

第四代地理信息系统研究中的尺度转换数字模型

岳天祥 刘纪远

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

摘要 分析了空间插值模型、数字地面模型和它们与地理信息系统集成的研究进展、存在的缺陷和需要解决的理论问题, 论述了建立基于曲面论和遥感反演方法数字模型及实现其与地理信息系统有效集成的必要性和可行性。

关键词 数字模型 曲面论 遥感反演 地理信息系统

中图法分类号: P208 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2001)09-0907-05

The Digital Model for Transforming Information at Various Scales

YUE Tian-xiang, LIU Ji-yuan

(State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract The existing digital models can be classified into spatial interpolation models and digital terrain models. Spatial interpolation can be defined as the procedure of estimating the value of properties at unsampled sites within the area covered by existing point observation. The methods for spatial interpolation include interpolation by drawing boundaries, trend surface analysis, spline functions, moving averages and Kriging interpolation. A digital terrain model is an ordered array of numbers that represent the spatial distribution of terrain attributes. Three existing principal ways of structuring a digital terrain model are triangulated irregular networks, regular grid networks and contour-based networks. Issues on errors of digital terrain models and spatial interpolation models have been important research topics since the late 1960s and many methods for analyzing and measuring errors have been developed. However, the error problem is not attacked at the root. Although relative studies have found that slope, aspect and curvature are the most important variables for a surface, these variables are not used in formulation of the relative models. In fact, the first and the second fundamental forms are determinants of a surface, while the slope, aspect and curvature only are determinants of the thalweg of a surface according to differential geometry. The digital model of the 4th generation GIS is based on the fundamental theorem of surfaces and approach of remote sensing inversion, which can integrate theory of differential geometry with expertise, remote sensing information over an area and monitoring information at points.

Keywords GIS, Surface theory, Remote sensing inversion, Digital model

0 引 言

自 20 世纪 50 年代以来,随着计算机技术的快速发展,产生了许多信息系统(information system)概念.例如,50 年代中期产生的数据处理系统(data processing system),60 年代中期产生的管理信息系统(management information system)和 80 年代初

期产生的人工智能(artificial intelligence)系统.地理信息系统(geographical information system)除具有注重空间定位和空间相互关系的特点外,还集成了当代各种信息系统的硬件和软件优势.地理信息系统的综合性和先进性,使其在资源环境和社会经济等领域得到了广泛的应用、发挥了重大的作用.然而,地理信息系统还存在着许多亟待解决的理论问

题、还有许多不足之处,尤其在数字模型方面,需要引入数学领域的已有研究成果。

地理信息系统的发展历史可划分为三个不同的时代^[1]。50年代中期到80年代后期,是地理信息系统的开发时期,它可区分为50年代到70年代中期的开拓阶段、70年代中期到80年代初期的正式实验和政府资助研究阶段、80年代初到80年代末的商业化阶段,这一时代的地理信息系统具有数据处理系统和管理信息系统初期设计的主要特点。80年代末到90年代中期,是地理信息系统的快速发展时期,地理信息系统软件得到了广泛的应用。自90年代中期以来,是地理信息系统的高速发展时期,开始具有初步的分析决策和作为应用集成平台的能力。综观地理信息系统的这三个发展时代,其数字模型基本局限于经验和统计模型的范畴,几乎没有吸纳几何数学领域的任何现代研究成果。

目前,探测地表过程和生态过程的主要方式有两种:一是单点定位观测或空间采样;二是利用遥感数据进行反演。单点定位观测或空间采样能较为准确地获取高时间分辨率的点上观测数据。但定位观测或空间采样只局限于离散、稀疏的有限空间点,不能直接得到区域尺度的有关参数,只能根据点数据进行估计,或以点代面,或利用简单的插值方法估算。而由于地理系统和生态系统在空间属性上的非均匀性,利用点数据直接描述区域属性不能真实反映空间分布规律。遥感方法能频繁和持久地提供地理过程和生态过程的面状信息,相对于单纯依靠地面站点定位观测是一个革命性的变化。但遥感描述并不能直接获得过程参数,需要通过遥感信息(光谱信号和雷达信号)结合地表特性进行反演。传统的解决方法是利用简单内插把离散数据空间化,但是这样处理的结果精度较差,大大影响了遥感反演的精度。提高离散参数空间化精度的一个有效途径是引入新的、有力的数学工具,设计全新的数字模型,建立高精度的非线性内插模型。也就是说,将有关数学理论和遥感反演技术有机结合起来,并充分利用单点定位观测数据信息的数字模型已成为亟待解决的关键问题。

