

地理信息系统理论与应用丛书

数字城市三维地理空间框架 原理与方法

李成名 王继周 马照亭 编著

国家973计划重大基础研究前期研究专项
信息产业部电子信息产业发展基金
国家测绘局“十一五”基础测绘重点项目
中央级公益性科研院所基本科研业务费专项

联合资助

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对当前“数字城市”建设中城市三维地理空间框架建设所面临的三维数据获取、三维建模、海量数据三维可视化、三维空间分析、行业应用等瓶颈问题,经过长期研究试验,探索出一套符合我国当前数字城市三维空间框架建设需求的技术路线,经过在山东、浙江、河北等省份十几座城市的应用,验证了其实用性与高效性。

本书适宜于作为测绘、遥感以及地理信息系统专业高年级本科生、研究生和从事数字城市研究与建设的科技人员的重要参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

数字城市三维地理空间框架原理与方法/李成名,王继周,马照亭编著.
—北京:科学出版社,2008
(地理信息系统理论与应用丛书)

ISBN 978-7-03-020408-0

I. 数… II. ①李…②王…③马… III. 三维-模型(建筑)-应用-城市建设-研究 IV. TU984

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 195421 号

责任编辑:彭胜潮 关 焱/责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 1 月 第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008 年 1 月 第一次印刷 印张:14 1/2 插页:8

印数:1—4 000 字数:332 000

定价:55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

自文明诞生以来，人类总是在持之以恒地认知环境，坚持不懈地探求未知和神秘的客观现实世界。从躬亲力行的直接实践，到阅读先驱者经验的间接实践，人类跨越了重要而关键的一步，其中符号化语言扮演了十分重要的角色，它是连接认知对象、直接实践者和间接实践者三座“孤岛”的桥梁。

地图作为符号化语言的一种，描述对象为地球表面景观，直接实践者为地图创作者，间接实践者为地图使用者。象形的图形化符号语言雏形于人类早期，用石块、树枝和泥土等手到擒来的材料做成指示方位、大小与远近的标志，后来示意性刻画在石壁、树皮和陶片之上。公元 250 年，尚书令裴秀通过和从前地图的对比，考证了《禹贡》所记载的山川、河流、原隰陂泽、水路径路等，发现了当时符号化语言地图存在的缺陷，创造性地提出“制图六体”，为科学描述地球表面客观存在建立了较为完整的规范。在此后漫长的历史长河中，地图囿于需求牵引和科技进步双重动力推动，不断地取得进步与发展。

当代步伐掠过 20 世纪末，信息大潮扑面而来，一场地图领域新的变革也不期而至。一方面，人口急剧扩张使狭小地球中可供人类活动的范围越来越紧缺，不断向立体纵深发展，特别在城市区域，传统二维平面地图捉襟见肘，需求三维数字表达的呼声一浪高过一浪；另一方面，存储介质由纸变磁、虚拟现实技术蓬勃发展和计算机技术进步使得采用三维表现形式描述认知对象成为可能。相较模拟时代地图，符号化语言应是三维而非二维、尺度应是 2 的级数而非 10 的倍数、数据组织应是机器可读性强而非视觉效果、服务模式应以网络化为主而非人工传递。

站在信息时代的高度，接踵先行者足迹，摒弃传统专业思维的桎梏，探索采用三维符号化语言描述认知对象、传播知识当是技术变迁时代地图科研者最高追求。

近年来，不乏专业人士从理论的视角探讨三维认知表达、数据组织及可视化，也有先进的技术如激光雷达用于三维表面模型信息获取，但总体上看比较分散，构不成完整的技术体系，与真正生产力尚存相当大的距离。

经过数年努力，笔者及其团队系统研究了三维空间模型数据获取无人飞行器适宜性评价及提取理论、三维现实世界抽象和表达理论、地面景观剖分与快速建模理论以及大数据管理和三维可视化关键技术，提出了城市区域高分辨率遥感影像安全高效获取的方法，揭示了单影像量测地面景观立面信息的机理，建立了三维基础空间信息建模和可视化规范，成功开拓了完全不同于国内外已有技术方法的三维空间模型建设的有效途径。在此基础上，成功研制了“三维基础空间信息获取处理技术体系”，其核心包括：无人驾驶飞艇低空遥感系统、单影像立体量测系统、三维抽象表达及建模系统和三维增强现实及应用系统，为构建三维数字空间模型提供了全过程的、集成性很高的成套技术系

统，提升了测绘技术手段。该理论与技术已经在 Nottingham(英国)、威海、烟台、杭州、石家庄、西宁、温州、嘉兴、湖州、无锡、义乌和建德等 40 多个城市的三维模型建设中得到应用，效果显著。

今拨冗成文，旨在抛砖引玉，企盼更多有识同行深入其中，共同推动该研究领域的进步！限于时间仓促和作者水平，书中难免有疏漏之处，望不吝赐教！

目 录

前 言

第一章 绪 言	1
1.1 数字三维时代的来临	1
1.2 国内外相关技术现状	1
1.3 本书主要内容与组织安排	21
第二章 城市景观三维抽象与表达	22
2.1 当代主要表达方法	22
2.2 现实世界三维表达的信息传输模型	24
2.3 城市景观三维抽象	26
2.4 城市景观三维表达方法	29
第三章 城市三维信息获取	36
3.1 低空无人驾驶飞行器遥感	36
3.2 单影像立体量测	49
3.3 地形三维信息获取	67
第四章 三维空间数据模型	70
4.1 现实世界的模型化过程	70
4.2 三维空间数据模型的研究现状	71
4.3 三维空间数据模型构建要求	76
4.4 面向实体的三维空间数据模型	77
4.5 三维地形模型	88
第五章 三维信息组织与管理	93
5.1 三维空间信息管理方式	93
5.2 数据库系统平台	96
5.3 城市地物信息的数据库管理	104
5.4 数字地形信息的数据库管理	107
5.5 影像数据库管理	110
第六章 城市景观三维可视化	118
6.1 三维可视化原理	118
6.2 三维可视化渲染工具	124
6.3 LOD 细节层次模型	132
6.4 海量数据三维可视化关键技术	148
6.5 城市特征地物可视化	155

6.6	地形三维可视化	160
6.7	地形与地物的匹配集成	161
6.8	三维城市构建及可视化中的若干优化策略	164
第七章	三维空间查询与分析	176
7.1	空间查询	176
7.2	空间量算	181
7.3	场景编辑	186
7.4	场景控制	189
7.5	地形分析	191
7.6	通视分析	194
7.7	缓冲区分析	197
7.8	叠置分析	198
7.9	日照阴影分析	199
7.10	水淹分析	201
第八章	实践与应用	208
8.1	三维地理信息系统	208
8.2	在城市规划领域应用	211
8.3	在突发事件应急中应用	214
第九章	总结与展望	218
	参考文献	220
	后记	224
	彩图	

第一章 绪 言

1.1 数字三维时代的来临

现实世界是三维立体空间的，并随着时间在不断发生变化。前人源于无需求或有需求但缺乏技术手段，长期以来惯性地使用平面地图和二维地理空间信息，并作为认识世界与改造世界的基础资料。当人类经济社会发展的步伐迈进 21 世纪以后，已经为人类接受和依赖的平面地图或二维地理空间信息在面对现代复杂的客观现象和层出不穷的人类杰作时渐显捉襟见肘之窘态。在立体化纵深发展的现代城市中，既有地上鳞次栉比的高楼大厦，又有地下密如蛛网的管线；在矿区开采过程中，犬牙交错的巷道；在地质勘查活动中，通过有限钻空抽样模型化整个地质构造情况等，这些“上天入地下海”的现代人类活动，迫切需要三维地理空间支撑，以实现立体表达、精细管理和科学决策之目标。

计算机技术、虚拟技术、数据库技术、可视化技术、海量存储技术以及认知科学等技术的发展，为现实世界三维数字化表达和重建奠定了理论技术基础。近年来，机载、车载和固定站式激光扫描技术，以及无人驾驶飞行器结合单片立体量测技术的出现，使三维空间数据获取难的瓶颈基本得以突破，规模化作业模式形成在即。三维实体抽象、空间关系描述、模型化、数据组织、可视化和应用等理论与技术研究逐渐深入并达到实用化程度，国内外渐次出现了 Vega(美国)、Skyline(美国)、Virtools(法国)、NewMap(中国)、VRmap(中国)等一批三维地理信息管理或可用于三维地理信息管理的软件系统。纵观三维领域制约发展的技术问题，应当说从三维数据获取处理、表达、管理，直到应用的整套流程关键技术点基本得以突破。

在需求牵引和技术进步双重动力驱使下，数字三维无疑将进入高速发展和广泛应用期，必将拉动整个测绘产业队伍走向三维地理空间信息采集、处理和数据库建设，以及基于三维地理空间信息的应用与服务。这一切昭示着数字三维时代的来临！

1.2 国内外相关技术现状

数字城市三维地理信息系统的研究正在世界范围内蓬勃兴起，新理论、新方法、新技术层出不穷，推动地理信息产业不断向前发展。以下主要从城市三维空间数据获取技术、城市三维建模技术、三维可视化技术、虚拟现实技术、三维 GIS 软件系统等几方面综述分析当前的技术发展现状。

1.2.1 城市三维数据获取技术

由于理论和技术水平的限制,三维空间数据的获取能力相对较弱一直是阻碍三维地理信息系统发展的重要原因。一旦能够实现三维空间数据方便、快捷、廉价的获取,三维地理信息系统将会取得迅猛的发展。下文总结目前常用的几种城市三维数据获取方法,并简要分析各种方式的优缺点及适用范围。

