th Photogrammetric Week at Stutgart University, Germany

[5] D. Mark. et al. A Review of Quadtree —Based Strategies for Interfacing Coverage Data with Digital Elevation Models in Grid Form, Int. J. Geographical Information System, 1989 No (1).

[6] 张系国．图像信息系统设计原理．北京 科学出版社，1990

[7] 关泽群,李德仁,林开愚．基于空间推理的的专题影像解译．测绘学报，1993，22：41～49

[8] 李爱勤,张巍．面向对象的 GIS 数据结构与空间对象索引新机制．武汉测绘科技大学学报，1995，20(Suppl)：44～49

[9] 谈国新．一体化空间数据结构及其索引机制研究．测绘学报，1998，Vol.27(4)，pp.293～299

[10] 方涛,李德仁,龚健雅等．GeoImageDB 多分辨率无缝影像数据库系统的开发与实现．武汉测绘科技大学学报，1999，24(3)：189～193

[11] 李爱勤,龚健雅,李德仁．大型 GIS 地理数据库的无缝组织．武汉测绘科技大学学报，1998，23(1)：57～61

[12] 傅京孙,蔡自兴,徐光佑．人工智能及其应用．北京 清华大学出版社，1987

[13] 陈国权．知识工程中自然语义的模糊表达．北京 科学出版社，1991

[14] 李德仁，关泽群．将 GIS 数据直接纳入图象处理．武汉测绘科技大学学报，1999，24(1)：1～5
[15] 龚健雅．当代 GIS 的若干理论与技术．武汉：武汉测绘科技大学出版社，1999
[16] M. Molenaar. A Formal Data Structure for Three - dimensional Vector Maps, in: Proceedings of the Fourth International Symposium on Spatial Data Handling, 1990
[17] M. Molenaar. A topology for 3 -D Vector Maps. ITC Journal . 1992(1)：25～33
[18] 朱庆．三维动态交互式可视化模型．武汉测绘科技大学学报，1998，23(2)：24～27
[19] L. Deren et. al. 3D Landscape Visualization Based on Integrated Database, Proc. of UM3' 99, 1999, Japan
[20] P.J. Shand, P.J. Ireland. The 1995 European GIS Year-book, Blenhien, 1996

第 10 章　从空间信息到地球空间数据框架

推动地球空间信息科学发展的主要动力有两个方面：一方面是现代航天、计算机、通讯技术的飞速发展为地球空间信息科学提供了强有力的技术支持；另一方面全球变化和社会可持续发展日益成为人们关注的焦点，而作为其主要支撑技术的地球空间信息科学必然成为优先发展的领域。

由于今天的信息技术正伴随着全球因特网技术的发展以前所未有的速度深入到世界各地的各行各业，与这个过程相适应产生了信息高速公路的概念。地球空间信息科学与信息高速公路相结合，又有了空间数据基础设施、数字地球等一系列概念，及与此有关的数据仓库和数据开采概念。下面就这些内容做一些介绍。

10.1　信息高速公路和空间数据基础设施[1]

为了推进信息社会的迅速发展，美国总统克林顿 1993 年 2 月提出了信息高速公路的概念，并签署法令，建立全美的信息高速公路，即“国家信息基础设施”(National Information Infrastructure，简称 NII)。

为了在信息高速公路上表达地理参考，使之与地理和地球有关的空间信息得以在因特网上准确地表达、描述和查询，需要建立全国的空间数据框架，为此克林顿总统又于 1994 年 4 月 13 日签署了建立“国家空间数据基础设施”(National Spatial Data Infrastructure，简称 NSDI) 的 12906 号总统令。

当前美国的信息高速公路和空间数据基础设施已初见端倪。为了将信息技术推进到人们的日常工作、生活和娱乐，美国副总统戈尔又于 1998 年 1 月 31 日提出了“数字地球”(Digital Earth)的概念。

下面就国家信息基础设施和国家空间数据基础设施等概念及其相互关系作一些介绍。

10.1.1　国家信息基础设施(NII)

国家信息基础设施，即美国通称的信息高速公路。它主要由计算机服务器、网络和计算机终端组成。美国计划投入 4 000 亿美元，耗时 20 年建立 NII。到 2000 年的目标是提高生产率

20%～40%,获得效益 35 000 亿美元。我国的国家信息基础设施 CNII,计划投入 1 500～2 000亿美元,到 2020 年建成。“九·五”期间,主要抓“八金”工程。我国目前实质上使用的是中、低速网。

最近几年,计算机服务器迅猛发展,它不仅使用多 CPU,大容量内存,而且可以进行分布式计算和处理,使科学计算和信息检索的效率大大提高。大规模存贮设备已越来越便宜和普及,几千个 GB 的存贮装置可以满足一般用户的需要,几千个 TB(1TB 为 1000 GB)的数据中心才能满足国家重大科学和经济问题的需要。网络硬件的发展在欧美受到极大的关注,并获得巨额投资。网络软件,特别是万维网的浏览器,使人们能够在网上任意漫游,获取人们所需要的信息,但是当大家都使用网络时,感到网速太慢,有时甚至难以忍受。因而美国投巨资改造因特网,电讯营运者已经在试验每秒千兆(10亿信息单位)的网络。可以想象千兆因特网的实现将为我们带来巨大的效率。而每秒 10^{15}bit 的因特网正在研究之中。高速网络的实现将彻底解决信息阻塞问题。与此相比较,我们国内因特网的网速仍是每秒 64KB 或 256KB。局域网一般为每秒 10MB 或 100MB,需要我们下大力气迎头赶上。

网络计算机曾被认为前景看好,但是随着 PC 机的性能价格比进一步提高,新一代的奔腾计算机既可作为本地的个人计算机使用,又可作为网络终端使用。由于性能价格比的提高,PC 机深入到各行各业和千家万户已水到渠成。

网络软件虽不能说已发展到最后阶段,但已基本上解决了一般信息的发布、查询、相互通讯、分布计算等问题。特别是万维网的超链计算,使人们的时空距离大大缩短。人们可以一忽儿在美国。一忽儿在英国,一忽儿又在中国的网址上漫游获取信息。

当前信息高速公路的瓶颈问题在于网络,特别是中国这样的第三世界国家,网速太慢,收费太高已严重制约着中国的信息化进程,限制着广大用户上网分享信息资源。

10.1.2 国家空间数据基础设施(NSDI)

当人们进行处理、发布和查询信息时,发现大量的信息都与地理空间位置有关。例如查询两城市之间的交通连接,查询旅游景点和路线,购房时选择价廉而又环境适宜的住宅等都需要有地理空间参考。

由于技术原因以及尚未建立空间数据参考框架,致使目前在万维网上制作主页时,还不能轻易将有关的信息连接到地理空间参考上,人们还不能在计算机上对虚拟的数字地球进行任意漫游、观察和研究。因此,美国政府进而提出了投巨资建设国家空间数据基础设施、并在此基础上实现数字地球的战略设想。

1) 国家空间数据基础设施的概念

美国总统克林顿 1994 年提出的国家空间数据基础设施属于国家信息基础设施的一部分,它是连接信息高速公路和数字地球的桥梁,国家空间数据基础设施主要包括空间数据协调、管理与分发体系和机构,空间数据交换网站(Clearing House),空间数据交换标准以及数字地球

空间数据框架。

在国家信息中心及各省市信息中心或信息港的基础上，需要建立专门的机构负责空间数据的管理与分发，由于空间数据资源获取、处理和管理的特殊性，还需要有专门的机构来进行空间数据的维护、更新和开发。在美国，除了发布“建立”国家空间数据基础设施的总统令之外，专门成立了联邦地理数据委员会，并由内政部长负责，具体协调 NSDI 的开发。