第四代地理信息系统不仅要要将地图存入计算机,进行大范围、跨图幅的灵活处理,而且要将地球数字化,以空间坐标为基础集成各种信息。对有关领域发表在国际SCI检索期刊和中国核心期刊中的近2000组模型的归纳分析表明^[2],数字模型及其

与地理信息系统集成是第四代地理信息系统研究中的最重要问题之一。

1 数字模型

现有的模型可概括为空间插值模型和数字地面模型。

1.1 空间插值模型

在观测点覆盖地区内,估计非观测点或非抽样点属性值的过程,称为空间插值法。目前,主要的空间插值法包括边界线勾画法、趋势面分析法、样条函数法、滑动平均法和Kriging插值法。

根据景观特征勾画景观单元轮廓的边界线勾画法是最简单的插值法,例如,土壤、地质、植被和土地利用等专题地图以及影象分析中的边界搜寻算法等。

通过多元回归模拟空间渐变的趋势面分析法也是一种便于理解的简单方法,它可以用来处理线性趋势面上的概括性特征,但很难用于二次以上的高次多项式所表达的趋势面。因此,趋势面分析的主要用途通常不是插值,而是在使用其他插值方法之前,提取数据的整体性特征。

样条函数(spline functions)是活动曲线规(flexible ruler)的数学表达,它们是少量数据点精确拟合的函数片段,并假定各曲线片段之间是连续的。这就意味着不需要重新运算整条曲线就可以用样条函数修正曲线的一个片段,这对于趋势面分析法是不可能的。但样条插值存在着以下缺点:选择已知观测点作为样条函数的重合点得出的结论与选择已知观测点作为样条函数的间隔点得出的结论大相径庭;样条插值的误差不能直接估计;在三维插值中,如何把斑块缝合在一起形成一个完整的表面仍是亟待解决的实际问题。

滑动平均法是一种非常简单的插值法,它通过非观测点邻域中已知点的平均值来估计非观测点的值。其中加权滑动平均法是较常用的一种滑动平均法,已知数据点距插值点的距离越近,其权重越大。滑动平均法的缺点包括:(1)估计值由其估计函数及其参数主导;(2)插值点的正确性取决于已知数据点的数据质量;(3)插值点随所取邻域面积的大小而发生变化,尤其在已知点分布不规则的情况下,每个插值点都可能不同的大小和形状,因此,插值点的准确性是很值得怀疑的;(4)在许多情况下,已知数据点很不规则,滑动平均所得出的曲面很可能不通过一些已知点,这些点常常被直接输出,因此导致了插

值面中的奇点。

为了克服滑动平均法的缺点,法国地质数学家 G. Matheron 和南非采矿工程师 D. G. Krige 为采矿业发展了一种最优插值法,它是随机表面的最佳线性无偏估计(Best Linear Unbiased Estimate)。后来成为地理信息系统中大众化的空间数据内插法,人们称其为 Kriging 插值法^[3]。Kriging 插值法有三个重要的前提条件:(1)区域变量可表达为与均值有关的结构成分、与空间有关的随机成分和随机噪音三部分之和;(2)所研究区域是均质的;(3)对景观的不同部分应使用不同的半变图(semivariogram)。然而,地理信息系统软件的使用者往往忽视了这三个重要的前提条件,因此得出的结论可信度很差。其根源在于 Kriging 模型在理论上不够完善,有待进一步研究;与此同时,到目前为止,在非线性插值和非 Gaussian 过程方面还没有任何可用的研究成果,这将是我们要深入探讨的主要问题。