1. 地形图+建筑设计图纸

由于城市景观以人文建筑物为主,而大部分建筑物体的平面坐标可以由现有纸质或数字化的二维平面地形图得到,建筑物的高度和形状信息可从设计图纸中获取,两者结合即可获得建筑物的三维数据。这种方法实现技术简单,且获取的建筑物高度信息具有较高的精度,但由于需要进行专业建筑图纸人工判读,对操作人员素质要求较高,同时还要手工输入大量数据并进行实地纹理采集,工作量非常大。而且由于建筑设计图纸属于保密资料或内部资料,获取相对困难。因此只适合城市小范围地区及少数建筑物的三维数据获取。

2. 数字摄影测量

摄影测量的发展经历了模拟摄影测量阶段和解析摄影测量阶段,现已进入数字摄影测量阶段。数字摄影测量是基于数字影像与摄影测量的基本原理,应用计算机技术、数字影像处理、影像匹配、模式识别等多学科的理论和方法,提取所摄对象用数字方式表达的几何与物理信息的摄影测量学的分支学科。

数字摄影测量系统是摄影测量技术发展的结晶,它是三维空间数据获取的一种重要途径。在20世纪60年代,第一台解析测图仪AP-1问世不久,美国的全数字化测图系统DAMC就有了初步的实验结果。武汉大学(原武汉测绘科技大学)王之卓教授于1978年提出了发展全数字自动化测图系统的设想与方案,并于1985年完成了全数字自动化测图软件系统WUDAMS,并采用数字方式实现摄影测量自动化。至1988年日本京都国际摄影测量与遥感协会第16届大会上展示出DSP-1型为代表的数字摄影测量工作站,基本上都是属于体现数字摄影测量工作站概念的试验系统。到1992年8月在美国华盛顿第17届国际摄影测量与遥感大会上,有了较为成熟的产品。武汉大学张祖勋教授所领导的研究团队在王之卓院士20世纪70年代末提出全数字化自动测图思想的基础上,突破了立体影像匹配构建计算机视觉的理论难关,创造了VirtuoZo摄影测量工作站;中国测绘科学研究院刘先林院士于1999年主持研制成功了JX4数字摄影测量工作站,这两种系统都能实现数字地面高程模型(DEM)自动采集、自动微分纠正,制作数字正射影像(DOM),利用X、Y手轮、脚轮,进行人工立体数字线化测图以及获取数字栅格地图(DRG)。它们为三维数据的获取提供了一种较为便捷的实现方法。目前,航空摄影测量和遥感技术可以提供目标的几何特征、语义特征,从而获取三维数据信息。它作为最为完善的技术体系在国内外得到广泛的应用。但是,由其立体像对成像和

解算的机理决定了它在数码城市建筑物三维信息和纹理信息提取的缺陷,即它获取的主要是建筑物顶面的信息,漏掉了建筑物立面的大量几何和纹理信息。同时,摄影测量数据在建筑物密集区会有遮掩,不能有效提供建筑物立面纹理信息,需配合地面摄影。

随着美国 1m 分辨率 IKONOS 以及 0.68m 分辨率 QuickBird 卫星的升空,航天卫星遥感已发展到高分辨率、高精度、多光谱、低费用的时代。极高分辨率的航天遥感影像能提供丰富的城市景观信息,包括几何、纹理、拓扑、语义等多种类型,正日益成为数字正射影像和数字高程模型生产的主要数据源。卫星遥感影像不仅具有很高的空间分辨率,而且具备高时间分辨率的特点,即可在短期内重复获得同一地区的影像;在城市飞速发展的今天,这对保证获取数据的现势性具有重大意义。随着卫星影像价格的不断下降和分辨率的进一步提高,航天遥感影像将会是未来城市三维信息获取的主要源泉之一。

3. 激光雷达系统

当将一束特定的光线投射到物体表面时,在与投射方向不同的方向观察,这一束投射到物体表面的特定光线就会受物体表面形状的调制产生形变,通过一定的算法分析这种形变,就可以得到物体的调制信息,即三维形貌,激光扫描仪应用该原理获取扫描对象的三维信息,其工作流程如图 1.1 所示。

激光雷达系统简称为 LIDAR,该技术可以实现空间三维坐标的同步、快速、精确的获取,并根据实时摄影的数码像片,通过计算机重构来实现大型实体或场景目标的 3D 数据模型,再现客观事物的真实形态。根据载体的不同,LIDAR 主要分地面三维激光扫描技术和机载激光雷达扫描技术两大类。地面三维激光扫描系统的空间载体是地面,类似于传统的地面近景摄影测量,它将激光扫描仪直接与数码

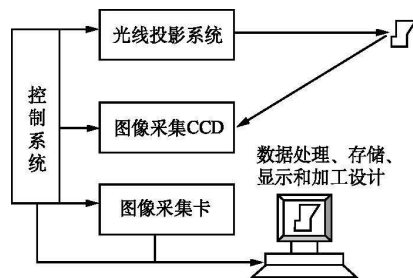


图 1.1 激光扫描仪的工作原理

相机、GPS 相结合,对目标物进行扫描成像,获取激光反射回波数据和目标表面影像,并在软件支持下构建三维数字模型和纹理的精确贴加,从而达到目标物快速、有效、精确的三维立体建模。地面三维激光扫描系统不但可以安置在固定设备上,也可以装载在运动的汽车上,进行连续的三维场景和目标形态的空间数据采集。机载激光雷达系统是一款高速度、高性能、长距离的航空测量设备,该系统由激光测高仪、GPS 定位装置、IMU(惯性制导仪)以及高分辨率数码照相机组成,实现对目标物的同步测量。测量数据通过特定方程解算处理,生成高密度的三维激光点云数值,为地形信息的提取提供精确的数据源。利用机载 LIDAR 系统进行测高作业,根据不同的航高,其平面精度可以达到 0.15~1m,高程精度可达到 10~30cm。

与普通光波相比,激光具有方向性好、单色性好、相干性好等特点,不易受大气环境和太阳光线的影响。使用激光进行距离量测可大大提高数据采集的可靠性和抗干扰能力。当来自激光器的激光射到一个物体的表面时,只要不存在方向反射(包括镜面反

射)，总有一部分光会反射回去，成为回波信号，被系统接收器所接收，当仪器计算出光由激光器射出到返回到接收器的时间为 $2t$ 后，那么激光器到反射物体的距离 $(d) = \text{光速}(c) \times \text{时间}(t) / 2$ 。在 LIDAR 系统中，结合 GPS 得到的激光器位置坐标信息，INS 得到的激光方向信息，就可以准确地计算出每一个激光点的大地坐标 (X, Y, Z) ，大量的激光点聚集成激光点云，组成点云图像。

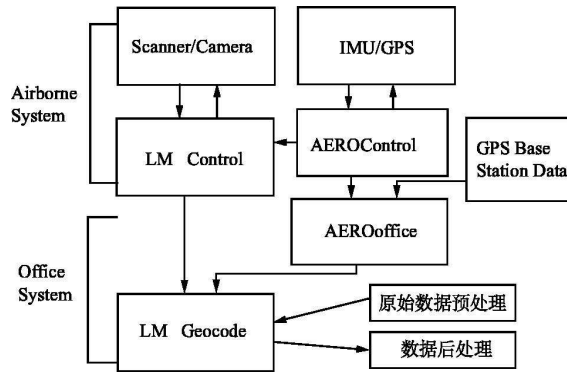


图 1.2 LIDAR 信息获取系统

用 LIDAR 系统来精确确定地面上目标点的高度，始于 20 世纪 70 年代后期。当时的系统一般称为 APR (Airborne Profile Recorder)，主要用于辅助空中三角测量。最初的系统是仿型设备，仅能获得在飞行器路径正下方的地面目标数据。这些最初的激光地形测量系统很复杂，并且不适合于获取大范围地面目标的三维数据。到 20 世纪 90 年代，经过大量研究试验，激光扫描技术开始得到普及和大规模使用。至 2004 年全球已经有超过 30 类不同型号的激光扫描系统投放市场。随着 DGPS 技术、数据传输技术、计算机技术和图形图像处理技术的发展，现代激光扫描系统已经在许多领域得到了普遍使用。

利用 LIDAR 技术可实现 DEM 和 DOM 的快速生成，LIDAR 最主要的数据产品是高密度、高精度的激光点云数据，该数据直接反映点位的三维坐标。通过自动或人工交互处理，把入射到植被、房屋、建筑物等非地形目标上的点云进行分类、滤波或去除，然后构建不规则三角网 TIN，就可以快速提取 DEM。由于激光点密度大、数目多，使得生产高精度、高分辨率的 DEM 也成为可能，它是解决快速进行 DEM 数据采集的最有效方法。另外，LIDAR 数据也可以辅助进行 DOM、DLG 数字产品的生产。

LIDAR 应用的另一重要领域是精密工程测量。很多精密工程测量都需要采集测量目标的高精度三维坐标信息，甚至需要建立精确的三维物体模型，如电力选线、矿山和隧道测量、水文测量、沉降测量、建筑测量、变形测量、文物考古等行业。地面和机载 LIDAR 就是解决这种实际问题的有效手段。通过数码像片获取的纹理信息与构筑物模型进行叠加构建三维模型，是进行景观分析、规划决策、形变量测、物体保护的重要依据。如 LIDAR 技术为公路、铁路设计提供高精度的地面高程模型 DEM，以方便线路设计和施工土方量的精确计算。在进行电力线路设计时，通过 LIDAR 的成果数据可以

了解整个线路设计区域内的地形和地物要素情况。在树木密集处，可以估算出需要砍伐树木的面积和木材量。在进行电力线抢修和维护时，根据电力线路上的 LIDAR 数据点和相应的地面裸露点的高程可以测算出任意一处线路距离地面的高度，从而便于抢修和维护。