“国家地理空间数据交换网站(National Geo－Spatial Data Clearing House)是指地理空间数据的生产者、管理者和用户采用电子方式相连接的一个广域的网络工作站。由于空间数据是海量的，空间数据的网络服务器的存贮容量也将是巨大量的，例如一个省的 1 m 分辨率的影像数据将超过 1000 个 GB。另一方面，由于空间数据量大，要求网络也是高速的。

空间数据不同于一般的事务管理和商务管理的数据。由于人们对空间现象的理解和对空间对象的定义有较大的差别，致使空间数据模型和数据结构差异较大，造成空间数据的兼容性较差。因而必须制定严格的空间数据交换标准，以确保各个机构生产和收集的数据都符合有关标准，使进入交换网站的空间数据得以兼容。

“数字地球空间数据框架”(Digital Geo－Spatial Data Framework)是 NSDI 的核心。它包含了最基本的空间数据集。框架的内容一般包括数字正射影像、数字地面模型、交通、水系、境界和地名注记等内容。这一空间数据框架一方面为研究和观察地球以及地理分析提供了最基本和公用的数据集，另一方面为用户添加各种与空间位置有关的信息提供了地理坐标参考。建立国家空间数据基础设施投资最大的项目即是建立数字地球空间数据框架。空间数据的采集与收集是费时费钱的。例如，我国 1:1 万比例尺基础地形图的生产花了 10～20 年时间，而要将我国 1:1 万比例尺地形图全部更新，并变为数字产品，如果不采取新的技术路线，增加大量投入，可能会花费更长的时间。届时，空间数据框架将可能成为我国信息化社会进程的主要障碍之一。

2) 我国空间数据基础设施的发展状况

我国虽然没有由国家主席或政府总理签署的建立“中国空间数据基础设施”的法令，但最近几年在国家计委的支持下，国家测绘局和有关部门的协同努力，为我国的空间数据基础设施建设作了大量的前期准备工作。国家成立了地理信息系统协会，以协调我国的地理信息系统的研究、发展与应用 成立了国家地理数据标准化委员会，统筹、协调和审定我国的地理数据标准。国家测绘局成立了国家基础地理信息中心，大部分省、自治区、直辖市成立了相应的基础地理信息中心，负责管理和分发全国和各省、自治区、直辖市的基础地理信息。

在国家科技部和国家测绘局的支持下，由武汉测绘科技大学为主，全国许多单位参加的我国空间数据交换格式标准经过几年的研究、讨论和测试，已于 1998 年 10 月通过了由国家测绘局主持，国家计委、国家科技部、国土资源部、中国科学院和国家测绘局系统专家组成的鉴定委员会的技术鉴定，可望在不久的将来成为我国的空间数据交换标准。

在国家计委的支持下，国家测绘局已经完成了全国 1:100 万，1:25 万空间数据库的建设，

正在启动全国 1:5万,各省 1:1万数字地球空间数据框架的建设，以及全国七大江河数字地形模型的建设。然而涉及到全国 1:5万,1:1万空间数据的生产和管理，投资将是巨大的。它不仅生产周期长，费用高，空间数据管理设备和网络通讯设备也要异常先进。目前的资金投入严重不足,缺口相当之大。

按照美国建立国家空间数据基础设施的目标和戈尔提出的数字地球的概念，将来的空间数据要基于 1 m 分辨率,而这一分辨率恰好与我国 1:1万比例尺的地形图对应。因而从实质上说，建设我国的空间数据基础设施还仅仅作了前期的组织和技术准备。所以国家有必要尽早立项建立我国的空间数据基础设施。

10.2 地球空间数据框架的信息内容[2]

虽然地球空间数据框架的数据可作为解决和处理许多问题的基础数据，但它们并不提供此类工作所需的所有数据。在实际工作中，框架数据与用户的具体数据（属性、图形及图像形式）互为补充。框架数据提供的是一个基础，可叠加用户数据；或提供一个构架来附加这些用户数据。框架数据旨在以通用格式提供可以访问的基础地理数据，以使各机构能够集中精力搞好自己的应用数据及工作。

建立和使用框架与任何多目的 GIS 工作相似：识别、创建和共享多数用户所需的通用数据专题。个人可以通用数据为基础生成自己的数据，然后进行自己的应用。因此用户模型有两部分：

·被多数用户使用、人人可以共享、依通用标准要求维护的核心数据。在框架模型中,框架数据就是核心数据；

·某些参与者生成和使用的具体应用数据。由于这些数据不会引起广泛的兴趣，因此没必要广泛地共享。未被共享的数据也不必与通用标准协调一致，因此，这些数据的生产者可以做任何他们想做的事情。

地球空间数据框架一般包含大地测量控制、正射影像、高程、交通运输、水文、政府单元及地籍测量信息。由于大多数地区正在生产或准备生产这类数据，因此，许多从事 GIS 的机构已经开始建立潜在的框架数据,作为其 GIS工作的一部分。

1) 大地测量控制

大地测量控制为建立所有地理数据的坐标位置提供了一个通用的参考系。它提供了将通用、全国范围使用的平面及高程坐标系与所有地理要素连接起来的工具。大地测量控制信息的主要要素就是大地测量控制点。这些设标点（有时为动态的 GPS控制点）的平面位置和高程被精确地测量，并用于其它点位的确定。框架的大地测量控制由大地测量控制点及其相关信息——名称、要素识别代码、经纬度、椭球高及各点的元数据组成。各大地测量控制点的元

数据包含该点的描述性数据、位置精度、条件及其他相关特征。

由于大地测量控制信息提供了确定所有其他空间数据位置的空间参考系，因而它在开发所有的框架数据及用户的应用数据中发挥着关键的作用。另外，大地测量控制信息还可用于规划测量、评估数据质量，以及使新的数据范围适应已有的覆盖等。

2 正射影像

正射影像是由已排除因传感器定位及地形起伏等引起的影像位移的航摄像片或其他遥感数据制作的地理参考影像，也就是说它提供的是经准确定位的地球影像。正射影像具有与地图相同的度量特性且有统一的比例尺。数字正射影像由将地面反射率编码为不连续数字值的地理参考像素矩阵组成。在正射影像上可判定及编辑包括作为框架的组成部分在内的许多地理要素。正射影像亦可作为一个背景地理景观来反映某应用结果。

框架可以包括分辨率由亚米到几十米不等的影像。精确定位、高分辨数据(像素为 1 m 或更精确），尤其是支持局部数据需求的数据被认为是支持框架要素编辑最有用的数据。在某些领域，较低分辨率的影像已足以支持框架及应用。

正射影像为各种应用提供了有效的工具。由于在正射影像中可以看到许多地面要素，因而可用作视觉参考的背景(backdrop) ，从而节省了因创建参考所需的要素矢量文件的费用。正射影像可用来以摄影测量方法编辑矢量专题。

3 高程

高程指空间参考的高于或低于某基准平面的垂直位置，主要用来提供地形信息。框架包括地表面的高程及水面下的深度。

对地表面而言，框架使用的是高程矩阵。在地形较陡地区，高程值是以 2 弧秒（相当于北纬 40°处的 47.4m）或更精确的间距值来采集。在地形较平缓区，一般以 1/2 弧秒（约为北纬 40°处的 11.8m)或更精确的间距来采集。

对深度而言，框架由测深记录及格网底面模型组成。水深是相对某指定的垂直参考表面判定的，通常来自潮汐观测值。将来，该垂直参考面可以以大地水准面或椭球面的全球模型为依据，该模型将成为表达全球定位系统(GPS)高程测量值的工具。

