



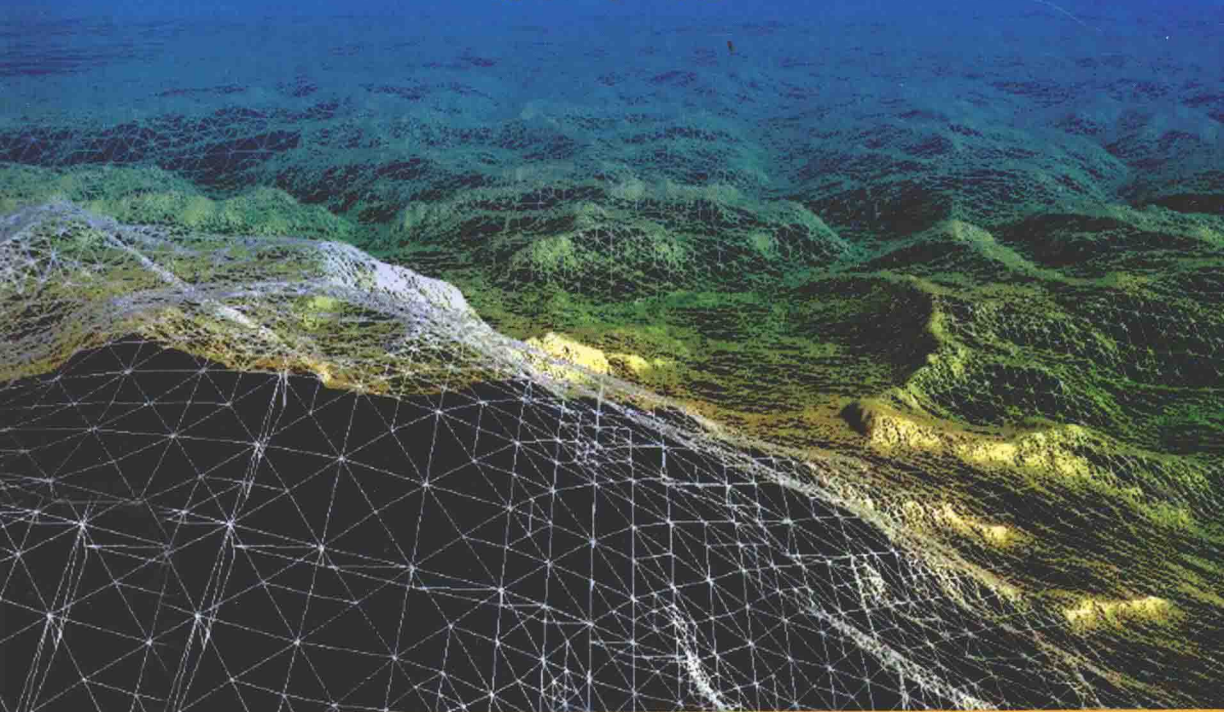
测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

地形建模原理与 精度评估方法

Principle of Terrain Modeling and
Methods of Precision Evaluation

游雄 等 编著



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

地形建模原理与精度评估方法

Principle of Terrain Modeling and Methods of Precision Evaluation

游 雄 王光霞 张寅宝 编著
张锦明 齐晓飞 蒋秉川

地

地

• 北京 •

© 游雄 等 2014

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 提 要

本书针对目前地理信息空间分析、虚拟地理环境构建等领域对地形模型的应用需求,系统地分析地形建模全过程中建模算法和误差传播规律,对地形模型建模算法及精度评估的相关原理和方法进行深入研究。全书共八章,主要内容包括:绪论,地形建模与精度评估基础,地形建模原始数据误差,线性表面建模误差,地形建模、地形化简、地形地物模型的融合算法与精度评估,以及基于地形特征的地形模型精度评估。

本书可作为高等院校地理、测绘、环境、城市规划、地理信息系统等专业本科生和研究生教学使用,同时也可供相关专业的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地形建模原理与精度评估方法 / 游雄等编著. —北京:测绘出版社, 2014.12

ISBN 978-7-5030-3622-4

I. ①地… II. ①游… III. ①地貌—建立模型—高等学校—教材②地貌—建立模型—评估方法—高等学校—教材 IV. ①P931

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 303165 号

责任编辑	吴 芸	封面设计	李 伟	责任校对	董玉珍	责任印制	喻 迅
出版发行	测绘出版社			电 话	010—83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010—68531363(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	三河市世纪兴源印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	17.5			字 数	340 千字		
版 次	2014 年 12 月第 1 版			印 次	2014 年 12 月第 1 次印刷		
印 数	0001—1200			定 价	60.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3622-4/P·787