虽然利用激光雷达系统可以获取高精度的三维数据，但由于其价格昂贵，在短期内尚难以实现大范围普及使用。同时激光扫描获取的一般为密集的点状数据，后处理工作非常复杂。另外在数字城市应用中，由于某些物体表面没有漫反射（如窗户和金属结构部分），会在扫描时被漏掉，须同时配备近景摄影协同进行。

4. 机载三维成像仪

机载三维成像仪从空中同步获取地面目标的三维位置和遥感光谱信息，实现定位、定性数据的一体化获取。它与机载激光扫描系统具有明显的区别，它在硬件上共用一套主光学系统来实现图像数据和激光测距数据的同步采集，信息获取效率要高于激光扫描系统。中国科学院遥感应用研究所对机载三维成像仪进行了深入研究，进行了飞行试验。

机载三维成像仪由 GPS 接收机、姿态测量装置、扫描激光测距仪、扫描成像仪四个主要部分构成。GPS 能得到三维成像仪在空中的精确三维位置；姿态测量装置能测出三维成像仪在空中的姿态参数；扫描激光测距仪可以精确测定三维成像仪到地面点的距离，根据几何原理就可以计算激光点的三维位置。同时扫描成像仪同步获取地面的遥感图像，扫描成像仪和扫描激光测距仪在硬件上共用一套扫描光学系统而组成扫描激光测距-成像组合传感器(AL-Hi)，从而保证地面的激光测距点和图像上的像元点严格匹配。

系统的原理如图 1.3 所示。在事后处理中，这些具有三维位置的激光像元点作为“控制点”来精确纠正所获得的遥感图像，从而快速获取正射影像。此外这些激光测距点也可以作为“种子点”来求出 DTM。和常规的遥感器以及国外的机载激光系统相

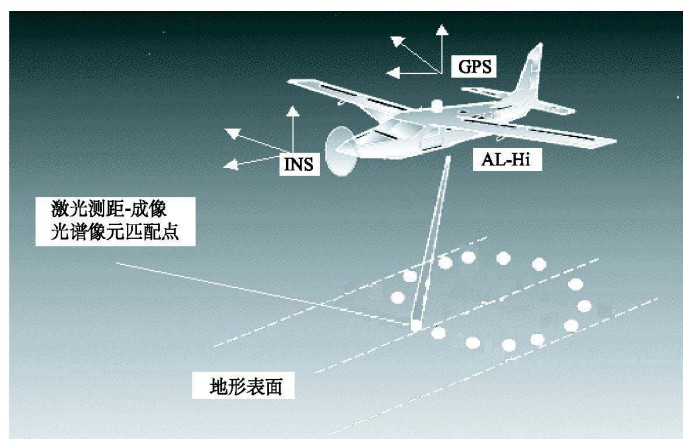


图 1.3 机载三维成像仪的原理

比, 机载三维成像仪具有如下特点: DEM 和遥感图像的准确匹配并同步获取, 通过在硬件上共用一套主光学系统, 实现图像数据和激光测距数据的同步采集; 获取的原始数据只要软件处理就可以生成 DEM 和地学编码图像等三维数据产品, 无须地面控制, 效率较高; 视距测量原理的实现, 应用 GPS、INS、SLR 直接按几何原理测得地面的三维位置; 既是位置测量系统, 又是遥感系统, 利用它可以得到地面的三维位置, 又得到图像, 可以生成 DEM 和地学编码图像。

在机载三维成像仪获取的数据中, 激光测距数据和图像数据是在空间位置上严格同步获取的, 但由于激光器的能量和重复频率有限, 因此不能在获取每个像元图像时都进行激光测距, 而是每隔固定数量的像元来获取一个激光测距值。根据飞行速度的不同, 扫描的速率一般为每秒扫描 20~40 行。由于姿态测量装置采集姿态数据的反应速率等原因, 一般也只是在每个扫描行图像的中间像元(称机下点)时才发送信号给姿态测量装置来采集当时的姿态参数。GPS 数据和姿态、激光测距数据的同步是通过时间进行的, 即控制单元向 GPS 发送一个同步信号, 并在原始数据中存储该同步信号的序列号, GPS 接收到该同步信号后, 存储该同步信号的精确时间(精确到 100ns)和序列号。

5. 近景摄影测量

在摄影测量中“近景”一般指在 100m 以内的摄影距离。其方法是通过从不同方向拍摄的、具有一定重叠度的、同一地物的多幅影像, 恢复摄影物体的三维模型。在近景摄影测量中相对于控制点的绝对定向并不起主要的作用, 最重要的是测求物体表面上点间的相对位置, 以所需要的精度确定其大小、形状和体积。近景摄影测量具有较高的精度, 一般采用交向摄影, 由不同的角度和方向摄取地物的多幅影像实现整个物体表面的立体覆盖。

近景摄影测量包括近景摄影和图像处理两个过程。近景摄影一般使用量测摄影机, 它是框标、内方位元素已知并且物镜畸变小的专用仪器, 有的还备有外部定向、同步摄影、连续摄影等设备。也可以使用非量测摄影机, 如电影摄影机、高速摄影机、全息摄影机、显微摄影机、数字摄影机、X 射线摄影机等。图像处理同通常的摄影测量类似, 分为模拟法和解析法, 可以获得平面图、立体图、断面图、透视图、等值线图以及包括物点坐标在内的多种物理参数。近景摄影测量在经济建设、国防建设和科学研究中有广泛的用途, 特别适用于重要工程的变形和自动生产线的监测, 弹体运动轨迹、炮口冲击波等不可接触物体的量测等。

由于近景摄影测量的高精度需要以大量物点的观测为前提, 在空中三角测量时, 一般每个模型只观测 6 个点; 而在近景摄影测量中常常需要观测几百个点。因此近景摄影测量一般应用于单个地物的三维数据获取, 尤其是复杂地物特征。古迹维护、数字遗产构建是目前近景摄影测量在三维建模领域应用的重要方向。

6. 车载移动测绘系统

车载移动测绘系统是一个基于多传感器与多技术集成的综合系统。传感器按作用可分为绝对定位传感器、相对定位传感器和属性采集传感器, 其中绝对定位传感器包括依

赖于外部环境的外部定位传感器(GPS、无线电导航、罗兰-C等)和自包含内部定位传感器(INS、DR、陀螺仪、加速计、罗盘等);相对定位传感器包括被动成像传感器(视频摄像机、数字摄像机等)和主动成像传感器(激光测距仪、雷达等);属性采集传感器包括被动成像传感器(视频/数字摄像机、多光谱扫描仪等)和主动成像传感器(激光测距仪、激光扫描仪等)。目前已有学者研究出实验系统。武汉大学的李德仁院士建立了一套以GPS、电子罗盘和车轮计数进行定位,以双CCD摄像机和激光测距仪实现地物测绘,以视频录像和数字录音完成属性采集的车载测绘系统,可用于车辆导航、公路及铁路等道路网测绘、建筑物测绘、机动交通监测等多种领域,其量测流程如图1.4所示(李德仁,2001)。

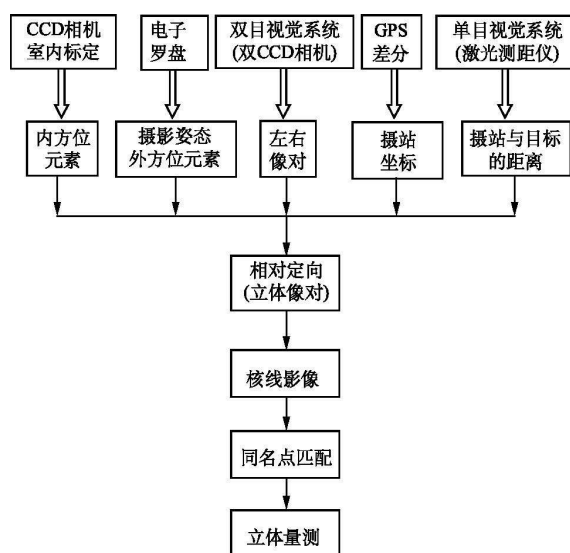


图 1.4 移动测绘系统量测流程(李德仁,2001)

1.2.2 城市景观三维建模技术

随着计算机硬件性能的提高、图像压缩处理技术和三维图形渲染技术的进步,国内外出现了越来越多的三维可视化和应用环境。综合分析它们所采用的景观建模方式,主要有以下几种。

1. 三维建模工具

即应用某种商用三维建模软件,依据所采集或设计的地物的三维信息,逐个制作完成后组合起来形成整体景观。此类软件如3DMAX,该软件功能强大,操作简单,支持多种模型的转入转出,应用十分普遍。使用建模工具生成的三维地物模型外观精细,造型细腻,就美观程度而言远高于其他方式,非常适合于单栋或少数建筑物的三维重

建。但是在区域范围扩大时，建筑物数量急剧增多，逐栋建模的工作量将会很大，同时将其定位到地表的难度也会增加。因此，此方式只适用于小范围区域，尤其多应用在建筑设计中查看效果图。图 1.5 为根据照片精细建模的三维建筑物模型。