高程数据可用于许多应用中。用户可以用它表示地形（如等高线图）、点高程或三维透视图。高程数据还可用于建立视线计算、道路规划、水流量等一系列模型及其应用。在应用与制图中，高程数据还常与其他专题数据结合使用。

4）交通运输

框架的交通运输数据包括交通运输网及设施的以下几个主要的通用要求：

·公路——中心线、要素识别代码、功能类别、名称(包括道路编号)及街道范围；

·小路—— 中心线、要素识别代码、名称及类型；

·铁路——中心线、要素识别代码及类型；

·水道 ——中心线、要素识别代码及名称；

·机场及港口——要素识别代码及名称；

·桥梁与隧道——要素识别代码及名称。

交通运输信息可用于多种应用中。有些机构仅使用它作为参考（作为基础制图的一个要素），而多数则用它添加其他类型的信息，如地址相关信息或街道特征。交通运输要素及相关的数据是许多规划应用的重要信息。在地理编码方面，可使用公路及相关地址数据进行诸如市场分析及位置识别等许多应用；在线路应用方面，可使用街道网络数据进行诸如交通工具调度及车队管理等作业。

5 水文

框架的水文数据包括表面水要素,如湖泊与池塘、小溪与河流、运河、海洋及岸线。这些要素都有名称及识别码等属性，其位置通过中心线及多边形编码确认。就要素识别码而言，美国的许多联邦及州机构都使用的是美国环境保护局开发的扩展模式（Reach Scheme）。

许多水文数据用户都需要有关水文网及水流方向等完整的水文信息。为满足需求，框架数据一般包括表示水流及各要素之间的连通性的辅助要素。

岸线为陆地与水表面之间的交界处，它通常参考了一定时期海水或湖泊及河流等其它水面的潮汐。框架包括了作为参考依据的诸如‘平均潮高’‘平均较低低水位’等不同水位的许多岸线。由于不同的用户需要不同的岸线，因而框架包括有多种岸线。另外，框架还包括说明水文特征的属性数据如对岸线及潮汐参考依据的描述。

对许多应用而言，水文要素有重要作用。例如，许多用户需要利用水文要素作为参考或基础地图数据。其它应用特别是面向环境和资源分析的应用，如污染、洪灾及土地适应性的分析及建模，都需要有关的水文信息。

6 政府单元

框架一般包括政府单元的地理区域。这些单元包括：

·国 家；

·各省及统计上与省相当的地区；

·各具及统计上与县相当的地区；

·协作区及城市群；

·功能上及法律上合法的小型民用区；

·各种特别行政区或保护区。

由这些单元构成的数据集一般都包括名称及可应用的国家信息处理标准代码两种属性。单元境界数据除了包括境界要素还包括与其有关的其它要素(如公路、铁路或河流)的信息,并通过这些信息对其关系(如融合、偏移或狭长地带)进行描述。

政府单元界限可用于大量的应用中。有些应用仅用这些界线作为信息及定位，而另外的一些则需要多边形来判定与其他要素的关系。商业 GIS 是一个非常活跃的领域,它使用这些界线进行统计分析及决策。

7 地籍测量信息

地籍测量信息主要与地产有关。地籍数据表述了房地产业过去、现在及未来的权益的地理范畴。其所必须的空间信息包括各种测量、合法的说明性参考系及地块至地块的测量描述。框架中通常包含地籍测量信息的两个方面：

·地籍测量参考系，如公用土地测量系统(PLSS)以及未包括在 PLSS 范围内的类似系统；

·公共管辖的地块，如军事禁区、国家森林等。

地籍测量要素包括测量点、各种境界及地块。各要素都具有名称（或其他通用识别码）及数据质量信息等属性，除此之外还有一个永久性的要素识别代码。

对 PLSS 而言，最小单元为各地块的境界，包括偏移点及沿地块境界的四点的位置。已被测量的境界可作为地籍测量参考系的内容。

地籍测量信息是选点、土地利用管理及交通运输规划等多种分析、决策及作业应用的基础。这些土地的框架表示提供了有关其位置、境界、范围及与其它地理要素或地理现象之间的关系等的有用信息。由于在许多国营及私营企业中，地块有重要的作用，因而地块信息成为许多应用的基本组成部分。

以上所描述的信息体现了框架的最低需求。任何数据生产者或其联盟都可以生产超出框架内容以外的地理数据。为了满足本部门数据生产的需求，比较实用与可行的方法是从小的、简单的数据集开始，并在条件允许的时候把这些数据集汇入地球空间数据框架中。

10.3 从影像到地球空间数据框架[3]

随着信息技术的迅速发展,信息系统已成为各行各业进行有效管理的重要辅助决策手段。地理信息系统(GIS)作为处理和管理空间信息的新技术也已被广泛应用于国民经济建设的各个部门。不过,GIS作为地球空间基础信息数据的载体，需要不断对其源数据进行快速、高效的采集与更新。多年来，航空摄影测量一直是提供地球空间信息的重要手段，但其第一年航空摄影、第二年像片野外控制联测与调绘、第三年航测制成硬拷贝图件的传统作业模式已不能再适应社会可持续发展的需要。因此，寻求一种既经济又可准实时地提供对地观测基础和专题信息的方法显得十分必要和紧迫。

建立这样一种新的作业方法,应以高分辨率、低生产成本、短作业周期和安全可靠为原则。目前，利用带像移补偿装置的框幅式航摄仪可以很方便地获得每毫米 100 线的高分解率光学影像，通过对航摄像片用市售影像扫描仪数字化可以快速得到高分辨率的数字影像；借助计算机影像匹配、特征提取、模式识别等技术来实现几何和语义信息的提取,可以达到每秒 1000 点的处理速度；加上像片控制点加密过程中利用载波相位差分 GPS定位技术可免除绝大部分地面控制工作量，几乎能节省一年的工期，从而大大地缩短航测成图周期，降低生产成本。以上

作业模式将涉及到用 GPS 辅助自动空中三角测量方法实现对地面目标定位以提供测图控制，用全数字化测图技术自动生成 DEM 和数字正射影像，并从正射影像上自动或人机交互式地提取各种专题信息，然后将这些结果直接送入 GIS 数据库中，以实现 GIS 数据库的自动建立和更新，构成地球空间数据框架。近十几年，武汉测绘科技大学完成了 GPS 辅助空中三角测量软件 $WuCAPS_{GPS}$，全数字化测图软件 VirtuoZo 和 GIS 软件 GeoStar 等系统和技术，并进行了集成研究，下面以此为主要依据说明从影像到地球空间数据框架的工艺流程和关键技术。

1）工艺流程

从影像到地球空间数据框架的过程实际上可看成从航空摄影开始到可实现 GIS 系统一切功能的全部过程。概括起来，可形成如图 10.3.1 所示的技术路线。

2 关键技术

从图 10.3.1 可以看到，从影像到地球空间数据框架的过程实际上应用了解析摄影测量、数字摄影测量、GPS技术、模式识别和地理信息系统等各个学科的多种高新技术。但关键是在如下几个方面：

(1)将全球定位系统 GPS动态定位技术引入航空摄影测量作业中。航摄飞行时， GPS 信号接收机应能与航摄仪协同工作；航摄完毕后，采用基于载波相位观测量的相对动态 GPS 定位方法解求航摄仪在航曝光时刻的摄影中心三维坐标。尤其是利用模糊度在航解算（OTF)方法来处理 GPS 信号的周跳失锁，该方法对于距离远达 500km、高差大于 2 400m 的 DGPS 测量能够迅速、有效地解出正确的整周相位模糊度，在固定整周相位模糊度后可提供优于 1dm 的差分 GPS 定位精度。

