

多维动态 GIS 空间数据模型与方法的研究

陈 军^{1, 3} 李志林^{2, 3} 蒋 捷¹ 朱 庆³

(1 国家基础地理信息中心, 北京市海淀区紫竹院百胜村 1 号, 100044)

(2 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港九龙红磡)

(3 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要:以地理空间实体及其相互间关系的抽象、表达与组织为主线, 从三维、时空、尺度等角度出发, 进行了多维动态空间数据模型研究。介绍了该项研究在空间铺盖建模、空间关系理论、多维建模、时空与动态建模、多尺度建模等方面取得的成果。

关键词: 多维; 动态; 空间数据模型

中图法分类号: P208

现实世界地理空间三维实体及其时空变化对应着一个多维动态地理信息空间。该空间是传统欧几里德空间的扩展, 其中多维分量包括高程、比例尺、专题和时态, 而动态特征则体现在空间目标、空间过程、空间铺盖 3 个不同层面上^[1]。

1 空间铺盖建模

早期人们主要是研究点状目标的 Voronoi 图生成算法, 近些年来逐步发展到研究线、曲线、面与混合目标的 Voronoi 图生成算法。针对矢量生成算法的局限性, 笔者提出了基于动态距离变换的平面 Voronoi 图栅格建模方法、平面 Voronoi 图的动态与层次生成算法、球面 Voronoi 图构造算法和一种顾及线状障碍物的可视最短路径 Voronoi 图建模方法。

Voronoi 图空间铺盖的第一种构建方法是, 针对 Voronoi 边界是距空间物体等距离点的轨迹和栅格 Voronoi 图建立关键在于栅格距离对欧氏距离的逼近程度这一本质, 发展了一种基于数学形态学的动态距离变换方法, 动态地选择形态结构元素, 自动地使每次扩张后的栅格距离最逼近欧氏距离, 所生成的 Voronoi 图误差控制在 1 个像素左右。这一新方法能方便地生成点、线、面目标

的 Voronoi 图, 解决了在矢量空间中线状与面状目标 Voronoi 图生成困难这一问题^[2]。

第二种方法是针对采用距离变换一次性构建 Voronoi 铺盖往往难以有效地支持动态应用环境问题, 笔者提出了基于活动像素主动生长技术的 Voronoi 图动态及层次的栅格构造方法, 该方法只需要扫描那些有可能改变其邻居的标识值的像素, 因而可以有效地实现 Voronoi 图的动态生成与维护, 从而为空间关系的计算奠定基础^[3]。

第三种方法是球面 Voronoi 图构造算法。由于平面空间和球面空间在集合上的不同胚性, 无法把平面栅格的 Voronoi 图生成算法直接推广到球面空间, 笔者利用球面四元三角网(QTM)剖分, 依据 Voronoi 图的定义, 研究了球面 Voronoi 图的格网可构造算法, 按照六边形的膨胀操作算子进行球面格网距离变换, 即采用邻近像元的局部距离近似代替“最大圆距离”, 按六边形向外膨胀, 从而直接在球面空间中求解空间目标的 Voronoi 图^[4]。

第四种方法是针对可视最短路径 Voronoi 图构造的对偶生成法和直接修正法, 笔者提出了分段剖分、整体剖分和统一剖分的修正思路, 放宽了以往修正法中障碍物端点必为生长点的限制; 研究了无公共边、公共边自身相交、公共边与辅助边

或障碍物边相交三种情形及其处理方法,提出了能有效处理公共边的分簇算法和最适搜索算法,实现了在有限制的线状障碍物下对 Gold 的普通 Voronoi 图的有效修正^[3]。

通过研究铺盖数据模型的有关基本理论问题和生成算法,笔者提出了空间铺盖的分类体系,并指出了栅格铺盖的拓扑不完备性。其中空间铺盖的分类体系是将空间铺盖分成基于空间(space-primary tessellation, SPT)和基于要素(feature-primary tessellation, FPT)两大类。基于空间铺盖又分为带约束和无约束两类。带约束的铺盖又可以是层次的或非层次的。不管是带约束或无约束的铺盖,它们都可以是规则的或不规则的^[6]。而通过栅格空间铺盖的理论分析发现,栅格并不具备一些矢量所具备的拓扑特性,这称之为伪拓扑(quasi-topology)特性^[7]。