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

地形是人类生活和进行实践活动的重要基础,也是自然界最复杂多变的要素之一。地形模型能很好地提供对复杂地形系统的抽象近似表达。模型越接近真实地形,越能反映地形的本质,人们的认识就越深刻,对地形变化规律的把握就越准确。因此,地形建模及其精度评估具有重要的理论和实际应用价值,成为地学界传统而又活跃的研究领域。

本书系统地分析了地形建模全过程中建模算法和误差传播规律,涉及地形建模原始数据误差,线性表面建模误差,地形建模、地形化简、地形地物模型的融合算法与精度评估,以及基于地形特征的地形模型精度评估,为地形建模与精度控制提供科学依据。

全书共八章。第一章绪论,介绍模型的一般概念和方法,重点阐述地形模型概念、地形模型表达方式和地形建模方法。第二章地形建模与精度评估基础,介绍地形因子及计算方法,给出地形建模插值参数确定方法,阐述地形模型精度评估内容以及精度评估的数学方法和可视化方法。第三章地形建模原始数据和传递误差,分析地形建模原始数据特点,提出了基于规则和不规则格网线性建模传递误差精度模型。第四章地形建模算法与精度评估,阐述了目前地形建模中常用五种算法的特点及对算法的改进思路,并通过大量实验研究,给出不同地貌类型与不同建模算法之间的精度模型。第五章多分辨率地形建模算法与精度评估,介绍多分辨率模型概念和建模方法,提出 LOD 地形误差模型分层指标概念,建立了 LOD 误差模型,以及多分辨率化简算法与地貌类型相关的精度模型。第六章体素地形模型的建模算法与精度评估,介绍体素、体素模型、体素地形模型的概念,提出基于体素模型的地形建模算法,以及基于体素模型的多分辨率地形可视化算法,并进行了试验验证。第七章地形地物模型的融合算法与精度评估,提出地形与地物模型融合内容和算法,建立融合后地形精度评估模型,同时给出大比例尺地形与地物融合处理时可以不考虑地物模型限制的结论。第八章基于地形特征的地形模型精度评估,利用散点图矩阵、等高线回放法、水系与地形套合法和图表法、误差可视化方法评估地形模型的整体误差,并对相关算法进行详细描述和精度分析实验。

本书由游雄规划设计、组织撰写并统稿。全书集成了解放军信息工程大学地理空间信息学院(原解放军测绘学院)战场环境仿真研究团队十余年来的研究成果,包括王光霞、张锦明、张寅宝、蒋秉川、齐晓飞等五位博士和刘宁、潘攀、边淑莉、牛瑞涛、李江、李潇、姚霄飞等七位硕士的相关专题研究和学位论文成果。张寅宝、

齐晓飞、游天和吴月负责文字审校、排版和插图绘制工作,王思和孙卫新负责英文目录翻译工作。在此对他们表示衷心的感谢!

高俊院士、周成虎院士、朱庆教授在百忙之中审阅了书稿,并热情地向出版社推荐本书。他们的支持和帮助促成了本书的完稿和出版,在此致以崇高的敬意和深切的感谢!

本书在编写过程中参考了大量国内外相关文献,感谢参考文献中所有专家学者,是他们前期的研究工作,给我们以启迪和帮助。

本书力图全面总结地形建模与精度评估方面已有的理论和技术成果,并将新的研究成果融入其中,以体现全面性、科学性和创新性。但由于地形模型本身还有许多值得进一步探讨和研究的问题,加之作者水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳请读者批评指正。