(2)利用按核线条件约束的局部多点松弛算法影像匹配对整区数字影像自动寻找同名像片连接点以实现自动转点和影像量测；为节省地面控制点，减少在数字影像上人工量测像点的工作量，影像绝对定向控制点的加密可采用 GPS 辅助自动空中三角测量方法。

(3)利用模板匹配技术，可在由人工沿道路给定的近似点附近，以道路局部灰度特征的模板进行匹配确定候选点，然后顾及道路的平滑性和连续性等几何约束，采用分段拟合和 Hopfield 神经元网络模型优化计算，最终得到正确的点，从而实现道路的半自动量测。

(4)利用目标提取技术，在由人工给定的房角近似点附近，根据边缘检测算子、Hough 变换与最小二乘拟合得到房角两边的直线及其交点，进行房屋角点的自动定位。然后建立一个尽可能多地包含房顶面的目标窗口，取代传统的以房角为中心的窗口，进行房顶角点影像匹配自动搜索同名点，以实现航摄影像上房屋三维数据的半自动量测。进而在地面与建筑物表面 2.5 维不规则三角网和原始数字影像的基础上，实现建筑物可见表面纹理的恢复，重建城市真实三维景观。

(5)由全数字化摄影测量系统 VirtuoZo 生成的数字正射影像及其图形信息无失真地进入 GIS 软件中，建立大面积无缝影像数据库并与 DEM 叠加，以实现 2.5 维空间分析、查询和可视化动态传真。实际上，由 VirtooZo 生产的广州市 200 余幅 DEM 和数字正射影像图已通过

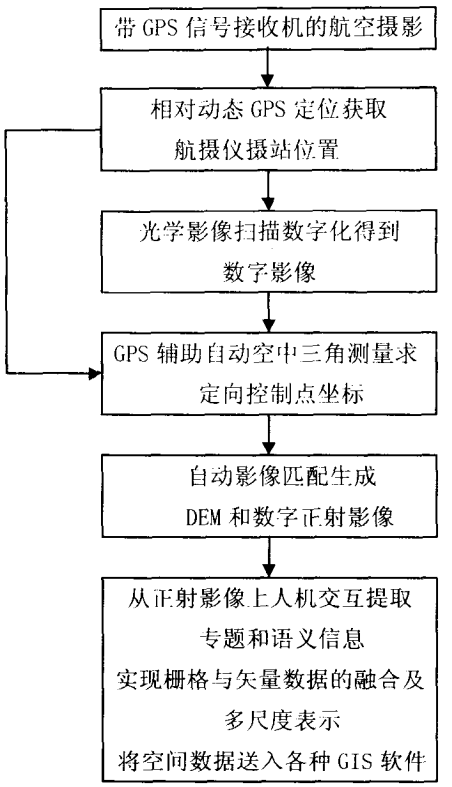


图 10.3.1 从影像到地球空间数据框架的过程

GeoStar 系统建立起 DEM 数据库和数字正射影像数据库。

10.4 空间数据仓库与数据开采

随着信息技术的飞速发展和企业界对地球空间数据框架新需求的不断提出，一种空间信息集成方案——空间数据仓库为满足这种新的需求而被提出。

数据仓库是面向主题的、集成的、稳定的、不同时间的数据集合，用以支持空间信息管理中的决策制定过程。从体系结构上看，空间数据仓库系统由以下几个部分组成[4]：

(1)元(Meta)数据。元数据是数据的数据，是关于数据和信息资源的描述信息。它通过对地理空间数据的内容、质量、条件和其他特征进行描述和说明，帮助人们有效地定位、评价、

比较、获取和使用地理相关数据。其中,对空间数据某一特性的描述,称为一个空间元数据项。空间元数据是一个由若干元数据项组成的集合。

(2)源数据。指分布在不同的空间信息系统的应用系统之中，或存储在不同的平台和不同的数据库之中的大量的空间信息，是空间数据仓库的物质基础。

(3)数据变换工具。为优化空间数据仓库的分析性能，源数据必须经过变换以最合适的方式进入数据仓库。主要的变换包括 数据的提炼、转换、空间变换。

(4）数据仓库。数据仓库用多维数据库来实现，即以多维方式来组织和显示数据。空间维和时间维是空间数据仓库反映现实世界动态变化的基础，它们的数据组织方式是整个空间数据仓库技术的关键。多维数据库的结构类似超立方体，在实际分析过程中，可以按照需要把任意一维和其他维进行组合，以多维的方式显示数据，让人们从不同的角度来认识世界。通常情况下，源数据需经过变换进入数据仓库。

(5)数据仓库工具。数据仓库系统的目标是提供决策支持，它不仅需要一般的空间信息查询和分析工具，更需要功能强大的分析和挖掘工具，它是数据仓库系统的重要组成部分。客户端的数据仓库工具包括查询工具、分析工具和挖掘工具。查询工具主要实现对分析结果的查询,如发展趋势或运行模式,而不是对记录级数据的查询,这类查询在数据仓库中是比较少的。数据仓库的查询工具还为用户提供可视化工具，充分利用人们的视觉能力，从多种不同的角度以各种不同的图表来表示数据,使人们能更方便、清晰地了解综合、分析和挖掘的结果,快速发现数据间的潜在关系，了解数据的复杂性和动态性。分析工具主要实现对数据仓库中的数据进行分析和综合。挖掘工具负责从大量的数据中发现数据的关系，找出可能忽略的信息，预测趋势和行为。

例如，由于计算机和网络技术的发展，交通部门可以利用前端售票机收集存储大量的旅客信息。如果对这些历史事务数据进行分析，则可针对旅客的出行行为提供极有价值的信息。如可以据此设计列车的车次（如对旅客经常同时去的地点加开列车），帮助规划旅游线路（以便配备旅游列车）。由此可见，从事务数据仓库中发现各种空间规律，对于改进各种商业活动的决策非常重要。

由于建立数据仓库的主要目标是为了提供决策支持，因此，在整个系统中，数据仓库虽然居于核心地位，但它只是进行进一步信息开采的基础。这样一来，数据仓库的工具是否强大，将对整个系统的能力起着非常重要的作用[5]。

数据仓库和数据开采之间有着非常密切的关系。数据开采是从数据库中抽取和精化新的模式。将数据开采扩充到它的数据仓库系统环境中，可以增强用户的决策支持能力。用户从数据仓库中开采信息时有多种不同的方式，一种是较低层次上的由用户制导的被动方式，另一种是高层次上的主动式自动发现方式。前者称验证驱动数据开采，后者称发现驱动数据开采。验证型开采的策略是，用户首先提出自己的假设，然后利用各种工具通过递归的检索查询以验证或否定自己的假设。发现型的开采策略是，机器自动地从大量数据中发现未知的、有用的模

式(如预测模型)。

数据开采的范围非常广泛，可以是社会科学、商业、科学处理产生的数据或卫星观测得到的数据。它们的数据结构也各不相同，可以是层次、网状、关系和面向对象的数据。数据开采发现的知识可以表示成各种形式,包括规则、法则、科学规律、方程或概念网。

从认知科学的角度来看，数据开采大多用归纳法发现知识；而在评估所发现的知识时要用到演绎法。因而数据开采抽取模式的算法是归纳与演绎的结合。

进入系统的信息有三个来源：用户发出的对控制器的高级命令；数据库提供的原始数据；来自各个方面的存入系统知识库的领域知识。由数据库系统选择的原始数据经过抽取算法的处理，产生候选模式。这些模式经过评估，有些可作为感兴趣的发现。然后，将结果提供给用户。这些发现的模式也可以存贮到系统的知识库中，支持以后的发现。