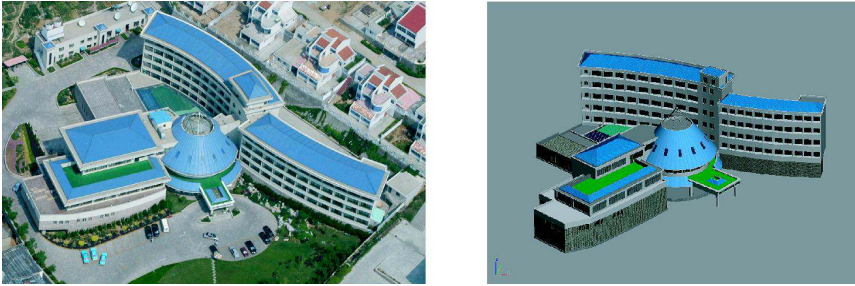
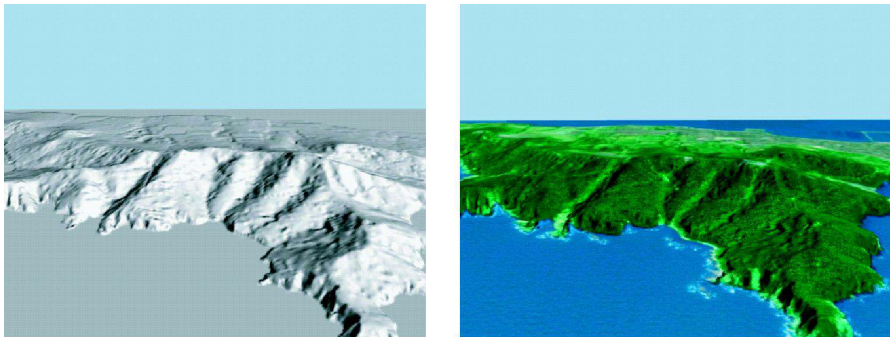


图 1.5 建筑物照片与精细三维模型

2. 数字地形叠加航空航天遥感影像

这种方法通过将数字高程模型(DEM)和作为纹理的航空航天影像叠加来生成三维景观。如 Lothar Koppers 使用 VRML 语言将空中影像叠加到高程格网上，实现了可以随意漫游的三维景观；Tsuyshi Honjio 借助 CAD 系统，不仅将影像纹理叠加到 DEM 上，而且还添加了植被模型和建筑物模型以及雾化效果，生成了十分逼真的地形景观模型。这种方式目前多用于地形显示领域，用于城市三维地理信息系统构建时由于纹理分辨率较低和不够精细而显得缺乏真实感；所生成的景观模型只是具有浏览的功能，在模型上不能进行 GIS 分析；而且也不能对单个的空间对象进行编辑、查询等操作。图 1.6 中(a)和(b)分别表示了数字高程模型上叠加遥感影像前后的示例。



(a) DEM的三维表达

(b) DEM叠加DOM的三维表达

图 1.6 数字地形叠加航空航天遥感影像的三维建模

3. 基于二维 GIS 数据库的三维扩展

经过多年的积累,目前各城市二维 GIS 的数据相对充分,在这些数据的基础上进行必要的三维扩展是建立三维城市景观的一种重要途径。虽然二维 GIS 数据库中没有存储建筑物的高程信息,但在其属性中保存了层数信息,因此可以通过使用假定的层高(例如住宅楼每层 3m、商业楼每层 3.5m 等)和模拟的纹理来构建三维建筑物对象,即在二维 GIS 基础上另外添加一些信息(如房屋高度、墙面纹理、规则屋顶等)来构建三维城市景观。这种方法在利用二维 GIS 现有数据的同时,也利用了二维 GIS 的部分功能(数据管理、查询检索等),而且还减少了数据采集的工作量,所建立的模型信息量少,操作速度快。但是这种方法仅适于表达相对规则的建筑物,难以重现复杂地物实体,例如底部与顶部形状不同的房屋、具有特殊形状特征的高楼等;而且由于均为按照统一的层高设置,精度较低;同时由于缺乏真实纹理和高程数据,景观的真实感不强。

4. 真三维空间数据模型

随着三维数据获取技术的发展,人们能够较容易地实现大面积的精细城市三维信息的获取,这些信息包括形状、高度、纹理、模型等,从而也迫切需要一个真三维的空间数据模型来高效的组织管理这些信息。针对三维空间数据模型,国内外都有专家、学者进行了大量的研究与探索,取得了一定成果,从不同的应用和描述角度建立了多种三维空间数据模型。它们基本可分为三类:基于矢量结构的、基于栅格结构的和混合结构的,但是由于现实世界的复杂性决定了用以描述现实世界的三维空间数据的庞大和复杂,目前仍没有建立一种可以适用于大多数领域的、并且易于计算机实现的三维空间数据模型。

上述几种方法侧重点各有不同,在数据采集、精细程度、空间分析等方面也存在差异,可适用于不同应用需求的系统建设。但从三维 GIS 发展的角度看,真三维空间数据模型既能满足高精度、高仿真性的要求,又便于各类专题属性信息的加载,同时有利于实现多种复杂的查询与分析操作,将成为今后三维城市景观构建的主要方式。

1.2.3 三维可视化技术

可视化是将不可见的事物转化为可见图像的过程。三维可视化就是将最终的图像以三维的方式显示出来。“三维”是一个数学概念,它表示我们生活的空间可以用三个数来描述,假设存在一个直角坐标系的话,那么用 X , Y , Z 坐标就能确定任意点的位置。

三维可视化是三维地理信息系统的一项基本功能。在建立、维护和使用三维 GIS 系统的各个阶段,不论三维对象的输入、编辑、存储、管理,还是对它们进行操作分析或是输出结果,都存在三维对象的可视表达问题。为了将客观世界尽量真实地再现,三维可视化需遵守五条基本原则,即代表性(representative)、精确性(accurate)、可信度(belief)、清晰度(clear)和无偏见性(broad-gauge)(Sheppard, 1989);在此基础上,邱茂林提出了抽象性、代表性、真实性、正确性、时间性的原则(邱茂林, 2001)。

目前三维可视化技术主要包括计算机透视图法、计算机影像编修法、计算机绘图及3D模型、计算机模型及影像合成、录像仿真法与虚拟现实等,这几种可视化方法的优缺点总结比较如表1.1。

表 1.1 可视化方法比较(邱茂林, 2001)

可视化方法	拟真性	操作性	时效性	适用性	工具设备
计算机透视图法	差	尚可	好	尚可	差
计算机影像编修法	尚可	好	尚可	好	尚可
计算机绘图及3D模型	尚可	尚可	尚可	差	尚可
计算机模型及影像合成	好	尚可	尚可	好	好
录像仿真法	好	差	尚可	差	好
虚拟现实	尚可	差	尚可	差	差

三维数据采集技术的飞速发展为精确描述几何对象提供了海量数据,如何实现这些海量数据的裁剪截取、快速显示、实时漫游等仍有待解决。人们往往认为,可以利用高档计算机来处理、存储复杂的模型,如使用计算速度快、存储容量大、图形功能强的图形工作站等。虽然这是有效的方法,但不能完全解决问题。首先,随着应用需求的发展,模型复杂程度的增长几乎是无限的。机器的性能提高了,模型的复杂程度也在增加。其次,高档计算机需要大量的投资,非一般用户所能承受。特别是虚拟现实技术及交互式可视化的出现,对复杂模型的实时动态显示提出了更为迫切的要求。因此,在利用性能比较高的计算机的同时,人们提出了多种技术和算法,力求更有效率地解决复杂模型的处理、存储、传输和绘制问题。其中,复杂模型的简化和多分辨率表示是最有效的方法之一。

计算机图形学中的模型一般是由多面体表示的。模型简化指的是采用适当的算法减少该模型的面片数、边数和顶点数。模型的多分辨率表示则是指对于同一模型,存在着由简到繁、由粗到精的几种表示。模型的面片数减少以后,其表示精度必然下降。但是,在多种情况下,对应用并无影响。例如,当模型距图像平面很远时,其在图像平面上的投影必然很小,只有几个像素。那么,无论模型精确到何种程度,其细节都不可能在屏幕上显示出来。因此,用简化的、比较粗糙的模型表示就可以了,这样大大减少了存储容量、提高计算速度。当一个模型存在着多种分辨率表示时,可以根据不同要求选用不同分辨率的模型。具体地说,应根据模型在屏幕上覆盖像素的多少选择相应的层次。对近物体作绘制时,使用较精细的模型,对远物体则使用较粗糙的模型。其目的就是在保证对原模型的图像有良好的形状逼近的前提下,尽量减少用于表示该模型的多边形数目。

现有的模型简化方法可以按不同方式分为多种类型:

1. 保持拓扑结构和不保持拓扑结构

现有的大多数模型简化方法具有保持拓扑结构不变的性质,如 H. Hoppe 提出的渐

近网格(PM)法, A. D. Kalvin 等人提出的超面方法等。J. Rossignac 等人提出的不保持拓扑结构的模型简化方法也具有较实用的价值。

2. 逐步求精和几何简化

逐步求精方法从对原模型的最粗略的近似开始, 不断地加入一些原模型上被认为是重要特征的顶点, 并重新进行局部三角化, 直到近似模型达到用户满意的精度为止。

几何简化方法则与之相反。其基本过程是: 从原始的复杂模型开始, 利用几何方法将可以被认为是共面的三角形面片合并形成一个更大的面, 删去内部点, 使得模型的顶点数减少。同时, 将被合并的面的边界上被认为共线的点删去, 从而进一步减少点数。几何简化法可以根据被删除的基本单元不同, 分为点删除、边删除和三角形删除等方法。

3. 误差受限和不受限

构成模型的多边形或三角形面片数减少以后, 简化模型的精度必然降低。如果对模型简化后相对于原始模型的误差给以限制, 则称为误差受限的模型简化方法, 如超面方法等。否则, 称为误差不受限的模型简化方法。在误差不受限的模型简化方法中, 按照一定的准则, 优先删除对模型的图像影响最小的点、边或三角形, 并可重复进行, 直到简化到用户所规定的三角面片数或一定的百分比为止。