2014 年 8 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 模 型	1
§ 1.2 地形模型	4
§ 1.3 三维地形建模	9
第 2 章 地形建模与精度评估基础	12
§ 2.1 地形因子及计算方法	12
§ 2.2 地形建模与插值方法	19
§ 2.3 地形模型精度评估内容和方法	32
§ 2.4 地形模型精度评估的可视化方法	35
第 3 章 地形建模原始数据和传递误差	46
§ 3.1 原始数据源及误差分析	46
§ 3.2 DEM 表面建模	48
§ 3.3 基于规则格网的线性建模传递误差模型	52
§ 3.4 基于 TIN 的线性建模传递误差模型	54
第 4 章 地形建模算法与精度评估	61
§ 4.1 改进的距离加权平均算法地形建模与精度评估	61
§ 4.2 基于等高线膨胀算法的地形建模与精度评估	71
§ 4.3 基于克里金插值算法的地形建模与精度评估	74
§ 4.4 基于分形算法的地形建模与精度评估	79
§ 4.5 基于径向基函数的地形建模与精度评估	84
§ 4.6 基于 Delaunay 三角网的快速地形建模	90
第 5 章 多分辨率地形建模算法与精度评估	106
§ 5.1 多分辨率地形建模	106
§ 5.2 LOD 地形建模的误差模型	112
§ 5.3 基于四叉树的视点相关 LOD 地形建模与精度评估	118
§ 5.4 基于点重要度的 LOD 地形建模与精度评估	128

§ 5.5	基于小波分析的 LOD 地形建模与精度评估	135
第 6 章	体素地形模型的建模算法与精度评估	151
§ 6.1	体素地形模型概述	151
§ 6.2	基于体素模型的地形建模	159
§ 6.3	基于体素模型的多分辨率地形建模	162
§ 6.4	实验与分析	184
第 7 章	地形地物模型的融合算法与精度评估	198
§ 7.1	地形模型与地物模型融合的内容	198
§ 7.2	地形模型与地物模型融合算法	204
§ 7.3	地形与地物融合模型的精度评估	219
第 8 章	基于地形特征的地形模型精度评估	224
§ 8.1	基于散点图矩阵法的地形模型精度评估	224
§ 8.2	基于等高线回放法的地形模型精度评估	234
§ 8.3	基于水系和地形套合的地形模型精度评估	241
§ 8.4	基于图表法的地形模型精度评估	259
参考文献		267

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Models	1
§ 1.2	Terrain Models	4
§ 1.3	Three-Dimensional Terrain Modeling	9
Chapter 2	Basis of Terrain Modeling and Precision Evaluation	12
§ 2.1	Terrain Factors and Computation Methods	12
§ 2.2	Terrain Modeling and Interpolation Methods	19
§ 2.3	Content and Methods of Terrain Model Precision Evaluation	32
§ 2.4	Visualization Methods of Terrain Model Precision Evaluation	35
Chapter 3	Raw Data and Transmission Error of Terrain Modeling	46
§ 3.1	Raw Data Source and Error Analysis	46
§ 3.2	DEM Surface Modeling	48
§ 3.3	The Transmission Error Model of Linear Modeling Based on Regular Grid	52
§ 3.4	The Transmission Error Model of Linear Modeling Based on TIN	54
Chapter 4	Terrain Modeling Algorithms and Precision Evaluation	61
§ 4.1	Terrain Modeling Based on Improved Distance Weighted Average Algorithm and Precision Evaluation	61
§ 4.2	Terrain Modeling Based on Contour Expansion Algorithm and Precision Evaluation	71
§ 4.3	Terrain Modeling Based on Kriging Interpolation Algorithm and Precision Evaluation	74
§ 4.4	Terrain Modeling Based on Fractal Algorithm and Precision Evaluation	79
§ 4.5	Terrain Modeling Based on Radial Basis Function and Precision Evaluation	84
§ 4.6	A Fast Terrain Modeling Algorithm Based on Delaunay Triangulation	90

Chapter 5	Multi-Resolution Terrain Modeling Algorithms and Precision	
	Evaluation	106
§ 5.1	Multi-Resolution Terrain Modeling	106
§ 5.2	Error Models of LOD Terrain Modeling	112
§ 5.3	View-Dependent LOD Terrain Modeling Based on Quadtree and Precision Evaluation	118
§ 5.4	LOD Terrain Modeling Based on Node Importance and Precision Evaluation	128
§ 5.5	LOD Terrain Modeling Based on Wavelet Analysis and Precision Evaluation	135
Chapter 6	Voxel-Based Terrain Modeling Algorithms and Precision	
	Evaluation	151
§ 6.1	Summary of the Voxel Terrain Model	151
§ 6.2	Voxel-Based Terrain Modeling	159
§ 6.3	Voxel-Based Multi-Resolution Terrain Modeling	162
§ 6.4	Experiments and Analyses	184
Chapter 7	Fusion Algorithms of the Terrain Model and Surface Feature Model and Precision Evaluation	198
§ 7.1	Fusion Content of the Terrain Model and Surface Feature Model	198
§ 7.2	Fusion Algorithms of the Terrain Model and Surface Feature Model	204
§ 7.3	Precision Evaluation for the Fusion Model of Terrain and Surface Feature	219
Chapter 8	Terrain Models Precision Evaluation Based on Terrain Factors	224
§ 8.1	Terrain Models Precision Evaluation Based on Scatterplot Matrix	224
§ 8.2	Terrain Models Precision Evaluation Based on Contours Matching Method	234
§ 8.3	Terrain Models Precision Evaluation Based on Matching of Drainage and Terrain	241
§ 8.4	Terrain Models Precision Evaluation Based on Diagram Method	259
References		267