数据开采中典型的模式抽取有下列方法：

(1)依赖关系分析。数据依赖关系代表一类重要的可发现的知识，它说明一个依赖关系存在于两个元素之间。如果从一个元素 A 的值可以推出另一个元素 B 的值,则称 B 依赖 A 。这里所谓元素可以是字段，也可以是字段间的关系。数据依赖关系有广泛的应用。依赖关系分析的结果有时可以直接提供给终端用户。

(2) 分类。记录可被分成有意义的类，为用户直接提供他所感兴趣的某种知识，或者为其它模式抽取算法提供有用的信息。从传统的模式识别、数据分类到最近发展起来的概念聚类领域都研究了大量的聚类算法。在恰当的条件和适当偏差的情况下，这些算法是有用的，但是这些方法同人类识别聚类的能力还有一定的区别，特别是在处理低维数据和具有可视化处理情形时。目前主要采用交互式的算法，并结合高性能计算机的计算能力、人类特有的知识以及可视化技术，用以提高计算机分类能力。

(3)概念描述。用户常常需要抽象出有意义的描述。经过归纳的抽象描述能概括大量的关于类的信息。有两种典型的描述：特性描述和判别描述。特性描述包含该类所有记录的共同特点；而判别则描述了两个或更多个类之间有何差异。

(4)偏差检测。通过发现异常，可以引起人们对特殊情况的加倍注意。异常包括如下几种可能引起人们兴趣的模式：不满足常规类的异常例子；出现在其它模式边缘的奇异点；与父类或兄弟类不同的类；在不同时刻发生了显著变化的某个元素或集合；观察值与模型推测出的期望值之间有显著差异的事例等。偏差分析的一个重要特征就是它可以有效地过滤大量的不感兴趣的模式。

数据开采中经常遇到以下技术难点：

(1)动态变化的数据。数据的动态变化是大多数数据库的一个主要特点。一个联机系统应能够保证数据的变化不会导致错误的发现。

(2)噪声。由于人为因素的影响，如数据的手工录入以及主观选取数据等引起的错误数据，使得数据具有噪声。带噪声的数据会影响抽取的模式的准确性，可造成最终结果的不确定

性。发现和表示这样的模式要用概率的方法。

(3)数据不完整。数据库中某些个别的记录其属性域可能存在空值现象。另外对某一发现来说还可能完全不存在其所必需的记录域。这造成了数据的不完整。这些都给发现、评估和解释一些重要的模式带来了困难。

(4)冗余信息。数据库中同一信息有时存储在多个地方。函数依赖就是一个通常的冗余形式。冗余信息可能造成错误的知识发现，至少有些发现是用户完全不感兴趣的。为避免这种情况发生，系统需要知道数据库中有哪些固有的依赖关系。

(5)数据稀疏。数据库对应于可能的巨大的发现空间，它的实际数据记录的密度非常稀疏。

(6)超大数据量。数据库中数据的迅速增长是数据开采得以发展的原因之一。这也正是对数据开采研究的挑战。枚举法、经验分析方法对数兆字节、数千兆字节、甚至更大字节数的数据显得无能为力。此时数据开采系统必须采用一定的数据汇集方法，根据用户定义的发现任务,选择有关的域空间,采取随机抽样的方法,对样本进行分析。

前面已经提到数字地球空间数据框架包含了数字正射影像、数字地面模型、交通、水系、境界和地名注记等内容，它为研究和观察地球以及进行地理分析提供了最基本和公用的数据集，将其作为基础，可用来附加用户数据。在框架及其附加用户数据中包含了大量的决策制定过程和众多待开采的数据，因而若把空间数据仓库与数据开采技术应用于数字地球空间数据框架中，必然会给框架数据的使用带来很多益处。

10.5 数字地球与“3S”技术

人们都说农业社会是资源经济,谁拥有资源(自然资源,人力资源等)谁就主宰世界,在工业社会,谁拥有资本谁就主宰社会。到了 21 世纪人类将进入信息社会,谁拥有知识,谁就主宰世界，称之为知识经济。数字地球是美国副总统戈尔于 1998 年 1 月 31 日在“数字地球——认识 21 世纪我们这颗星球”的报告中提出的一个通俗易读的概念，它勾绘出了信息时代人类在地球上生存、工作、学习和生活的时代特征。

10.5.1 什么是数字地球？

什么是“数字地球”呢?所谓“数字地球”,可以理解为对真实地球及其相关现象统一的数字化重现和认识。其核心思想是用数字化的手段来处理整个地球的自然和社会活动诸方面的问题，最大限度地利用资源，并使普通百姓能够通过一定方式方便地获得他们所想了解的有关地球的信息,其特点是嵌入海量地理数据,实现多分辨率、三维对地球的描述,即“虚拟地球”。通俗地讲，就是用数字的方法将地球、地球上的活动及整个地球环境的时空变化装入电脑中，实现在网络上的流通，并使之最大限度地为人类的生存、可持续发展和日常的工作、学习、生

活、娱乐服务。

严格地讲，数字地球是以计算机技术、多媒体技术和大规模存储技术为基础，以宽带网络为纽带，运用海量地球信息对地球进行多分辨率、多尺度、多时空和多种类的三维描述，并利用它作为工具来支持和改善人类活动和生活质量。

10.5.2 数字地球的技术基础

要在电子计算机上实现数字地球不是一个很简单的事，它需要诸多学科，特别是信息科学技术的支撑。这其中主要包括：信息高速公路和计算机宽带高速网络技术、高分辨率卫星影像、空间信息技术、大容量数据处理与存贮技术、科学计算以及可视化和虚拟现实技术。

1) 信息高速公路和计算机宽带高速网

一个数字地球所需要的数据已不能通过单一的数据库来存贮，而需要由成千上万的不同组织来维护。这意味着参与数字地球的服务器将需要由高速网络来连接。为此，美国克林顿总统早在 1993年 2月就提出实施美国国家信息基础设施(NII)，通俗形象地称为信息高速公路，它主要由计算机服务器、网络和计算机终端组成。

在 Internet 流量爆发性增长的驱动下，远程通信载体已经尝试使用 10G/s 的网络，而每秒 10^{15}字节的因特网正在研究中。相信在 21 世纪将会有更加优秀的宽带高速网供人们使用。

2) 高分辨率卫星影像

20 世纪的遥感卫星影像，在卫星遥感问世的 20 多年分辨率已经有了飞快的提高，这里所说的分辨率指空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率。空间分辨率指影像上所能看到的地面最小目标尺寸，用像元在地面的大小来表示。从遥感形成之初的 80m，已提高到 30m，10m，5.8m，乃至 2m，军用甚至可达到 10cm。到 21 世纪获取 1m 或优于 1m 的空间分辨率影像将会十分方便。光谱分辨率指成像的波段范围，分得愈细，波段愈多，光谱分辨率就愈高，现在的技术可以达到 5～6nm(纳米)量级，400 多个波段。细分光谱可以提高自动区分和识别目标性质和组成成分的能力。时间分辨率指重访周期的长短，目前一般对地观测卫星为 15～25 天的重访周期。通过发射合理分布的卫星星座可以 3～5 天观测地球一次。