2 空间关系建模

自 1991 年国际上提出经典的 9 交模型以来,人们一直用其研究拓扑关系。但该模型在理论上有许多缺陷,导致许多概念上的混淆,并产生许多拓扑悖论。笔者对这一问题作了深入探讨,发现了两大问题。第一个问题是三个变量(内部、边界、外部)之间的线性相关性;第二个问题是将一维空间中中线边界的定义错误地推广到二维空间。此外,笔者对栅格空间的拓扑也进行了理论分析^[8]。

目前国际上用于描述空间关系的 9 元组模型(9-intersection model)是将空间目标分解为边界、内部和外部,通过比较两个空间目标之间边界、内部和外部相交情况,分析确定两者之间存在的空间关系。研究发现了其用“补”定义空间目标外部带来的理论缺陷,即三个变量线性相关,难以计算目标的外部,无法区分相邻关系,难以处理空洞问题等,因此提出了一种用目标的 Voronoi 区替代“补”形成的基于 Voronoi 区的 9 交模型(V9I),解决了原模型三个变量(内部、边界、外部)线性相关问题,使空间关系描述更为合理且易于操作^[9\ 1]。对 V9I 进行完善与扩展,进而发展了一个空间关系通用代数算子。它是利用空间目标整体及其 Voronoi 区域为基本元素,以多种集合运算来构造空间关系代数算子,以多种集合运算的取值(即空/非空、维数与连通数、面积、长度及其组合)来判断空间关系。由于该方法结合了基于分解与基于整体两类方法的优点,不仅克服了现有空间关系

计算方法理论上的不足,而且可以更方便地同时从多个角度量测空间关系的定量与定性信息,增强了综合性、可计算性与可操作性^[10]。在此基础上,针对空间目标间的序关系,提出了基于 Voronoi 距离的 k 阶空间邻近计算模型,包括波浪法、对向法与穿越法三种计算方法,为空间关系研究提供了一种定性定量相结合的方法^[11]。

在三维拓扑关系和时空拓扑关系描述方面,本研究先是提出了一种基于维数量度的三维空间拓扑关系描述框架,它是在 Clementini 的维数扩展法基础上,考虑了三维体状目标与零维、一维和二维目标之间的交集,使维数扩展法所描述的交集维数由原来的 $\Phi(\delta, 0, 1)$ 扩展为 $(\delta, 0, 1, 2, 3)$ ^[12]。然后根据三维空间实体与 k -单纯形间的构造关系,用单纯形间拓扑关系的组合去表达任意两个空间实体间的相互关系,提出了用于三维空间实体间拓扑关系的空间关系矩阵^[13]。同时,研究了空间拓扑关系随时间渐变和突变的基本规律,给出了时态拓扑关系的点集拓扑理论描述及其等价的逻辑谓词描述,提出了一种能完备、惟一地描述时态拓扑关系的 4I 框架^[14];还通过分析总结土地划拨过程中父子地块间存在的空间相交性和时间相接性,提炼出了反映父子地块间关系的时空约束条件,设计了相应的时空查询算法^[15]。

3 三维数据建模

在三维数据模型研究方面,笔者给出了基于 k -维伪流形的三维空间实体的语义定义,它是将三维空间实体定义为一个可定向的 k -维伪流形($0 \leq k \leq 3$),对应于一个紧致、连通的 n -维流形或者是具有一个或多个 n -维流形边界的紧致连通的 $n+1$ -维流形($0 \leq n \leq 2$),在几何上可划分成若干个 k -单纯形($k \leq 3$)^[16]。在表达 k -单纯形($0 \leq k \leq 3$)之间关系的基础上,定义了三维点、线、面、体空间目标与 k -单纯形间的构成关系,提出了一个顾及空间剖分的三维拓扑 ER 模型^[17]。在此基础上,针对城市三维实体的几何特征及 3DCM 系统要求,提出用外表面表示体状实体,用 TIN 对面状和体状实体进行统一表达,并用单纯形作为三维实体的基本要素,从而归纳导出了基于表面剖分的 3DCM 空间数据模型,研究了其数据组织与管理^[18];还针对立交桥的表达问题,提出了用路面边线数据对立交桥空中路面进行全约束点的 TIN 剖分思想及算法,研究了相应的可视化方法^[19]。

就地表模型的2.5维建模(DEM)而言,笔者用实验方法研究了不同采样间隔下DTM精度的变化以及地形特征点对DTM精度的影响。对从格网与等高线数据中生成的DTM的精度进行了比较研究,发展了基于采样密度及地形坡度来预测DTM精度的数学模型^[20]和预测数据压缩引起的精度损失的数学模型^[21]。