第1章 绪论

地形是人类生活和进行实践活动的重要基础,也是自然界最复杂多变的要素之一。如何科学有效地研究地形环境的特征和发展变化规律,是测绘学研究的重要内容。由于各种主观和客观条件的限制,人们不能对真实地形的所有特征、构成、结构和动态变化等各种细节信息进行全面认识与表达,只能依据当时科技水平所提供的条件与手段近似地表达。地形模型恰好提供了对复杂地形系统的这种近似表达。模型越精准、越接近真实,就越能反映地形的本质,人们的认识就越深刻,对地形变化的预测就越准确。因此,模型化方法不仅是进行科学研究的一种重要手段,也是人类进行理论思维的一种普遍方式。对模型与模型化方法的研究,在认识论上具有重要意义。

§ 1.1 模 型

1.1.1 模型的概念

1. 模型的概念和特征

在科学研究中,我们把一切客观存在的事物及其运动形态称为实体。模型是对实体的特征和变化规律的一种抽象简化描述,这种描述可以是定性的,也可以是定量的。有的借助具体的实物,有的通过抽象的形式表达(李时彦,1983)。通过建立模型而达到的抽象更能反映人们对实体认识的深化,是科学认识的飞跃。

模型(model)一词,源自于拉丁文 *modulus*,意思是尺度、样本、标准。模型是针对或参照某种事物系统的主要特征、主要关系,用形式化的数学语言或图形语言,概括地或近似地表述出来的一种事物关系结构。这种结构是经过思维抽象与事物本质关联的一种纯关系结构,这种关系结构,必须是借助概念和符号或图形描述的结构形式。

任何实体都有数不清的特征,有无穷无尽的层次,模型不是实体本身,不能等同于实体,不可能描述一切。模型是人们对实际问题的结构特征的抽象简化,模型的作用是更集中地表达其主要特征和规律,特别是表达人们最需要研究的那些特征。因此,不同的应用需求、不同人的认知方法和认知经验水平,对现实世界中的实体(现象)本身及其相互关系和变化特征的抽象或简化程度是不同的。所以,模型可以有不同的认知尺度、不同的精细程度和不同的表达方式,模型的精度和细节

要求取决于应用需求标准。

2. 模型的类型

模型一般可分为形象模型和抽象模型两大类。

(1)形象模型,是以某种程度、形式相似的模型实体再现原型;是按相似理论,依据几何尺寸的比例,把现实事物的尺寸加以改变(缩小或放大),使之和实际的对象基本相似的模型。

(2)抽象模型,是用符号、图表等描述客观事物的规律所建立起来的模型,具体又可分为三类。

(1)模拟模型,用一组条件代替真实系统的特征,通过模拟性的实验了解系统的规律,从而以图表形式及部分符号描述。是利用图形、符号表达事物特征和相互关系的抽象,如框图、流程图、曲线图等。

(2)数学模型,利用运算符号和数字表达的一种抽象,是模型和原型之间具有相同的数学关系的一种模拟方法。

(3)概念模型,以概念的形式抽象系统的客观规律。是利用科学的归纳方法,以对研究对象的观察、抽象形成的概念为基础,建立起来的关于概念之间的关系和影响方式的模型。概念模型是客体在人们思想中的理想化的映象、摹写,是在人们头脑中创造出来的,并且运用它在思维中进行逻辑推理、数学演算和“理想实验”。

1.1.2 模型化方法

利用模型达到特定目的的研究方法,统称为模型化方法。它既包括利用各种实物模型模仿、再现原型的某些形态、特征和本质模拟方法,也包括对各种思想模型的具体应用。模型化方法是一种间接的研究方法,它并不是直接对客观认识对象进行研究,而是通过对该对象的抽象模型进行研究,来达到认识原型的最终目的。因此,模型既是人们在认识过程中的重要工具,也是人们的研究对象(李时彦,1983)。