4. 静态和动态

模型简化的静态方法是指在复杂模型的绘制前, 将其简化为几种不同分辨率的近似模型, 而在实时绘制时, 根据视点参数选择合适的分辨率的模型进行绘制。早期提出的模型简化方法大多属于这类。这种方法主要有两个缺点: 一是占用较多的内存资源。当模型的复杂程度很高时, 所需的内存本已较大, 多个不同分辨率的模型的存在更加重了内存的负担; 二是在绘制过程中, 当不同分辨率的模型之间进行切换时, 由于相邻两层模型之间的面片数差别较大, 因而会引起视觉上的跳跃感。

为了克服上述缺点, 动态方法越来越受到关注。其基本思想是在模型的绘制过程中, 实时地得到具有所需要的分辨率的近似模型。一般是通过简单的局部几何变换来实现边删除或边恢复操作, 从而生成具有连续的不同分辨率的近似模型。

5. 与观察方向无关和与观察方向有关

大多数的模型简化方法都侧重于根据模型的结构在物体空间进行模型简化, 所用到的来自图像空间的反馈信息很少, 只有模型与图像平面的距离大小以及图像在屏幕上的面积等, 模型的简化和使用是与观察方向无关的。与观察方向有关的简化方法可以满足观察者对感兴趣的部分进行细微观察, 允许实时地在同一模型的不同区域选择不同的精度层次, 而且使得不同区域的不同精度层次之间无缝连接。

作为模型简化的一种重要方法, LOD 技术(Level of Detail)在提高场景显示速度、实现实时交互方面应用广泛, 其原理就是对相同的景物制作出不同精细程度的版本, 当用户离景物近时, 显示精细版本; 离远时, 显示粗糙版本。LOD 模型改变了传统的

“图像质量越精细越好”的片面观点,依据视线的主方向、视线在景物表面的停留时间、景物离视点的远近以及景物在画面上投影区域的大小等因素来决定景物应选择的细节层次,已达到实时显示图形的目的。LOD 模型可分为三类:不连续的 LOD 模型、连续的 LOD 模型和几何结构自身的 LOD 模型。第一类存储原始模型的多个副本,分别对应特定的分辨率。此类模型的优点是运行速度快,但由于存储多个副本,须占用较多的存储空间,同时由于模型的不连续性,显示时会产生视觉上的跳动。第二类是在运行时根据需要采用特定算法实时生成对应某一分辨率的模型。此类模型可以保证视觉上的连续性,但在算法设计上通常比较复杂。第三类模型本身是多分辨率的结构,模型的不同部件之间通过结点相连,在实际操作过程中根据不同部件间结点判断该部件是否需要被操作。此类模型结构简单,操作方便,适于表达复杂的不连续对象。

LOD 模型的构造算法是目前人们研究的主要焦点,众多学者开展了广泛的研究工作。Schroeder 提出了基于顶点杀死的模型简化方法,该方法首先利用各顶点的局部几何和拓扑信息将其分类,然后根据不同顶点的评判标准决定该顶点是否可以删除;如果可以删除,则采用递归环分割法对删除顶点后留下的空洞进行三角剖分。J. Rossignac 提出一种多分辨率近似法自动生成物体的简化模型,首先分别给各顶点赋给一个权值,以物体特征变化大的点权值大为原则;再根据模型的复杂程度将物体所占空间划分为立方体单元,对同一单元中的顶点以各顶点的权值计算该单元的代表点;然后依据原模型中各多边形顶点的代表点是否为同一代表点合并多边形。A. D. Kalvin 提出了利用面片合并方法自动生成物体的简化模型,首先以原模型中的任一多边形作为种子面片;然后按一组合条件不断合并种子面片周围的面片,直到周围面片不再满足合并条件。H. Hoppe 提出采用能量函数最优化的网格简化方法,并提出了渐进网格的生成方法(Hoppe, 1993, 1996)。

1.2.4 虚拟现实技术

虚拟现实(Virtual Reality, 简称 VR)是指计算机中构造出一个形象逼真的模型,人与该模型可以进行交互操作,并产生与现实世界中相同的反馈信息,使人们得到与现实世界中同样的感受。当人们需要构造当前不存在的环境、人类不可能到达或为省时省力而不去到达的环境或构造虚拟现实以代替耗资巨大的身临实际环境时,虚拟现实技术是必不可缺的。

VR 思想的起源可追溯到 1965 年 Ivan Sutherland 在 IFIP 会议上的《终极的显示》报告,而 Virtual Reality 一词是美国 VRL 公司的创建人之一 Jaron Lanier 提出的。20 世纪 80 年代,美国国家航空航天局(NASA)及美国国防部组织了一系列有关虚拟现实的研究,并取得了令人瞩目的研究成果,从而引起了人们对 VR 技术的广泛关注。1984 年, NASA Ames 研究中心虚拟行星探测实验室开发了用于火星探测的虚拟环境视觉显示器,将火星发回的数据输入计算机,构造了火星表面的三维虚拟环境。

自 20 世纪 90 年代以来,国际上 VR 技术的研究得到了很大的发展,主要表现在:

(1) 使用基于图像的绘制技术(或与图形绘制技术相结合),以提高图形的生成速

度。典型的有美国三菱电信技术中心在 1998 年上半年推出的具有实时体绘制功能的微机及工作站系统等。

(2) 各种新的交互设备, 譬如双手输入技术、三维力反馈设备(图 1.7)。如美国麻省州 SensAble Technologies 公司研制开发的具有力反馈的三维交互设备 PHANTOM 及其配套的软件开发工具 GHOST, 其性能良好, 获得了用户好评。GHOST 是一个面向对象的由 C++ 编写的软件开发工具包, 用户使用它将力反馈交互设备集成到三维图形应用软件中, 它还提供了与 WindowsNT 和 SGIRIX 的接口; PHANTOM 系统是一个类似于小型机械手的装置, 对于三维虚拟模型或数据具有定位功能, 就如同二维鼠标对二维图像具有指示和定位功能一样。目前, 该系统的用户有美国的通用电器、迪斯尼、日本的丰田等公司以及美国、欧洲、亚洲的大学和研究所等。



图 1.7 头盔屏幕和数据手套

(3) 增强现实(Augmented Reality), 也称混合现实。它是通过计算机图形、图像处理技术实现实景(现实环境或用户影像)与虚景(计算机生成的虚拟环境或虚拟物体)的合成, 并使生成的虚拟环境与实际环境融为一体, 以构造具有真实感和沉浸感的虚拟环境。如美国哥伦比亚大学研制的增强现实系统——移动式旅游计算机, 当旅游者背着这种小型计算机在校园内漫游时, 走到一个地方, 面向某一方向的一个不知名的大楼时, 计算机就可以在头盔的显示镜上显示出楼名。此外, 还有中国国防科技大学开发的虚拟空间会议原型系统 VST-1(1999)、以色列 ORAD 公司研制的可以把相隔数公里的主持人合成在同一个虚拟环境的虚拟演播室系统等。

(4) 大范围(分布式)虚拟现实环境。在因特网或专用网环境下, 充分利用各地资源的优势, 协同开发虚拟现实的应用, 支持具有重大空间范围、更多用户和虚拟对象的协作环境。如美国军方为了降低训练坦克部队费用而建立的 SIMNET, 它是第一个大规模网络 VR 的实例, 可以调整近 1000 个全动态图像的模式器; 还有 MIT 电子研究实验室(MERL)研究的支持协作虚拟环境的 Spline 系统、瑞典计算机科学研究院的 DIVE(1993)、新加坡国立大学的 Bricknet(1994)、英国 Nottingham 大学的 AVIARY(1994)、中国北京航空航天大学集成的分布式虚拟环境 DVENET 等。

(5) 自然式(多通道)人机交互式技术。通过计算机视觉技术、图像处理技术以及计算机图形技术, 研究实现智能化的人机交互环境, 使用户能够不借助传感器等外设与虚拟环境以及其中的虚拟对象进行交互。自然方式的人机交互技术是构造和谐的多维虚拟

信息空间的基础。典型的系统有麻省理工学院媒体实验室(MIT Media Lab)开发的人体运动跟踪系统 Pfinder、日本 AIRMIC 实验室研究的视频对象运动跟踪系统 Virtual KA-BUKI Syetem、微软研究院开发的、具有行为识别功能的原型系统 Stare Master 等。

(6) 美国 Apple 公司的 QuickTime VR (QTVR) 是一种基于静态图像的、在微机平台上能够实现的初级虚拟现实技术。它的基本特点是能够实现对一个物体或空间进行 360° 全景观察, 比如利用它来创建虚拟场景, 我们可以在一个大厅里环绕四周, 以任意一个角度观察这个空间, 也可以围绕某一个物体, 在 360° 的范围观察它; 还有如 IBM 公司 PanoramIX、Infinite Pictures 公司的 Smooth Move、Real Space 公司的 RealVR™ 等, 这些产品都是采用图像镶嵌技术实现的网络虚拟现实系统。

(7) 英国航空公司正在利用 VR 技术设计高级战斗机座舱, 他们开发的大项目 VECTA (Virtual Environment Configurable Training Aid) 是一个高级测试平台, 用于研究 VR 技术以及考察用 VR 替代传统模拟器方法的潜力。VECTA 的子项目 RAVE (Real and Virtual Environment) 就是专门为在座舱内训练飞行员而研制的, 已在 1992 年的 Farnborough 航空展示会上进行了首次演示。美国国家航空航天局(NASA)建立了航空、卫星维护 VR 训练系统、空间站 VR 训练系统, 旨在对工作人员进行培训。NASA 还对仿真技术进行了研究, 包括空间站操纵的仿真, 以及哈勃太空望远镜的仿真。另外, NASA 的“虚拟行星探索”试验能使“虚拟探索者”利用虚拟环境来考察遥远的行星, 第一个目标将是火星。图 1.8 是 NASA 的虚拟飞机发射场。美国奋进号航天飞机将对地球表面进行一次三维测绘, 任务是建立地球表面的三维空间模型, 其测绘面积覆盖包括地球表面大约 70% 以上区域, 这是构建全球宏观虚拟现实的一项大规模行动。