4 时空与动态数据建模

在时空建模方法方面,通过分析土地分化的实例,提出了用非第一范式关系表达时态属性变化的方法,它是通过时间规范化,将非第一范式中诸属性分为静态属性、同时性动态属性和非同时性动态属性组,用双向指针实现当前值与最近历史值链接^[22];继而分析研究了地块划拨的时空过程中空间实体及相互间关系随时间变化的情况,提出了一个顾及时态地块的扩展时空复合模型^[23];然后进一步研究了土地划拨时空过程中主体、事件、时空目标状态之间的因果关系,提出了一种集成表达主体、事件、时空目标状态及其间因果关系的IAESM模型,研究了复合事件的构成及事件序列发生的形式化描述表达方法^[24],并以土地划拨群体协同工作系统为例,提出了“事件驱动”的GIS协同工作系统设计方法^[25]。此外,还针对时空数据建模中存在的时空语义模糊的问题,分析研究了时间概念与时空概念,笔者提出了时间尺度和事件序列两种时间概念模型,并针对事件序列的时间性概念模型,研究了基本地理事件及其抽象数据类型,并引进元组、集合、序列、时态对象构造子,对各种时态对象结构进行了形式化定义^[26-27]。

通过对基于Voronoi图的动态空间数据模型的研究,笔者提出了蕴含最近邻近关系的Voronoi E-C-R空间数据模型,它定义立即邻近、侧向邻近和穿越邻近,将VORDLL描述的点、半线级的最近邻近关系扩展到简单点、线、面空间数据类型^[28];以QTM层次结构为基础,结合球面Voronoi图的局部稳定性特征,把球面空间和球面实体有机地融合起来,构建了一个具有层次性的球面动态数据模型,提出了经纬度坐标与QTM格网地址码的快速转换算法、球面空间数据的层次存储结构和动态索引机制等;针对二维空间数据库网格点线集存在的级联更新问题,利用Voronoi K阶邻近的概念,限制级联更新所产生的扰动的范围,从而大大减少了可能产生的线段

的数目,简化了事务的管理;将二维离散空间推广到三维离散空间,定义了三维的网格点线集,并在三维网格点线集基础上定义了块、环(平面环和非平面环)、面、壳、体的概念,这些概念可以用来表示三维空间实体(即三维的空间数据类型)^[29]。此外,还针对目前地理信息系统空间设施布局分析的局限性,提出了基于Voronoi图的设施布局选址方法^[30]。

5 多尺度空间数据建模

尺度问题是许多学科(包括空间信息科学)中最重要但至今尚未解决的问题之一。我们用泛系的观点对栅格作了分析,栅格的大小代表了尺度轴上的相对性,栅格与矢量间存在三个映射关系^[31]。通过对尺度理论的概括分析,提出了尺度谱的概念,区分了欧氏空间和地理空间中的尺度,并讨论了尺度和分辨率之间的关系^[32]。基于该理论背景,研究了空间数据集成中的尺度问题,将空间信息集成分成两类,即同类数据的集成和不同类型数据的集成,并针对前者讨论了垂直集成和水平集成方面的问题。同时还研究了空间数据更新中的尺度问题,给出了相应的理论和策略,讨论了其中的关键问题。

在空间数据的多尺度表达的操作算法方面,李志林等发现了多尺度表达的一个“自然规则”^[33],描述了近看具体、远看抽象的现象:“在一给定的尺度,存在着一个范围(模糊圆),在这个模糊圆里,所有的空间变化都会消失。”由此推知:“在一给定的比例尺,可算出模糊圆的尺寸,将模糊圆里的所有信息都忽略而用一个点来表达后,便自然地达到综合的效果。”该“自然规则”为空间现象的客观表达提供了理论依据。李志林继而发现可以用数学形态学算子很好地描述自然规则,发展了一组基于该规则的数字地图综合操作算法,如线要素与等值线综合概括^[34]、要素移置^[35]、面收缩^[36-37]、道路综合^[38]等,线要素概括是在此类算法中惟一可以避免空间冲突的算法^[39]。

6 结 语

将地理空间信息融入国家信息化和知识经济的主体,为资源环境问题研究提供高技术手段,形成新的经济生长点,提高国家安全能力,是今后国际社会的重要发展方向之一。这必将对三维、时态、动态、多尺度地理空间数据及其建模、分析方

法提出迫切要求。为此,需要进一步加强对多维动态地理信息机理与框架的研究,包括现实世界及其时空变化的多维动态特征描述,多源地理空间信息的时空定位基准,多维动态空间数据框架模型及建模方法,地理空间认知与多维动态空间信息作用机理等研究,为设计和生产三维框架数据、无显式拓扑的框架数据、移动服务框架数据、多尺度框架数据、全球框架数据等提供理论方法,同时发展真三维 GIS、多比例尺数据协同与增量更新系统、无拓扑动态 GIS 等新一代多维动态 GIS 平台。