模型化方法作为现代科学认识手段和思维方法,所提供的观念和印象,不仅是人们获取知识的条件,而且是人们认知结构的重要组成部分。人们之所以能用模型来模拟原型,是由于客观事物、现象和过程之间存在着相似性。模型舍去了原型的一些次要细节、非本质联系,以简化和理想化的形式再现原型的各种复杂结构、功能和联系,通过研究模型揭示原型的形态、特征和本质。

模型化方法可以使人们对不同时期、不同阶段的自然现象进行研究,了解其时空演变过程 and 变化规律。随着科学技术和模拟方法的提高,模型模拟实体和现象的内容越来越丰富、越来越精准。人们已经从最初的凭经验认识事物的外形结构,到利用统计分析掌握其内部的运动变化过程,再到利用数学模型准确、深刻地认识客观事物内在的数量和质量整体特征、运动状态和发展变化规律。研究的对象越复杂,离人类感性知觉的水平越远,模型化的作用越重要。

1.1.3 模型建立

1. 建模要求

模型建立,即构建模型的过程简称建模,模型是建模活动的目的和结果。建模活动可以是一个简单的直觉抽象过程,也可以是一个长期观测、反复验证,最后才形成模型的漫长艰苦的过程。一般而言,模型应有所要表达的主题,同时,一个好的模型应该较好地符合建模对象实际情况,并把所要表达的主题以简单明了的方式表达出来。因此,模型一般必须具备以下三个条件:

(1)模型是从客观原型中抽象概括出来的,完全形式化和符号化了,所以既要加以适当而合理的简化,又要保证能反映原型的本质特征。

(2)模型是一种高度的抽象模型,所以在模型上既要能进行理论分析,又要能进行计算和逻辑演绎推导。

(3)在模型上所获得的结果不仅要能返回到原型中去,而且经过实践检验确实能解决实际问题。

但是,由于建模行为是人对客观对象的抽象,包含许多主观人为因素,所以模型也常常看作科学与艺术的有机结合。同时,模型的建立不仅要考虑建模对象的抽象认识、问题的解决等,还可能涉及模型的表达与交流应用的人群及工具等因素。因此,同一个问题可以有不同方式或不同类型的模型描述,其模型优劣评判标准不是唯一的。

2. 建模过程

模型是对研究对象的一种抽象、简化的描述。因此,建模过程可主要概括为:对象分析、对象简化和对象重构三个阶段。

(1)对象分析,是建立模型前必不可少的准备工作,这是构造模型的基础。包括分析对象的结构、要素及其联系,分析问题所涉及的量的关系,弄清哪些是常量,哪些是变量,哪些是已知量,哪些是未知量,了解其对象与关系结构的本质属性等。在这个基础上对要素间的相互作用形式和整体的运动变化规律做出推断,为模型的抽象与提炼做好充分的准备。

(2)对象简化,就是模型的提炼、抽象过程,这是建立模型过程中的重要问题。合理的模型应该只包含与研究目的有关的那一部分信息,使它易于为已有的理论工具和技术手段所处理。如果模型比原始系统结构更加复杂并且更难付诸实验,那么这个模型就没有体现出一种进步。然而,模型简化和近似又必须顾及模型的真实性和完整性,使它能够从所需要的角度反映出系统特性的主要方面,不致因误差过大而影响系统整体特性的表达。

(3)对象重构,也就是模型的具体组织建立,涉及许多灵活的技巧性问题。现实世界中各种系统的无限多样性,决定了模型种类的多样性。采用何种形式描述

这种简化的结构,模拟对象的主要特征,这一方面取决于问题本身的性质,取决于研究的目的,也与研究者本人对问题的理解有着密切关系。因此,每一个研究者都必须具备相应的理论知识,掌握必要的数学工具,积累丰富的实践经验,培养和训练思维的技巧。

模型的具体建立是一项创造性的劳动,必须在借鉴前人经验的基础上,充分发挥人类思维的主观能动性,才能建立一个科学合理的实用模型。完美无缺的模型是没有的,每一个模型的合理性是相对的。模型来源于实践,又受到科学发展水平的制约,必须随着实践的发展而发展。模型的每一次应用,都是对它的合理性的检验。通过模型的不断应用,正确的模型被证实,不完善的模型被修正,错误的模型被抛弃,新的模型被提出,人们对于系统原型的认识不断深化,科学也就随之向前发展。