1.2 数字地面模型

数字地面模型(DTM)被定义为描述地面属性空间分布的有序数据阵列^[4,5]。数字高程模型(DEM)是 DTM 最重要的基础模型,它被定义为描述高程空间分布的有序数字阵列。

DEM 由通过离散点上抽样获取的高程数据组成。构建 DEM 的方法主要有 3 种:(1)基于不规则三角网(TIN)的 DEM 常常通过地面特定点的抽样,形成以 (x, y, z) 为坐标的不规则点网,其网格是由 3 个相邻点构成的不规则多边形;(2)基于规则栅格网(RGN)的 DEM 与所研究区域的尺度密切相关,其网格是由 3 个或 4 个相邻点构成的正三角形或正方形;(3)基于等高线网(CBN)的 DEM 由数字化等高线组成,其格网是由相邻等高线围成的不规则多边形。

目前,在地理信息系统中应用较广泛的 DEM 是基于 RGN 的 DEM 和基于 TIN 的 DEM。然而,RGN 的运算结果缺乏精确性;不易处理高程的陡峭变化;网格的大小影响运算结果和计算效率;在水文分析中,其运算得出的斜坡流路为不符合现实的锯齿形。TIN 与 RGN 相比,使用起来比较灵活,但由于其网格的不规则性,使得实际操作和属性运算都比较困难。也就是说,在上述 3 种方法中,基于 CBN 的 DEM 是最有优势的模型,但它对数字高程数据的数量和质量都有比较高的要求,而且它没有考虑插值点组合的任何曲面性质。

1.3 新一代数字模型

虽然第三代地理信息系统在国民经济和科学研究的许多方面已得到了广泛的应用,而且在数字地球有关领域将发挥核心作用,但空间插值模型和数字地面模型内插误差的有关研究表明,第三代地理信息系统所提供的数据建模工具有缺陷的,甚至有时会导致错误的结论^[6]。空间插值模型和数字地面模型的误差问题在 20 世纪 60 年代末就引起了有关专家的重视^[7],在近 30 年的研究中,产生了许多误差检测方法和评价指标^[8,9]。例如,基于趋势面的误差检测、基于坡度信息的误差检测、基于等高线拓扑关系的误差检测和 DEM 原始数据误差检测等,量度误差的均方根指数(RMSE)、标准差(SD)、误差直方图和空间自相关系数等。有关误差研究方法可概括为 3 类:评价和比较各种内插算法的误差;分析和评价原始数据误差;研究数字地面模型主要变量和参数的不完备性所引起的误差。

现有的空间插值模型和数字地面模型获取内插点的数值时,将采样点或观测点视为相互独立的点,使得已知点之间的相互关系遭到破坏,最终导致比较大的误差甚至错误的结论。在以往的研究中,Evans 虽然已认识到坡面、坡向和曲率是反映局部规律的重要变量^[10],但他并没有将它们用于表达数字地面模型。事实上,根据微分几何学理论,坡面、坡向和曲率只是地面剖面线的决定要素,而数字地面的决定要素是曲面的第 1 类基本量和第 2 类基本量。

运用曲面论基本定理使模型的内插点能够准确反映局部规律;引入遥感参数,使模型能够包容整体规律和采样点或观测点之间的有机联系。也就是说,基于遥感反演和曲面论基本定理的离散点数据空间化数字模型是从根本上解决误差问题的唯一途径。

2 数字模型与地理信息系统的集成

模型与地理信息系统的有效集成是近几年来世界各国的研究重点。地理信息系统和模型的集成方法可概括为以下 4 种^[11,12]:

(1)把地理信息系统功能嵌入模型软件包 这种方法的不足之处在于模型软件包的数据管理和可视化能力远不及商业化地理信息系统,并且需要大量的编程工作;同时,大多数模型软件包是由专家针对特殊的研究项目开发的,虽然它们有概念上的某种共享性,但由于这些模型软件包使用了各种不同