高分辨率卫星遥感图像在 21 世纪将可以优于 1m 的空间分辨率，每隔 3～5 天为人类提供反映地表动态变化的详实数据，从而实现秀才不出门，能观天下事的理想。

3) 空间信息技术与空间数据基础设施

空间信息是指与空间和地理分布有关的信息，经统计，世界上的事情有 80% 与空间分布有关，空间信息用于地球研究即为地理信息系统。为了满足数字地球的要求，将影像数据库、矢量图形库和数字高程模型(DEM)三库一体化管理的 GIS软件和网络 GPS，将在 21 世纪十分成熟和普及。从而可实现不同层次的互操作，一个 GIS 应用软件产生的地理信息将被另一个软件读取。

当人们在数字地球上，进行处理、发布和查询信息时，将会发现大量的信息都与地理空间

位置有关。例如查询两城市之间的交通连接，查询旅游景点和路线，购房时选择价廉而又环境适宜的住宅等都需要有地理空间参考。由于尚未建立空间数据参考框架，致使目前在万维网上制作主页时还不能轻易将有关的信息连接到地理空间参考上。因此，国家空间数据基础设施是数字地球的基础。

国家空间数据基础设施主要包括空间数据协调管理与分发体系和机构，空间数据交换网站、空间数据交换标准及数字地球空间数据框架。这是美国克林顿总统在 1994 年 4 月以行政令下发的任务,美国将于 2000 年元月初步建成，我国也将在跨世纪之际，抓紧建立我国基于 1:50000和 1:10000 比例尺的空间信息基础设施。欧洲、俄罗斯和亚太地区也都纷纷抓空间数据基础设施。

空间数据共享机制是使数字地球能够运转的关键之一。国际标准化组织 ISO/TC211 工作组正为此而努力工作。只有共享才能发展，共享推动信息化，信息化进一步推动共享。政府与民间的联合共建是实现共享原则的基本条件，因为任何国家的政府也不可能包揽整个信息化的建设。在我国，要遵循这一规律就必然要求打破部门之间和地区之间的界限，统一标准，联合行动,相互协调,互谅互让,分工合作,发挥整体优势。只有大联合才能形成规模经济的优势，才能在国际信息市场的激烈竞争中争取主动。

4 大容量数据存贮及元数据

数字地球将需要存贮 10^{15}字节的(Quadrillions)信息。美国 NASA 的行星地球原计划 EOS—AM1999 年上天,每天将产生 1000GB(即 1TB)的数据和信息,1m 分辨率影像覆盖广东省,大约有 1TB 的数据,而广东才是中国的 1/53。所以要建立起中国的数字地球，仅仅影像数据就有 53TB,这还只是一个时刻的,多时相的动态数据,其容量就更大了。目前美国的 NASA 和 NOAA 已着手建立用原型并行机管理的可存贮 1800TM 的数据中心，数据盘带的查找由机器手自动而快速地完成,相信到 21 世纪，还会有新的突飞猛进。

另一方面,为了在海量数据中迅速找到需要的数据,元数据(metadata)库的建设是非常必要的,它是关于数据的数据,通过它可以了解有关数据的名称、位置、属性等信息,从而大大减少用户寻找所需数据的时间。

5) 科学计算

地球是一个复杂的巨系统，地球上发生的许多事件，其变化和过程十分复杂而呈非线性特征,时间和空间的跨度变化大小不等,差别很大,只有利用高速计算机,我们今日和跨世纪的未来，才有能力来模拟一些不能观测到的现象。利用数据挖掘（Data Mining)技术,我们将能够更好地认识和分析所观测到的海量数据，从中找出规律和知识。科学计算将使我们突破实验和理论科学的限制，建模和模拟可以使我们能更加深入地探索所搜集到的有关我们星球的数据。

6 可视化和虚拟现实技术

可视化是实现数字地球与人交互的窗口和工具，没有可视化技术，计算机中的一堆数字是

无任何意义的。

数字地球的一个显著的技术特点是虚拟现实技术。建立了数字地球以后，用户戴上显示头盔，就可以看见地球从太空中出现；使用“用户界面”的开窗放大数字图像，随着分辨率的不断提高,他看见了大陆,然后是乡村、城市,最后是私人住房、商店、树木和其它天然和人造景观 当他对商品感兴趣时,可以进入商店内,欣赏商场内的衣服,并可根据自己的体型,构造虚拟自己试穿衣服。

虚拟现实技术为人类观察自然，欣赏景观，了解实体提供了身临其境的感觉。最近几年，虚拟现实技术发展很快。虚拟现实造型语言(VRML)是一种面向 Web、面向对象的三维造型语言，而且它是一种解释性语言。它不仅支持数据和过程的三维表示，而且能使用户走进视听效果逼真的虚拟世界，从而实现数字地球的表示以及通过数字地球实现对各种地球现象的研究和人们的日常应用。实际上，人造虚拟现实技术在摄影测量中早已是成熟的技术，近几年的数字摄影测量的发展，已经能够在计算机上建立可供量测的数字虚拟技术。当然，当前的技术是对同一实体拍摄照片，产生视差，构造立体模型，通常是当模型处理。进一步的发展是对整个地球进行无缝拼接,任意漫游和放大,由三维数据通过人造视差的方法,构造虚拟立体。

10.5.3 数字地球中的“3S”技术

数字地球的核心是地球空间信息科学，地球空间信息科学的技术体系中最基础和基本的技术核心是“3S”技术及其集成。所谓“3S”是全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)和遥感(RS)的统称。没有“3S”技术的发展，现实变化中的地球是不可能以数字的方式进入计算机网络系统的。

1) 空间定位(GPS)技术

GPS作为一种全新的现代定位方法，已逐渐在越来越多的领域取代了常规光学和电子仪器。20世纪 80年代以来,尤其是 90 年代以来,GPS 卫星定位和导航技术与现代通信技术相结合，在空间定位技术方面引起了革命性的变化。用 GPS 同时测定三维坐标的方法将测绘定位技术从陆地和近海扩展到整个海洋和外层空间，从静态扩展到动态，从单点定位扩展到局部与广域差分,从事后处理扩展到实时(准实时)定位与导航,绝对和相对精度扩展到米级、厘米级乃至亚毫米级，从而大大拓宽它的应用范围和在各行各业中的作用。不久的将来，人人可以戴上 GPS 手表，加上移动电话，你的活动就可以自动进入数字地球中去。

2) 航空航天遥感(RS)技术

当代遥感的发展主要表现在它的多传感器、高分辨率和多时相特征。

(1) 多传感器技术。当代遥感技术已能全面覆盖大气窗口的所有部分。光学遥感可包含可见光、近红外和短波红外区域。热红外遥感的波长可从 $8\sim14\mu m$,微波遥感观测目标物电磁波的辐射和散射,分被动微波遥感和主动微波遥感,波长范围为 1mm～100cm。

(2) 遥感的高分辨率特点。全面体现在空间分辨率、光谱分辨率和温度分辨率三个方面，

长线阵 CCD成像扫描仪可以达到 1～2m 的空间分辨率，成像光谱仪的光谱细分可以达到 5～6nm 的水平。热红外辐射计的温度分辨率可从 0.5K 提高到 0.3K 乃至 0.1K。

(3) 遥感的多时相特征。随着小卫星群计划的推行，可以用多颗小卫星，实现每 2～3 天对地表重复一次采样，获得高分辨率成像光谱仪数据，多波段、多极化方式的雷达卫星，将能解决阴雨多雾情况下的全天候和全天时对地观测，通过卫星遥感与机载和车载遥感技术的有机结合，是实现多时相遥感数据获取的有力保证。