§ 1.2 地形模型

在地形环境研究中,人们对于较为复杂的地形特征分析,往往通过区域研究和资料分析,依据已知的地形规律,首先建立一个适当的模型加以描述,这是人们认识地形环境规律的一种重要方式,也是人们进行理论思维的重要手段。地形模型表示的地形环境是自然界最重要同时也是要素最多、格局最复杂的环境之一,把组成这一复杂系统的各要素,以不同比例尺(不同详细程度),经过抽象概括,制成各种地形模型,从而揭示地形环境的结构、分布特征和相互关系,为研究这一复杂系统提供了方便。

近年来,由于数学和计算机的广泛应用,以及地形环境分析与应用的深入,数学建模(mathematical modeling)方法被广泛应用到地形环境研究领域中。通过对实际地形的抽象、简化,确定变量和参数,并应用地形规律建立变量、参数间的确定的数学模型,使人们研究地形特点和规律从定性向定量发展,有效提高地形模型的建模精度,进而促进模型应用的精确性和可靠性,为各层次应用提供科学精准的地形信息支持。

1.2.1 地形模型概念

从广义上讲,地形是对地球表面形态及其变化规律的描述,除了包括地貌、地物和高程信息以外,还可以包括地价、土地权属、土壤类别、岩层深度及土地利用等其他地面特性信息。如果用数字方式描述,则称为数字地面模型(digital terrain model, DTM),本质上是描述地球表面形态多种信息空间分布的有序数值阵列。

在测绘领域,地形是地貌和地物的总称。数字地面模型指新一代地形图,地貌和地物不再用等高线和图形符号表示,而用地面点的空间坐标和地形属性编码,以

数字形式表示。因此,将“terrain”一词理解为地形,称DTM为数字地形模型(李志林等,2003)。

在地理学领域,地形指地貌,用于表达地面起伏特征及内在变化规律。地形模型是把地形图上的地貌要素,特别是高程信息作为数字地面模型的主要内容,对现实世界中的地貌特征及其空间关系进行抽象和概括,也就是仅将高程或海拔高分布作为地面特性加以描述。此时,数字地面模型称为数字高程模型(digital elevation model, DEM)。显然,DEM是DTM的一个子集。实际上,DEM是DTM的一个地形分量,是DTM中最基本的部分,是对地球表面地形地貌的一种离散的数字表达。

本书中的地形模型仅指对地貌形态的高低起伏特征及其变化规律的描述,包括地形高差、坡度、水平切割密度、粗糙度等基本地形特征及其空间关系。因此,这里的地形模型与地理学概念相同,不包括地物模型,是用数字表达地面起伏形态的一种方式,与数字高程模型表达内容相同。

1.2.2 地形模型的表达

构建地形模型并对其进行三维地形表面的高精度表达,一直是地图学、计算机图形学、数学等领域的重要研究内容。

地形模型的表达指数字地形表达,其表达方式一般分为两大类,即数学描述和图形描述。

(1)数学描述指用数学方法表达,可以采用整体拟合方法,即根据区域所有的数字地形模型和高程点数据,用傅里叶级数和高次多项式拟合统一的地面高程曲面;也可用局部拟合方法,将地表复杂表面分成正方形规则区域或面积大致相等的不规则区域进行分块搜索,根据有限个点进行拟合形成高程曲面。

(2)图形描述是采用点、线、面数据,描述地形特征点、线,以及连续的地面高程曲面。其中点模式是用离散采样数据点建立DEM,数据采样可以按规则格网采样,密度一致或不一致均可;也可以按不规则采样,如不规则三角网、邻近网模型等;也可以有选择性地采样,采集山峰、洼坑、隘口、边界等重要特征点。线模式中等高线是表示地形最常见的形式,其他的地形特征线也是表达地面高程的重要信息源,如山脊线、谷底线、海岸线及坡度变换线等。面模式主要指各种透视写景图、数字地貌晕渲、数字影像等。