的数据结构、编程工具和硬件平台,它们对其他使用者是非常困难的。

(2) 将模型嵌入地理信息系统 这种方法的基础是商业化地理信息系统软件包,它吸收了固有地理信息系统功能的所有优点,但其模型过分简单化,并且标准化只能在软件包外部进行。

(3) 地理信息系统与模型的松散耦合 这种方法包括一个标准的地理信息系统软件包和一个模型程序,地理信息系统和模型通过数据交换结合在一起。这个数据交换过程在几个不同的软件包之间进行,没有共同的用户界面。

(4) 地理信息系统与模型的紧凑耦合 这种方法把某些模型通过宏指令或常规编程固定到一个商业化地理信息系统软件包之中。

上述几种地理信息系统与模型的集成方法不能满足实际应用的需求,它们需要大量的编程工作、需要宏指令、或需要在几个不同软件包之间进行数据交换。另外,它们还存在以下问题:缺乏标准的通用数据接口,有的数据接口文件设计的过于膨杂而缺乏实用及通用性;模型建模理论本身还不成熟,还处于不断发展变化中,模型多样,缺乏权威的、全面的模型规范;模型过于专业化的算法阻碍了软件的开发;地理信息系统开发者和模型研究人员缺乏协作,对地理信息系统空间分析功能的需求认识不一。因此,在模型与地理信息系统的集成方面需要深入研究模型及其与数据库集成的标准规范,模型与地理信息系统的有效集成方法。也就是说,为了达到模型库与地理信息系统的有效集成,需要在数据库标准规范的基础上,开展模型库与其数据库集成的标准规范研究,建立和发展模型建模规范;模型与地理信息系统的有效集成的目标是,能使所有用户不需要知道地理信息系统中的特殊数据结构,只要在一个共同的用户界面写入模型的表达式或数学方程,就可以在地理信息系统为模型研究者或使用者提供的可视化平台上显示其运行结果。

3 讨论

总的来讲,地理信息系统软件平台发展到今天仍是面向二维的空间数据,对三维空间数据和时序数据缺乏有效的数字模型,更难以组织和处理包括空间数据在内的多维数据。目前,虽然有三维地理信息系统问世,但理论完善的数字模型一直没有解决,其功能远远不能满足实际问题的需要。

现有的地理信息系统对空间数据的组织和分析,基本上都是在尺度割裂的状态下进行。它以比例尺作为多尺度数据表达的基本参考,面向对象的矢量数据和不同分辨率的空间影像数据都缺乏尺度转换。

对地球表面上被定义为生态系统的任何大小的斑块,都有一系列外部因素影响其功能行为,进而产生了生态系统与其外部环境的能流和物流。在每个尺度,为了刻划生态系统类型的范围、压力、状况、价值和趋势以及土地利用格局和基本的生态系统结构特征,需要确定一套空间尺度明确的指标。在较大尺度进行的研究包含了这些能流和物流的较详细信息,然而却损失了政策制定者常常所需要的地域特性。也就是说,不管在哪个单一尺度,都不可能系统地认识地理过程和生态系统变化的所有细节。

然而,现有的地理信息系统对空间数据的组织和分析,基本上都是在尺度割裂的状态下进行。它以比例尺作为多尺度数据表达的基本参考,面向对象的矢量数据和不同分辨率的空间影像数据都缺乏尺度转换。尺度转换问题可以看作本文所讨论数字模型的一个特例。例如,一个 $1.1\text{km} \times 1.1\text{km}$ AVHRR 象元可以描述为由 269 个 $57\text{m} \times 79\text{m}$ MSS 象元组成的曲面;一个 $57\text{m} \times 79\text{m}$ MSS 象元可描述为 5 个 $30\text{m} \times 30\text{m}$ TM 象元组成的曲面;一个 $30\text{m} \times 30\text{m}$ TM 象元可描述为由 36 个 $5\text{m} \times 5\text{m}$ IRS 象元组成的曲面。

因此,不管是第四代地理信息系统理论研究面临的理论问题,还是实际应用的需求,数字模型及其与地理信息系统有效集成的研究势在必行。初步研究成果表明,在近几年内,数字模型研究可以有效地解决地理信息系统面临的多维功能和尺度转换问题。