遥感信息的应用分析已从单一遥感资料向多时相、多数据源的融合与分析过渡，从静态分析向动态监测过渡，从对资源与环境的定性调查向计算机辅助的定量分析过渡，从对各种现象的表面描述向软件分析和计量探索过渡。近年来，由于航空遥感具有的快速机动性和高分辨率的显著特点使之成为遥感发展的重要方面。

3 地理信息系统(GIS)技术

随着“数字地球”这一概念的提出和人们对它的认识的不断加深，从二维向多维动态以及网络方向发展是地理信息系统发展的主要方向，也是地理信息系统理论发展和诸多领域的迫切需要如资源、环境、城市等。在技术发展方面，一个发展是基于 Client/Server 结构，即用户可在其终端上调用在服务器上的数据和程序。另一个发展是通过互联网络发展 Internet GIS或 Web GIS，可以实现远程寻找所需要的各种地理空间数据，包括图形和图像，而且可以进行各种地理空间分析，这种发展是通过现代通讯技术使 GIS 进一步与信息高速公路相接轨。另一个发展方向，则是数据挖掘(Data Mining)，从空间数据库中自动发现知识，用来支持遥感解译自动化和 GIS 空间分析的智能化。

4)“3S”集成技术

“3S”集成是指将上述三种对地观测新技术及其他相关技术有机地集成在一起。这里所说的集成，是英文 Integration 的中译文，是指一种有机的结合，在线的连接、实时的处理和系统的整体性。GPS、RS、GIS集成的方式可以在不同技术水平上实现。“3S”集成包括空基 3S 集成与地基 3S集成。

空基“3S”集成：用空一地定位模式实现直接对地观测，主要目的是在无地面控制点（或有少量地面控制点)的情况下，实现航空航天遥感信息的直接对地定位、侦察、制导、测量等。

地基“3S”集成 车载、舰载定位导航和对地面目标的定位、跟踪、测量等适时作业。

10.5.4 数字地球的应用

在人类所接触到的信息中有 80% 与地理位置和空间分布有关，地球空间信息是信息高速公路上的货和车。数字地球不仅包括高分辨率的地球卫星图像，还包括数字地图，以及经济、社会和人口等方面的信息，它的应用正如戈尔副总统在报告中提到的有时会因为我们的想象力而受到限制，换句话说，数字地球的应用在很大程度上超出我们的想象，可以乐观地说 21 世纪中，数字地球将进入千家万户和各行各业。这里只能就我们的理解提出一些现实的应用。

1) 数字地球对全球变化与社会可持续发展的作用

全球变化与社会可持续发展已成为当今世界人们关注的重要问题，数字化表示的地球为我们研究这一问题提供了非常有利的条件。在计算机中利用数字地球可以对全球变化的过程、规律、影响以及对策进行各种模拟和仿真，从而提高人类应付全球变化的能力。数字地球可以广泛地应用于对全球气候变化,海平面变化,荒漠化,生态与环境变化,土地利用变化的监测。与此同时，利用数字地球，还可以对社会可持续发展的许多问题进行综合分析与预测，如：自然资源与经济发展,人口增长与社会发展,灾害预测与防御等。

我国是一个人口多，土地资源有限，自然灾害频繁的发展中国家，十几亿人口的吃饭问题一直是致关重要的。经过二十多年的高速发展，资源与环境的矛盾越来越突出。 1998 年的洪灾,黄河断流,耕地减少,荒漠化加剧,已经引起了社会各界的广泛关注。必须采取有效措施，从宏观的角度加强土地资源和水资源的监测和保护，加强自然灾害特别是洪涝灾害的预测、监测和防御，避免第三世界国家和一些发达国家发展过程中走过的弯路。数字地球在这方面可以发挥更大的作用。

2 数字地球对社会经济和生活的影响

数字地球将容纳大量行业部门、企业和私人添加的信息，进行大量数据在空间和时间分布上的研究和分析。例如国家基础设施建设的规划，全国铁路、交通运输的规划，城市发展的规划，海岸带开发，西部开发。从贴近人们的生活看，房地产公司可以将房地产信息链接到数字地球上；旅游公司可以将酒店、旅游景点，包括它们的风景照片和录像放入这个公用的数字地球上;世界著名的博物馆和图书馆可以将其收藏以图像、声音、文字形式放人数字地球中;甚至商店也可以将货架上的商店制作成多媒体或虚拟产品放人数字地球中，让用户任意挑选。另外在相关技术研究和基础设施方面也将会起推动作用。因此，数字地球进程的推进必将对社会经济发展与人民生活产生巨大的影响。

3) 数字地球与精细农业

21 世纪农业要走节约化的道路，实现节水农业、优质高产无污染农业。这就要依托数字地球,每隔 3～5天给农民送去他们的庄稼地的高分辨率卫星影像，农民在计算机网络终端上可以从影像图中获得他的农田的长势征兆，通过 GIS 作分析,制定出行动计划,然后在车载 GPS 和电子地图指引下,实施农田作业,及时地预防病虫害,把杀虫剂、化肥和水用到必须用的地方,而不致使化学残留物污染土地、粮食和种子,实现真正的绿色农业。这样一来,农民也成了电脑的重要用户，数字地球就这样飞人了农民家。到那时农民也需要有组织，有文化，掌握高科技。

4) 数字地球与智能化交通

智能运输系统是基于数字地球建立国家和省市、自治区的路面管理系统、桥梁管理系统、交通阻塞、交通安全以及高速公路监控系统,并将先进的信息技术、数据通讯传输技术、电子传感技术、电子控制技术以及计算机处理技术等有效地集成运用于整个地面运输管理体系，而建

立起的一种在大范围内、全方位发挥作用的,实时、准确、高效的综合运输和管理系统,实现运输工具在道路上的运行功能智能化。从而，使公众能够高效地使用公路交通设施和能源。具体地说，该系统将采集到的各种道路交通及服务信息经交通管理中心集中处理后，传输到公路运输系统的各个用户(驾驶员、居民、警察局、停车场、运输公司、医院、救护排障等部门),出行者可实时选择交通方式和交通路线；交通管理部门可自动进行合理的交通疏导、控制和事故处理；运输部门可随时掌握车辆的运行情况，进行合理调度。从而，使路网上的交通流运行处于最佳状态，改善交通拥挤和阻塞，最大限度地提高路网的通行能力，提高整个公路运输系统的机动性、安全性和生产效率。

对于公路交通而言,ITS（智能化交通系统）将产生的效果主要包括以下几个方面：

——提高公路交通的安全性；

——降低能源消耗，减少汽车运输对环境的影响；

——提高公路网络的通行能力；

——提高汽车运输生产率和经济效益，并对社会经济发展的各方面都将产生积极的影响；

—— 通过系统的研究、开发和普及,创造出新的市场；

美国国会 1991 年颁布“冰茶法案”(ISTEA——Intermodel Surface Transportation Efficiency Act),1998 年颁布“续茶法案”(NEXTEA——National Economic Crossroad Transportation Efficiency Act)，目标是实现高效、安全和利于环境的现代交通体系。

5 数字地球与 Cybercity

基于高分辨率正射影像、城市地理信息系统、建筑 CAD ,建立虚拟城市和数字化城市,实现真三维和多时相的城市漫游、查询分析和可视化。数字地球服务于城市规划、市政管理、城市环境、城市通讯与交通、公安消防、保险与银行、旅游与娱乐等,为城市的可持续发展和提高市民的生活质量等。

6 数字地球为专家服务

顾名思义，数字地球是用数字方式为研究地球及其环境的科学家尤其是地学家服务的重要手段。地壳运动、地质现象、地震预报、气象预报、土地动态监测、资源调查、灾害预测和防治、环境保护等等无不需要利用数字地球。而且数据的不断积累，最终将有可能使人类能够更好地认识和了解我们生存和生活的这个星球，运用海量地球信息对地球进行多分辨率、多时空和多种类的三维描述将不再是幻想。