图 1.8 虚拟航天飞机发射场

(8) 虚拟现实与医疗技术的结合产生了许多引人注目的成果。虚拟手术是最典型的例子, 医生在远程通过虚拟现实技术观察病人的身体, 医生进行手术的动作通过通信技

术传输到病人的位置，由一个机械手真正实施手术。Loma Linda 大学医学中心是一所经常从事高难度或有争议课题的医学研究单位。David Warner 博士和他的研究小组成功地将计算机图形及 VR 设备用于探讨与神经疾病相关的课题。他们以数据手套为工具，将手的运动实时地在计算机上用图形表示出来；他们还成功地将 VR 技术应用于受虐待儿童的心理康复，并首创了 VR 儿科治疗法。图 1.9 是利用虚拟现实技术进行远程手术。

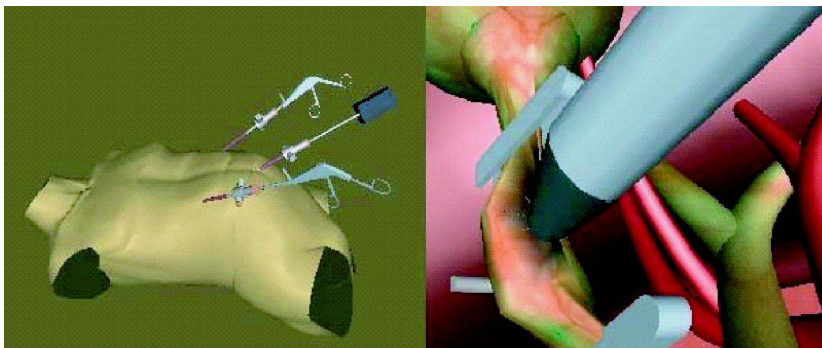


图 1.9 虚拟手术

VR 技术是一项投资大、难度高的科技领域，和一些发达国家相比，我国还有一定的差距，但已引起政府有关部门和科学家们的高度重视。根据我国的国情，制定了开展 VR 技术的研究计划，例如国家自然科学基金会、863 国家高技术研究发展计划等都将虚拟现实技术列入了研究项目。在紧跟国际新技术的同时，国内一些重点院校已经积极投入到了这一领域的研究工作中。

(1) 北京航空航天大学计算机系是国内最早进行 VR 研究、最有权威的单位之一，它们首先进行了一些基础知识方面的研究，并着重研究了虚拟环境中物体物理特性的表示与处理；在虚拟现实中的视觉接口方面开发出了部分硬件，并提出了有关算法及实现方法；实现了分布式虚拟环境网络设计，建立了网上虚拟现实研究论坛，可以提供实时三维动态数据库，提供虚拟现实演示环境，提供用于飞行员训练的虚拟现实系统，提供开发虚拟现实应用系统的开发平台，并实现与有关部门的远程连接。

(2) 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开发出了一套桌面虚拟建筑环境实时漫游系统，该系统采用了层面叠加的绘制技术和预消隐技术，实现了立体视觉，同时还提供了方便的交互工具，使整个系统的实时性和画面的真实感都达到了较高水平。另外还研制了在虚拟环境中一种新的快速漫游算法和一种递进网格的快速生成算法。

(3) 哈尔滨工业大学计算机系已经成功地虚拟出了人的高级行为中特定人脸图像的合成、表情的合成、唇动的合成，人说话时的头势和手势动作以及语音和语调的同步等技术问题。

(4) 清华大学计算机科学和技术系对虚拟现实和临场感的方面进行了研究，例如球面屏幕显示和图像随动、克服立体图闪烁的措施和深度感实验等方面都具有不少独特的

方法。他们还针对室内环境水平特征丰富的特点,提出借助图像变换,使立体视觉图像中对应水平特征呈现形状一致性,以利于实现特征匹配,并获取物体三维结构的新颖算法。

(5) 西安交通大学信息工程研究所对虚拟现实中的关键技术——立体显示技术进行了研究。他们在借鉴人类视觉特征的基础上提出了一种基于 JPEG 标准压缩编码新方案,并获得了较高的压缩比、信噪比以及解压速度。

(6) 中国科技开发院威海分院主要研究虚拟现实中的视觉接口技术,完成了虚拟现实中的体视图像算法及软件接口。在硬件开发上已经完成了 LCD 红外立体眼镜,并实现了商品化。

(7) 北方工业大学 CAD 研究中心是我国最早开展计算机动画研究的单位之一,中国第一部完全由动画技术制作的科教片《相似》就出自该中心。关于虚拟现实的研究已经完成了几个 863 项目,完成了体视动画的自动生成算法与合成软件处理,完成了 VR 图形处理与演示系统的多媒体平台及相关的音频资料库,制作了一些相关的体视动画光盘。

(8) 2001 年 11 月 11 日~13 日,由中国计算机学会、虚拟现实与可视化技术专业委员会主办,装甲兵工程学院和北京航空航天大学承办的第一届全国虚拟现实与可视化技术学术会议在北京举行,来自全国各地的 200 多名代表参加了本次会议。浙江大学校长潘云鹤院士向来宾演示了敦煌石窟虚拟漫游、西湖风景虚拟漫游、书法推理创作等实例;微软亚洲研究院院长张亚勤博士介绍了微软中国研究院过去两年来所做的研究,并做了语音合成童话配音、无线网络传输高质量音频、同心拼图兵马俑虚拟漫游、基于 Web 的 XBOX 等精彩演示。教育部副部长、北京航空航天大学赵沁平教授以“我们应该怎么做”为题,就虚拟现实构造、建模、聚合类实体、多通道感知信息的接合、虚拟现实与真实景物的融合、分布式虚拟现实、人机交互、虚拟现实系统性能和应用结果的评价等 8 个方面所需要进行的研究做了精辟阐述。国防科技大学李思昆教授介绍了国家 863 项目“分布式虚拟海战环境”的情况。第一届全国虚拟现实与可视化技术学术会议的召开,预示着我国虚拟现实技术研究已经进入稳步发展的阶段,具有里程碑意义。

当前的虚拟现实系统,基本都是计算机领域专家早期提出的虚拟现实基本思想的具体实现,如具有交互图形显示、力反馈设备以及声音提示等,这些研究成果已经在游戏机、影视创作和电话教学等领域获得大量应用。然而,向着广阔的工程应用领域的航向,则坚冰尚未突破,因此,尚不能在国民经济和国防安全中发挥重要作用。具体表现在:

(1) 没有立体视觉。目前在游戏机和影视中大量使用的所谓三维显示,从理论上讲它是三维景物经透视投影变换的二维图形,并非是人类需要双眼才能看清的立体视觉。以二维替代三维,在许多情况可获得简化而实用的效果。但它所存在的不确定性,有如“怪坡”的假象,在工程实用中有时是不可容忍的。

(2) 没有时空精度保障。目前为止的虚拟现实理论描述中还缺少精确时空的内容,即缺少时空精度和景观不确定度的理论。由此指导的实践应用也都在无时空精度要求的

领域。如果按现有的技术，在虚拟环境中设计一项工程，放样到实地(或策划一次军事行动到实地执行)，将会有很大的误差，甚至失误。因此现有虚拟现实理论必须进行完善，以求达到能支持工程技术的科学水平。

1.2.5 三维 GIS 软件系统

为三维 GIS 巨大的应用潜力所牵引，众多科研机构、高等院校、商业公司积极投身于三维 GIS 的研究开发之中，目前已开发出了多种三维 GIS 软件，下文介绍一些具有代表性的软件系统。

1. NewMap 3DV

New Map 3DV 是中国测绘科学研究院地理信息系统研究所自主开发的三维地理信息系统。该系统采用国际流行的全组件开发模式，基于 OpenGL 和 VC 环境研制而成。除具有支持多种三维数据格式、放大、缩小、漫游、旋转、模型增删、场景管理、三维量测、通视分析、日照阴影分析、淹没分析等通用三维地理信息系统的功能外，还具有全关系型数据库管理、网络环境支持、二三维一体化集成、自动化建模、灵活的场景裁切、行为建模与活动推演等技术特点。图 1.10 是在 New Map 3DV 中显示的一个三维场景。窗口左侧为三维显示内容，右侧上部为二维显示部分，可集成二维矢量数据、影像数据等，右侧下部为分层、分专题设置的场景对象管理。

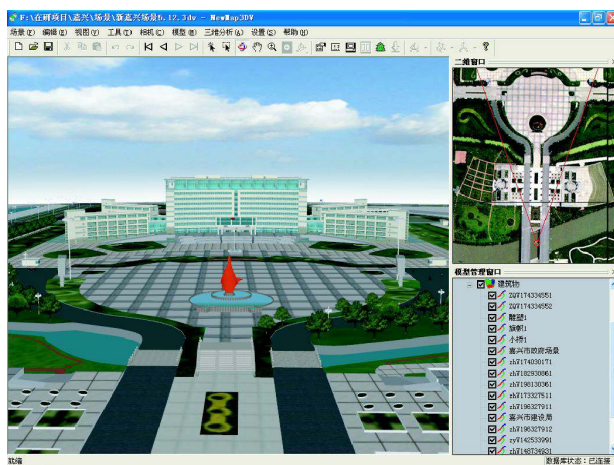


图 1.10 NewMap 3DV 三维地理信息系统

2. Imaging Virtual GIS

Imaging Virtual GIS 是 Erdas 公司开发的一个三维可视化分析工具，利用该工具用户可以在真实的虚拟环境中进行交互操作，能够同时查询三维地物表面的纹理属性和地