参考文献

- 1 方裕,周成虎,景贵飞等.第四代 GIS 软件研究[J].中国图象图形学报,2001,6A(9):819~825.
- 2 岳天祥.资源与环境模型标准文档库及其与 GIS 集成研究[J].地理学报,2001,56(1):107~112.
- 3 Stein M L. Interpolation of spatial Data [M]. New York: Springer-Verlag New York, Inc., 1999.
- 4 Moore I D, Grayson R B, Ladson A R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological application[A]. In: Beven K J and Moore I D (eds), Terrain Analysis and Distributed modelling in Hydrology [C]. Chichester: John Wiley & Sons, 1992, 7~34.
- 5 陈述彭,鲁学军,周成虎.地理信息系统导论[M].北京:科学出版社,2000.

版社,2000.

- 6 Wise S. GIS data modelling—lessons from the analysis of DTMs [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2000,14(4):313~318.
- 7 Crain I K. Digital representation of topographic surfaces [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1970, 54(11):1577~1580.
- 8 Tang G. A research on the accuracy of digital elevation models [M]. Beijing: Science Press,2000.
- 9 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉测绘科技大学, 2000.
- 10 Evans I S. An integrated system of terrain analysis and slope mapping[J]. Zeitschrift fuer Geomorphologie, Suppl-Bd, 1980, 36:274~295.

- 11 Burrough P A. Environmental modelling with geographical information system[A]. In: Kemp Z (ed.), Innovations in GIS4 [C]. London: Taylor & Francis Ltd., 1997:143~153.
- 12 Sui D Z. GIS-based urban modelling: practices, problems, and prospects [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12(7): 651~671.

岳天祥 1963年生,研究员,博士生导师,长期从事数字模型研究,发表学术论文60余篇。

刘纪远 1947年生,研究员,博士生导师,现任中国科学院地理科学与资源研究所所长,长期从事资源环境信息分析研究。

虚拟现实及其在工业中的应用(VRAI'2002)国际会议征文通知

(2002年4月10~12,杭州)

第三届虚拟现实及其在工业中的应用国际会议 VRAI'2002(Virtual Reality and its Application in Industry)将于2002年4月10~12日在中国杭州召开。会议由中国图象图形学会主办,中国图象图形学会虚拟现实专业委员会和杭州电子工业学院承办。大会优秀论文将推荐到 IEEE CG & A, C & G, The Visual Computer, International Journal of VR, International Journal of CAD/CAM, JCST 杂志上发表。大会同时举办“虚拟现实及其应用”高级研讨班和“图形图象及虚拟现实产品”展览会,会后组织到千岛湖,雁荡山和三峡旅游。欢迎投稿,参展和参加会议。

大会名誉主席:

潘云鹤(院士,浙江大学校长,中国图象图形学会理事长)
Judy Brown(ACM SIGGRAPH 主席,美国)

会议主席:

赵沁平(中国计算机学会虚拟现实和可视化专委会主任)
Carl Machover(President of MAC,U.S.A)
Nadia Magnenat-Thalmann (University of Geneva, SWITZERLAND)
叶明(杭州电子工业学院院长)

程序委员会主席:

石教英(中国图象图形学会虚拟现实专业委员会主任)
Martin Goebel(GMD,Germany)
Baining Guo(MSRC,China)
Ryohei Nakatsu(ATR,Japan)
Kwangyun Wohn(VRRC,Korea)

组委会主席:

潘志庚(中国图象图形学会虚拟现实专业委员会秘书长)

讲座委员会主席:

查红彬(北京大学,长江计划学者)

展览委员会主席:

万健(杭州电子工业学院,软件学院院长)

征文范围:虚拟现实技术及各种应用的论文

征文截止日期:2001年12月31日

大会网址:<http://www.cad.zju.edu.cn/VRAI2002>

联系人:潘志庚 陈田

联系地址:浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室,杭州, 310027

联系电话:0571-87951780 13957182360

E-MAIL:vrai2002@cad.zju.edu.cn