7 数字地球与现代化战争

数字地球是后冷战时期“星球大战”计划的继续和发展，在美国眼里数字地球的另一种提法是星球大战，是美国全球战略的继续和发展。显然，在现代化战争和国防建设中，数字地球具有十分重大意义。建立服务于战略、战术和战役的各种军事地理信息系统，并运用虚拟现实技术建立数字化战场，这是数字地球在国防建设中的应用。这其中包括了地形地貌勘测、军事目标跟踪监视、飞行器定位、导航、武器制导、打击效果侦察、战场仿真、作战指挥等等方面,对

空间信息的采集、处理、更新提出了极高的要求。在战争开始之前需要建立战区及其周围地区的军事地理信息系统；战时利用 GPS、RS 和 GIS 进行战场侦察，信息的更新，军事指挥与调度，武器精确制导；战时与战后的军事打击效果评估等等。而且，数字地球是一个典型的平战结合，军民结合的系统工程，建设中国的数字地球工程符合我国国防建设的发展方向。

总之，随着“3S”技术及相关技术的发展，数字地球将对社会生活的各个方面产生巨大的影响。其中有些影响我们可以想象，有些影响也许我们今日还无法想象。

参考文献

[1] 李德仁．信息高速公路、空间数据基础设施与数字地球．测绘学报，1999，28(1)：1～5

[2] 朱鸿清，许晖译．空间数据基础设施 框架的组成、研究内容及利益．国家测绘局国土测绘司(内部刊印)，1999

[3] 李德仁，袁修孝，张剑清，龚健雅．空间信息学及其应用：从影像到地球空间数据框架．武汉：武汉测绘科技大学出版社，1998

[4] 杨群等．地理信息数据仓库的技术研究．中国图像图形学报，1999，4A(8)：621～625

[5] 史忠植．高级人工智能．北京 科学出版社，1998

前　言

近二三十年来，现代空间信息技术的综合应用有了飞速发展，使得人们能够及时和连续不断地获得有关地球表层及其环境的大量几何与物理信息，形成地球空间数据流和信息流，从而促成了地球空间信息科学技术体系的产生。在这个技术体系中，最基础和基本的技术核心是“3S”技术及其集成。所谓“3S”是全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)和遥感(RS)的统称。没有“3S”技术的发展，现实变化中的地球是不可能以数字的方式进入计算机网络系统的。

“3S”集成是指将上述三种对地观测新技术及其它相关技术有机地集成在一起。这里所说的集成，是英文 Integration 的中译文，是指一种有机的结合、在线的连接、实时的处理和系统的整体性。GPS、GIS、RS 集成的方式可以在不同技术水平上实现。

“3S”集成包括空基“3S”集成与地基“3S”集成。空基“3S”集成用空一地定位模式实现直接对地观测，主要目的是在无地面控制点（或有少量地面控制点）的情况下，实现航空航天遥感信息的直接对地定位、侦察、制导、测量等。地基“3S”集成车载、舰载定位导航和对地面目标的定位、跟踪、测量等实时作业。

“3S”的提法虽已经广为流传，但由于将空间定位技术（目前主要指 GPS 技术）、遥感技术和地理信息系统技术集成为一体，不论从理论上还是在实践中，都是一项难度很大的工作，即使在发达国家也仅属起步阶段，而国内实际上还处在理论探讨阶段。鉴于这种原因，为了跟上国际在该领域的发展，结合过去 10 年中武汉测绘科技大学在 GPS 辅助空中三角测量、国产 GIS 软件 GeoStar 和 CCD 实时立体摄影测量方面的成果，借助测绘遥感信息工程国家重点实验室的支持，在国家自然科学基金重点项目“遥感、地理信息系统和全球定位系统集成理论与关键技术”的资助下，以李德仁院士为课题主持人，由数十名教授、副教授、博士生和硕士生组成课题组，对空间信息系统的集成与实现进行了深入的理论探讨和一系列的实验。经过数年的艰苦努力已取得重要进展：

(1)在 GIS 与 RS、GPS 与 RS、GPS 与 GIS 两两的集成理论与关键技术方面已取得一系列成果；

(2)已对 GPS + RS + GIS、GPS + GIS + CCD 的整体集成开展了有成效的理论与实际工作；

(3)在空间信息的融合、空间概念的形成与联想、空间知识发现与数据挖掘等方面做了大量开拓性的工作，它们对促进空间信息系统的集成有重要作用。

以上成果已被整理成 50 余篇论文在国内外的刊物或学术会议上公开发表，它们涉及地球空间数据和信息从采集、处理、量测、分析、管理、存储到显示和发布的全过程，促进了地球空间信息科学理论框架的完善、技术体系的建立和应用领域的形成。在此基础上，经过进一步加工和系统化，形成了空间信息系统的集成与实现一书。

本书大致可分为五个部分。在绪论部分主要阐述了地球空间信息科学技术体系，及作为其基本技术核心的‘3S’，技术及其集成的理论与关键技术。

由于空间信息的融合、空间概念的形成与联想、空间知识发现与数据挖掘等是空间信息系统的集成与实现中的重要方法或手段，因而在第 2 至第 4 章作了详尽的介绍。

从第 5 章到第 8 章主要就‘3S’，中的集成问题进行了探讨，主要涉及：车辆定位与自动导航，以及道路信息和其它环境信息的采集；将 GPS 动态相位差分技术用于航空/航天摄影测量进行无地面空中三角测量；利用 RS 数据和 GIS 数据快速发现空间对象的变化，同时，对 GIS 数据库进行快速更新；从 GIS数据中发现知识用以辅助遥感数据处理；车载 GPS,GIS 与 CCD（包括其它测绘传感器）集成系统等。

以空间定位技术、遥感技术和地理信息系统技术为基础的集成数据库技术是空间信息集成中的热点问题之一，它包括 GPS 数据、RS 数据和 GIS 数据的一体化存贮与管理，也包括利用遥感数据制作导航数字影像地图以及基于数据集成的 3D 可视化模型。第 9 章专门就这方面内容作了介绍。

最后一章介绍了目前国际上刚刚开始但讨论很热烈的地球空间数据框架等问题，并就它们与‘3S’，的关系作了阐述，同时介绍了我们在这方面的工作。

可以看出，空间信息系统的集成与实现一书是集体智慧的结晶，是数十名教授、副教授、博士生和硕士生辛勤劳动的成果。其中，李德仁院士不仅是整个研究的主要负责人，而且对全书进行了缜密的构思与组织，关泽群教授在他的指导下执笔完成此书。陈小明博士、仲思东教授、龚健雅教授、袁修孝教授、邸凯昌博士等为本书的完成也起到了重要的作用。

本书的出版，得到了武汉测绘科技大学出版社任翔先生的支持，在此一并致谢。

我国在空间信息系统集成领域的研究工作经过不懈努力取得了许多优秀成果，培养了一大批具有较高素质的中青年学术骨干，为学科的发展作出了自己的贡献。但是，我们必须清醒地认识到，由于在传感器、计算机、通讯以及综合国力等方面与先进国家存在较大差距，使得在相当长的一段时间在空间信息系统集成的若干方面难以摆脱落后于国际先进水平的状况。为此，我们将此书献给广大的读者，愿与大家一起，通过发挥自己的优势，不断努力，逐步缩小与国际先进水平的差距，为我国的经济建设、国防建设和社会发展做出自己的贡献。

作　者

2000年春于武昌