物的属性和几何信息。另外，该公司开发的 Stereo Analyst 软件能够使原来繁琐复杂的三维数据采集工作变得十分轻松，使用户能够在不生成 DEM 的情况下从多种影像数据源中获取二维和三维数据。此两者的结合可以使得大范围内三维场景模型的建立与可视化变得相对快捷和容易。

3. MultigenCreator

MultigenCreator 是美国 Multigen 公司开发的一套交互式三维造型软件，该软件系统能够对任意复杂的三维模型进行创建、编辑、纹理贴图、属性关联等，而且对于复杂的三维模型在交互操作时可以根据用户的需要自动生成不同精度的 LOD 模型。该软件的三维模型以 OpenFlight 格式存储，特别有利于三维模型的可视化操作，并且该系统可以和其他三维数据格式如 VRML、3DMAX 等相互转换。

4. CC-GIS (Cyber-City GIS)

CC-GIS 软件是瑞士 ETH Zurich 大学研制的一套基于摄影测量数据进行三维立体重建的软件，该软件使用一致性符号进行复杂建筑物屋顶的表面模型构造，使用基于 3DFDS 模型的 V3D 数据结构在关系数据库中管理三维模型。并且该软件实现了模型数据、影像数据和 DEM 数据的统一管理。

5. MGE

模块化地理信息系统(MGE)是一个兼有矢量和栅格数据结构以及矢量、栅格分析运算功能，及具有面向对象分析操作功能的地理信息系统。它由美国 Integraph 公司开发，建立在 CAD 软件平台 MicroStation 上，由 20 多个模块组成，MGE 可根据用户应用需要任意选择各种模块组合。用户可通过多种开发工具进行二次开发。MGE 的三维特性表现在地形建模上，它提供完善的三维建模生成工具、成熟的绘图计算、复杂表面的显示技术以及模型编辑工具，同时能够对三维空间信息进行处理、显示并生成等高线及坡度、坡向等信息。

6. IMAGIS

IMAGIS 是由武汉适普软件开发的基于 4D 的三维可视化地理信息系统，它不仅能够实现三维数据的可视化，而且为用户提供了强大的交互查询分析操作工具。IMAGIS 配有灵活的三维表面造型工具，混合使用不规则三角形网(TIN)和四边形网来生成三维表面，可以灵活逼真地建立复杂的三维几何模型，如地貌、地物等。IMAGIS 的空间查询与分析功能可以直接从三维模型上选择目标进行分析和查询，如表面积、周长、距离、体积、剖面等可以直接在透视图空间进行各种空间查询与决策分析。IMAGIS 的主要功能模块包括：数据交换模块、数据编辑模块、三维建模工具、三维可视化工具、三维视图动态操作、三维查询分析、网上数据发布、三维漫游工具和二次开发工具。

7. VRMap

VRMap 是由北京灵图软件技术有限公司开发的、一套完全基于 COM 的面向对象的组件库,可以将高性能的三维可视化技术集成到应用系统中。VRMap 的特色在于提供了对三维场景在空间上和逻辑上的管理,以及对海量数据的处理能力,它采用了金字塔三维数据引擎、基于皮肤的三维数据快速生成技术、高速渲染引擎以及镜面反射技术、凸凹映射技术、粒子系统技术等先进的可视化技术。VRMap 体系结构主要分为三个层面:数据层、核心层和应用层。数据层包含了数据访问的中间层以及各种数据源组件;核心层以金字塔数据引擎为核心,包含各种可视化组件、编辑组件、皮肤组件以及 VRMap2 渲染引擎;应用层包含 VRMap 平台、VRMap 控件以及 VRMap 插件集。

8. Cult3D

瑞典的 Cystore 公司开发了流式三维技术——Cult3D,目前 Cult3D 技术在全球信息网已经得到了广泛的运用。只需安装一个插件,就可以在网络浏览器上观看三维图形。Cult3D 的文件很小(大约 20~200k),三维表现效果却近乎完美,用户可以用旋转、放大、缩小等基本操作从各个角度观看三维模型。Cult3D 软件包括三个部分:Export pulgin、Designer 和 Viewer pulgin。Export pulgin 针对专业的三维建模软件(如 3DMAX、MAYA),安装了 Export pulgin 后,就可以在 3DMAX 或 MAYA 中建立三维模型,然后输出为 Cult3D 的 C3D 格式;Designer 是 Cult3D 最具特色的部分,在 Designer 中可以将三维模型加上旋转、缩放、移动等交互特性。由于 Cult3D 的内核是基于 Java 技术的,因此也能够利用 Java 来增强交互和扩展;Viewer pulgin 是针对 Web 浏览器(如 IE、Netscape)以及其他软件(如 Acrobat、Office)的插件,安装 Viewer pulgin 后就可以在这些软件中看到 Cult3D 模型。图 1.11 是一个 Cult3D 显示的三维场景。



图 1.11 Cult3D 显示的三维场景

9. Shockwave3D

Macromedia 公司的 Shockwave 技术在全球拥有 1.37 亿用户。2000 年 8 月在 SIG-GRAPH 大会上, Intel 和 Macromedia 联合声称将把 Intel 的网上三维图形技术带给 Macromedia Shockwave 播放器。现在 Macromedia Director Shockwave Studio 8.5 已经推出, 其中最重大的改变就是加入了 Shockwave3D 引擎。Intel 的 3D 技术具有以下特点: 支持骨骼变形系统, 支持次细分表面, 支持平滑表面, 支持卡通渲染模式, 纹理具有照片质量, 具有特殊效果如烟、火、水以及可根据客户机性能自动调节模型精度。鉴于 Intel 和 Macromedia 在业界的地位, Shockwave3D 自然得到了众多软硬件厂商的支持。Alias/Wavefront、Discreet、Softimage/Avid、Curious Labs 在他们的产品加入了输出 W3D 格式的能力。Havok 为 Shockwave3D 加入了实时的模拟真实物理环境和刚体特征, ATI、NVIDIA 也在其发布的显示芯片中提供对 Shockwave3D 硬件加速的支持。Shockwave3D 最大的特点是强大的交互能力。Director 为 Shockwave3D 加入了几百条控制 lingo。对于需要复杂交互的娱乐、游戏、教育领域, Shockwave3D 是最适合的技术。

10. 其他系统

其他还有 3DMAX、MicroStation Master Piece、GeoCAD、SiteBuild3D 等很多三维 GIS 软件, 虽然这些软件系统实现或部分实现了三维对象的显示、漫游、查询、分析等功能, 并且有的实现了网络化的三维信息应用, 但是由于三维 GIS 的理论和技术的远比二维 GIS 复杂, 对其研究还处于探索阶段, 很多实际问题有待解决, 诸如三维数据获取、三维空间数据模型、三维拓扑关系的描述和表达、三维海量数据的组织与管理、大场景的三维可视化、实用化的三维空间分析等。

1.2.6 问题分析

综合分析目前城市三维地理信息系统的研究现状, 虽然确实取得了明显的、重大的发展, 但在很多方面仍有大量问题亟待解决, 具体包括:

(1) 从现实世界的表达方面看, 二维抽象与表达的规范和方法已相对成熟(地图), 但如何在三维重建的环境下描述现实世界的相关规范却十分匮乏, 这也是阻碍三维 GIS 规范化发展、跨领域应用的关键障碍之一。

(2) 从三维数据获取方面看, 虽然现在已经有很多方法可以获得城市景观的三维信息, 但在快捷性、方便性上还不能完全满足要求, 大部分方法效率低下、难以满足工程化实施要求, 并且在精度上也无法保证。

(3) 从景观建模方面看, 现有数据模型的描述对象集中于地理实体, 没有从人的认知概念、从自然和社会语义的角度给城市景观以整体性的描述。

(4) 从三维可视化方面看, 在提高海量数据的漫游速度、提高场景的真实感和美感、景观数据库建立等方面仍有待进一步深入研究。

(5) 从学科发展的角度看, 三维 GIS 需要与相关学科密切联系, 尤其是与虚拟现实的结合, 即如何充分利用虚拟现实的研究成果, 将其吸收到三维 GIS 中, 从而促进自身的发展。

(6) 从系统应用的角度看, 虽然已出现了很多三维 GIS 系统, 但大都集中于三维显示, 缺乏空间分析功能, 没有做到实际应用的层次上来, 缺乏对决策层的紧密联系和足够支持。

1.3 本书主要内容与组织安排

全书共包括国内外技术现状、三维抽象与表达、三维信息获取、三维空间数据模型、三维信息组织与管理、三维可视化、三维空间查询与分析、三维地理信息系统实践与应用等内容, 根据性质, 上述内容分为九章:

第一章: 绪言, 提出了数字三维时代的到来, 分析国内外技术现状和问题。

第二章: 城市景观三维抽象与表达, 对城市现象的描述表达有语言、文字、地图等多种方式和手段。本章就如何实现城市景观的三维抽象与表达提出了三维信息传输模型、三维表达要素体系、三维模型库等理论和方法。

第三章: 城市三维信息获取, 针对目前三维空间数据的获取难题, 研究实现了一种适宜于工程化实施、大范围作业的城市三维数据获取集成技术体系。

第四章: 三维空间数据模型, 面向城市景观建模, 在分析现实世界三维表达的模型化过程和目前三维空间数据模型的研究进展的前提下, 提出了一种面向实体的三维空间数据模型(Entity-oriented 3D Model, EO3DM); 同时针对城市地形数据的组织管理, 探讨了相应的三维地形模型。

第五章: 三维信息组织与管理, 在对三维空间数据管理的几种可行模式进行比较的前提下, 分别针对城市三维模型中的特征地物、数字地形和影像探讨了数据库的管理方式。

第六章: 城市景观三维可视化, 首先分析了三维模型的可视化原理及常用的一些三维渲染软件工具; 然后探讨了海量数据三维可视化关键技术, 并实现了城市特征地物的重建及地物模型和地形模型的集成, 探讨了城市景观三维可视化中的若干优化策略。