目前表达地形模型常用的方法有:规则格网模型、不规则三角网模型、等高线模型和地形层次模型。

1. 规则格网模型

规则格网(grid),通常是正方形,也可以是矩形、三角形等规则格网。规则格网将区域空间切分为规则的格网单元,每个格网单元对应一个数值。数学上可以

表示为一个矩阵,在计算机实现中则是一个二维数组。每个格网单元或数组的一个元素,对应一个高程值。

对于每个格网的数值有两种不同的解释,分别是格网栅格和点栅格。

(1)格网栅格认为该格网单元的数值是其中所有点的高程值,即格网单元对应的地面面积内高程是均一的高度,这种数字高程模型是一个不连续的函数。

(2)点栅格认为该格网单元的数值是格网中心点的高程或该格网单元的平均高程值,这样就需要用一种插值方法计算每个点的高程。计算任何不是格网中心的数据点的高程值,使用周围四个中心点的高程值,采用距离加权平均方法进行计算,当然也可使用样条函数和克里金插值方法。

规则格网数字高程模型可以方便地用计算机进行处理,可以快速计算坡度坡向、山坡阴影和自动提取流域地形,目前许多国家的 DEM 数据都是以这种形式提供的。

格网 DEM 的一个缺点是不能准确表示地形的结构和细部,为避免这些问题,可采用附加地形特征数据,如地形特征点、山脊线、谷底线、断裂线,以描述地形结构。格网 DEM 的另一个缺点是数据量过大,给数据管理带来不便,通常要进行压缩存储。DEM 数据的无损压缩可以采用普通的栅格数据压缩方式,如游程编码、块码等,但是由于 DEM 数据反映了地形的连续起伏变化,通常比较“破碎”,普通压缩方式难以达到很好的效果;因此对于格网 DEM 数据,可以采用哈夫曼编码进行无损压缩;有时,在牺牲细节信息的前提下,可以对格网 DEM 进行有损压缩,通常的有损压缩大都是基于离散余弦变换(discrete cosine transformation, DCT)或小波变换(wavelet transformation)的,由于小波变换具有较好的保持细节的特性,将小波变换应用于 DEM 数据处理的研究较多。

2. 不规则三角网模型

不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)是另外一种表示地形模型的方法(Peucker et al, 1978),它既减少规则格网方法带来的数据冗余,同时在计算(如坡度)效率方面又优于纯粹基于等高线的方法。

TIN 模型根据区域有限个点集将区域划分为相连的三角面网络,区域中任意点落在三角面的顶点上、边上或三角形内。如果点不在顶点上,该点的高程值通常通过线性插值得到(在边上用边的两个顶点的高程,在三角形内则用三个顶点的高程)。所以 TIN 是一个三维空间的分段线性模型,在整个区域内连续但不可微。

TIN 的数据存储方式比格网 DEM 复杂,它不仅存储每个点的高程,还要存储其平面坐标、节点连接的拓扑关系、三角形及邻接三角形等关系。TIN 模型在概念上类似于多边形网络的矢量拓扑结构,只是 TIN 模型不需要定义“岛”和“洞”的拓扑关系。

有许多种表达 TIN 拓扑结构的存储方式,一种简单的记录方式是:对于每一

个三角形、边和节点都对应一个记录,三角形的记录包括三个指向其三个边的记录的指针;边的记录有四个指针字段,包括两个指向相邻三角形记录的指针和两个顶点的记录的指针;也可以直接对每个三角形记录其顶点和相邻三角形。每个节点包括三个坐标值的字段,分别存储 X, Y, Z 坐标。这种拓扑网络结构的特点是对于给定一个三角形查询其三个顶点高程和相邻三角形所用的时间是定长的,在沿直线计算地形剖面线时具有较高的效率。当然可以在此结构的基础上增加其他变化,以提高某些特殊运算的效率,例如在顶点的记录里增加指向其关联的边的指针。

TIN 数字高程由连续的三角面组成,三角面的形状和大小取决于不规则分布的测点或节点的位置和密度。TIN 与高程矩阵方法不同之处是随地形起伏变化的复杂性而改变采样点的密度和决定采样点的位置,因而它能够避免地形平坦时的数据冗余,又能按地形特征点如山脊、山谷线、地形变化线等表示数字高程特征。

3. 等高线模型

等高线模型表示高程,高程值的集合是已知的,每一条等高线对应一个已知的高程值,一系列等高线集合和它们的高程值就构成了一种地面高程模型。

等高线通常被存成一个有序的坐标点对序列,可认为是一条带有高程值属性的简单多边形或多边形弧段。等高线模型只表达了区域的部分高程值,往往需要一种插值方法计算落在等高线外的其他点的高程,又因为这些点落在两条等高线包围的区域内,通常只使用外包的两条等高线的高程进行插值。

等高线通常可以用二维的链表存储。用图表示等高线的拓扑关系,是将等高线之间的区域表示成图的节点,用边表示等高线本身。此方法满足等高线闭合或与边界闭合、等高线互不相交两条拓扑约束。

4. 地形层次模型

地形层次模型(layer of details, LOD)是一种表达多种不同精度水平的数字高程模型。大多数层次模型基于不规则三角网模型,通常不规则三角网的数据点越多精度越高,数据点越少精度越低,但数据点多则要求更多的计算资源。如果在精度满足要求的情况下,最好使用尽可能少的数据点。地形层次模型允许根据不同的任务要求选择不同精度的地形模型。层次模型的思想很理想,但在实际运用中必须注意以下几个问题:

(1) 层次模型的存储问题,与直接存储不同,层次的数据必然导致数据冗余。

(2) 自动搜索的效率问题,例如搜索一个点可能先在最粗的层次上搜索,再在更细的层次上搜索,直至找到该点。

(3) 三角网形状的优化问题,如可以使用 Delaunay 三角剖分。

(4) 模型可能允许根据地形的复杂程度采用不同详细层次的混合模型,例如,对于飞行模拟,近处时必须显示比远处更为详细的地形特征。

(5)在表达地貌特征方面应该一致,例如,在某个层次的地形模型上有一个明显的山峰,在更细层次的地形模型上也应该有这个山峰。

1.2.3 地形模型应用要求

地形模型是地理信息系统(geographic information system, GIS)中最为重要的空间信息资料,是 GIS、遥感(remote sensing, RS)、虚拟现实(virtual reality, VR)等领域进行三维空间数据处理与地形分析的核心数据,是国家地理信息的基础数据之一。世界各主要发达国家纷纷建立了覆盖全国的地形数据库系统,我国也建立了基于 1:5 万、1:25 万、1:100 万地形图的全国地形数据库,其他类型的地形数据库也陆续在建。

地形模型最初是为了高速公路的自动设计提出来的。此后,地形模型被用于各种线路选线(铁路、公路、输电线)的设计,以及各种工程的面积、体积、坡度计算,任意两点间的通视判断及任意断面图绘制。在测绘中被用于绘制等高线、坡度坡向图、立体透视图,制作正射影像图及地图的修测。在遥感中可作为分类的辅助数据。地形模型还是 GIS 的基础数据,可用于土地利用现状分析、合理规划及洪水险情预报等。在军事上可用于导航、武器制导及电子沙盘制作等。对地形模型的研究包括精度问题、地形分类、数据采集、粗差探测、质量控制、数据压缩、地形模型建立与应用等。因此,地形模型具有广泛的应用前景与潜力。

随着人们对地理环境认识的不断深入,以及计算机技术、网络技术、GIS、虚拟现实等技术的飞速发展,地形模型也从二维面模型发展到三维体模型。地形模型可以对微地貌特征,例如洞穴、拱桥和突起等复杂地形进行精确的刻画,为三维可视化中一些特殊复杂地形的可视化显示提供了保障。同时地形模型作为 GIS 空间数据库的某个有特定结构的数据集合,已经被包含在 GIS 之中,成为它的核心部分的实体,为 GIS 进行空间分析和辅助决策提供了充实的便于操作的数据基础,是进行地形分析和科学决策的核心数据。所以地形模型数据质量的优劣直接决定着分析的质量和整个系统应用的成败。

地形模型的数据质量为用户选择符合应用需求的地理数据集的重要依据之一。确定地形模型的数据质量,掌握数据误差传播规律及调控机制,并对数据源的精度或质量及其建模方法提出要求,已成为 GIS 的一个重要理论和关键技术问题。例如,地形分析和精确定位对地形模型的要求越来越高,它们要求详细说明地形模型误差分析结果可靠性的影响、地形模型的适应性和限制性条件。但是,由于缺乏相应的地形模型质量控制理论和技术手段的支持,目前尚无法说清不同空间尺度地形模型所实际包含的地形信息容量和数据质量,无法在地形模型上加注具体的应用适应性及限制性标签。这直接影响了地形模型的应用效率与所提取地形信息的可信度,不同程度地妨碍了分析与应用结果的可信性。使得由地形模型生