第七章: 三维空间查询与分析, 将三维空间查询分析分为空间查询、空间量测、三维场景编辑、三维地形分析、通视分析、叠置分析、缓冲区分析、日照阴影分析、洪水淹没分析以及某些专题指标的统计分析等类, 并实现了具体算法。

第八章: 实践与应用, 开发实现了具有自主知识产权的城市三维地理信息系统, 以及该系统在城市规划、突发事件应急中的应用。

第九章: 总结与展望, 总结本书的成果, 展望下一步的工作。

第二章 城市景观三维抽象与表达

人类自诞生以来,就从没有停止过对所生存的客观环境的认识与理解,以期提高自身的应对能力,适应客观世界的变化。而完备的现实世界的描述与表达方法,是在尽可能大的范围内传播人类的认识成果,提高人类整体认知水平的必要技术。在人类发展的不同时期,囿于当时的科学技术水平,存在着不同的描述与表达方法。在文字出现之前,语言作为人类相互交流的基本工具,是描述现实世界的主要手段。利用语言很大程度上局限于人的记忆力和口头表达力,不可避免地造成大量信息的丢失,而且也缺乏直观性,不能记载,难以形成既有知识的传递与继承。文字的出现是人类文明发展史上的里程碑,它为科学的表述提供了一种新的手段。与前相比,使用文字获取的认知相对详细、准确,但却往往是细部的、零散的,对于总结提炼客观地理世界发展变化过程中所孕育的规律性知识是不够的。地图在人类发展史上发挥了重大的作用,它是人类在充分认识客观世界基础上,经过高度的概括和抽象,以图形的方式再现客观世界的先进方法。地图以直观的可视化符号和准确的空间位置比较精确地反映了自然界的各种事物,被广泛地应用于人们工作、生活的各个领域。但由于其本质是将立体的现实世界投影到一个制图平面来表达,损失了大量的立面信息;同时地图表达经过了抽象和综合,并运用了制图语言,造成一定程度的信息损失和传递的局限性。随着科学技术的飞速发展,将现实世界以完全类似的形象加以表达和模拟成为可能,利用计算机或特殊工程材料搭建物体的模拟模型能够将现实世界真实地再现于我们眼前。无论是实体的还是数字的三维模型,都具有高度的逼真性,给人以身临其境的感觉;尤其是数字模型,除可以满足人们的浏览观察要求外,还能够实现查询、分析等高级功能,将其价值提升到应用的层次上来。

随着人类认识要求和认识水平的不断提高,数字化真三维模拟将成为现实世界表达的主要方式。如何将现实世界尽量真实的表达,并在大范围内传播人们的认知成果,重点需要解决以下三个方面的问题:现实世界的抽象(确定描述内容、描述粒度等);地理要素的表达(设计实现符号化系统、信息组织规则、可视化技术等);成果的使用(简单易用的使用方法、直观的信息表达等)。针对现实世界的三维重建,虽然现在已取得一些成果,但仍有大量的理论和技术问题有待探讨和解决。本章主要对如何实现城市景观三维抽象与形式化描述和表达进行了研究。

2.1 当代主要表达方法

在当代现实生活中,人们依然采用多种多样的方式来交流对客观世界的认识,其中最精确、最有效的方式主要有两种:一为二维平面地图;一为三维立体模型。

1. 二维平面地图

地图是根据一定的数学法则,使用地图语言,通过制图综合,表示地面上各种自然现象和社会现象的图件。它反映了自然和各种社会经济现象的空间分布、组合、联系及其在时间中的变化和发展。

地图的历史非常悠久,大约在原始社会后期,为了满足生产劳动的需要,人类就学会了用绘图的方式描述他们的生活环境,开始了它的萌芽。进入阶级社会以后,社会生产力的发展,人类对自然界认识的不断提高,以及随国家制度的建立而产生的政治、军事的需要,地图的发展更加迅速。西周时期出现的洛邑城址地图是我国地图史上第一幅具有实际用途的城市建设地图。春秋战国时期,出现了我国第一部地图论著《管子·地图篇》。魏晋时期裴秀创立了“制图六体”,即分率、准望、道里、高下、方邪、迂直,为地图的发展奠定了理论基石。唐宋元明地图发展更加迅速,贾耽、沈括、郭守敬、朱思本、罗洪先、郑和等人对推进地图的理论和应用作出了巨大贡献。明末清初,西方测绘技术的引进突破了传统制图的理念,推动了地图学思想的第三次变革(卢良志,1984;金应春,1984)。近现代以来,地图的内容、形式与编制方法随着科学技术的进步又取得了新的发展。

利用平面地图抽象表达现实世界的过程可以概括为:首先在充分认知真实的现实世界基础上,从中抽象提取几类现实世界的典型特征(居民地、水系、交通、境界、地貌、土质、植被等),然后依据经典的地图制图学理论,运用形象的符号化系统将其表达在纸质、磁质等各种介质上,就形成了地图。然而,人类生存的环境却是一个真三维的客观世界,只是局限于当时的科学技术手段,人们才不得不使用二维平面图形表达三维世界,实践证明这种方式存在不少弊端。把真实的三维世界简化为二维,在复杂环境下可能带来思维的局限性和片面性,带来规划设计的不准确性,使得一些非三维信息不能解决的问题被疑难搁置,等待耗资耗时的实地考察来确定。同时,图形图像的分离无法实现图形图像的密切配合,使决策者不能在一体化的环境中整体审视三维空间关系和景观属性问题。

2. 三维立体模型

真实事物的三维立体模型主要有实体的和数字化的。实体三维模型使用特殊的工程材料比照原物按一定比例缩小建构而成,如深圳的锦绣中华景区即是一处非常典型的大型三维实体模型场。实体模型虽然直观、形象,但是构造复杂,工程量大,随模型范围、比例和精细程度的提高,工作量、用料、占用场地等都急剧增加,因此它仅适用于小范围、零散地物的表达。并且实体模型的主要功能在于展示,难以实现查询、分析等应用功能。数字化的三维模型则是以计算机为手段,以现实世界的抽象规范为核心,以高度仿真为原则,以实际应用为主要目标,将现实世界用数字形式存储、显示、查询、分析的现代化表达方法。与实体模型相比,数字模型构造简单、不占用实际空间、可以方便地修改,并可以方便地实现检索、查询、统计、分析等高层次的应用功能。三维数字模型是目前描述和表达现实世界的最精确方法,但是由于

其本身理论和技术的复杂性，其发展还处于初级阶段，许多实际问题有待解决，诸如现实的三维描述和表达规范、三维精细数据的采集、三维数据结构和数据组织、大范围场景的快速显示等。近年来，信息技术的突飞猛进给在数字世界中重建现实世界提供了技术基础，目前已出现了许多较成熟的三维重建系统，如前文所介绍的 NewMap 3DV、3DMAX、Imaging Virtual GIS、MultigenCreator、IMAGIS、VRMap、MicroStation Master Piece、SiteBuild3D 等。

就目前而言，地理景观三维表达仍没有一套完全成熟的理论与方法，很大程度上是由于其原型的复杂性，难以形成高度抽象的描述与表达规范。就本质而言，地理景观三维表达与医学三维可视化有很多相似的地方，但医学可视化在实际应用中比较成功，关键在于医学领域的研究者对他们研究中期望看见的对象一般都有较为准确的印象模式，而地学领域的研究者因为地学对象的复杂变化性不能准确地确定研究对象的各种属性。

2.2 现实世界三维表达的信息传输模型

对现实世界进行科学的描述与表达的根本目的在于实现人与人之间信息的沟通和交

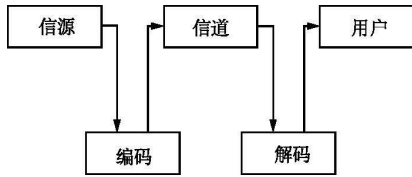


图 2.1 信息传输模型

互，传播既有的认知成果，为此有必要将信息论引进来，从科学的角度探讨地学空间信息的传输机理和模型。信息论是关于信息的本质和传输规律的科学的理论，是研究信息的产生、获取、度量、变换、传输、处理、识别及其应用的一门科学(常迺，1993)。信息论的基本问题是信源、信宿、信道以及编码问题。最基

本、最标准的信息传输模型如图 2.1 所示，从信源获得信息，经过编码送入信道传到用户端，再经解码即可得到用户所需的信息。

地图作为现实世界二维抽象表达的一种有效手段，其本质是传播地理空间世界信息的一种方式。捷克人 Kolaeny 于 1969 年首次提出了地图信息传输模型，用以描述地图信息的传输特征，阐明了作为一个完整过程的地图制作与地图使用者之间的联系，揭示了地图信息的产生、含义和使用效果的传递系统。具体过程如图 2.2 所示。

其基本模式为：制图者(信息发送者)把对客观事物(制图对象)的认识加以选择、分类、简化等信息加工，经过符号化(编码)制成地图；通过地图(通道)将信息传输给用图者(信息接收者)；用图者经过符号识别(译码)，同时通过对地图的分析和解译，形成对客观世界(制图对象)的认识(Kolaeny，1969)。

将现实世界以真三维的形式加以表达，形成具有高度仿真特性的三维景观，以满足查询分析等应用需要，该过程作为一个信息传递系统，同样可以建立其信息传输模型。借鉴现实世界二维表达方式——地图的信息传输模型，三维表达的信息传输过程可以概括为：在对客观世界(信源)充分认识理解的基础上，形成抽象描述规范，据此规范选择抽取信息，经计算机存储、转换、输出(编码)，形成逼真的三维景观(信道)，使用者