参 考 文 献

- 1 Chen J, Li Z L, Jiang J. Dynamic and Multi-dimensional GIS: an Overview. Proceedings of the 3rd ISPRS Workshop on Dynamic and Multi-dimensional GIS, Bangkok, Thailand, 2001
- 2 Li C M, Chen J, Li Z L. A Raster-based Algorithm for Computing Voronoi Diagrams of Spatial Objects Using Dynamic Distance Transformation. International Journal of Geographical Information Science, 1999, 13(3): 209 ~ 225
- 3 Zhao R L, Li Z L, Chen J, et al. A Hierarchical Raster Method for Computing Voronoi Diagrams Based on Quadtree. In: Sloot P, Tan C, Dongarra J, eds. Berlin: Springer-Verlag, 2002
- 4 Chen J, Zhao X S, Li Z L. An Algorithm for the Generation of Voronoi Diagrams on the Sphere Based on QTM. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003, 69(1): 79 ~ 90
- 5 李武龙, 陈 军. 线状障碍物的可视最短路径 Voronoi 图生成. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(2): 132 ~ 136
- 6 Lee Y C, Li Z L, Li Y L. Taxonomy of Space Tessellation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 55: 139 ~ 149
- 7 Li Y L, Li Z L, Chen Y Q, et al. Using Raster Quasi-topology as a Tool to Study Spatial Entities. The International Journal of Systems and Cybernetics, 2003, 32: 1 425 ~ 1 449
- 8 Li Z L, Li Y L, Chen Y Q. Basic Topological Models for Spatial Entities in Three-Dimensional Space. Geoinformatica, 2000, 4(4): 419 ~ 433
- 9 Chen J, Li C M, Li Z L, et al. A Voronoi-based 9-Intersection Model for Spatial Relations. International Journal of Geographical Information Science, 2001, 15 (3): 201 ~ 220
- 10 Li Z L, Zhao R L, Chen J. A Voronoi-based Spatial Algebra for Spatial Relations. Progress in Natural Science, 2002, 12(7): 528 ~ 536
- 11 Zhao R L, Chen J, Li Z L. K-Order Spatial Neighbors Based on Voronoi Diagram: Description, Computation and Application. ISPRS Technical Commission IV, Ottawa, 2002
- 12 郭 薇, 陈 军. 基于点集拓扑学的三维空间拓扑关系形式化描述. 测绘学报, 1997, 26(2): 122 ~ 127
- 13 陈 军, 郭 薇. 三维空间实体间拓扑关系的矩阵描述. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4): 359 ~ 363
- 14 舒 红, 陈 军, 杜道生, 等. 时空拓扑关系定义及时态拓扑关系描述. 测绘学报, 1997, 26(4): 299 ~ 306
- 15 常 征, 陈 军. 顾及地块时空特点的地籍数据组织及查询. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(3): 216 ~ 221
- 16 郭 薇, 陈 军. 基于流形拓扑学的三维空间实体形式化表达. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(3): 201 ~ 206
- 17 陈 军, 郭 薇. 基于剖分的三维拓扑 ER 模型研究. 测绘学报, 1998, 27(4): 308 ~ 317
- 18 孙 敏, 陈 军, 张学庄. 基于表面剖分的 3DCM 空间数据模型研究. 测绘学报, 2000, 29(3): 257 ~ 265
- 19 Chen J, Sun M, Zhou Q M. Expression and Visualization of Cloverleaf Junction in a 3D City Model. Geoinformatica, 2000, 4(4): 375 ~ 386
- 20 李志林, 朱 庆. 数字高程模型. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000
- 21 Li Z L, Lam Kit, Li C M. Effect of Compression on the Accuracy of DTM. Geographic Information Science, 1998, 4(1/2): 37 ~ 43
- 22 陈 军, 陈尚超, 唐治锋. 用非第一范式关系表达 GIS 时态空间数据. 武汉测绘科技大学学报, 1995, 20(1): 12 ~ 17
- 23 乐燕芬, 陈 军. 顾及时态地块的土地划拨时空数据组织. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(3): 222 ~ 228
- 24 蒋 捷, 陈 军. 基于事件的土地划拨时空数据库若干思考. 测绘学报, 2000, 29(1): 64 ~ 70
- 25 Chen J, Jiang J. An Event-based Approach to Spatio-temporal Data Modeling in Land Subdivision System for Spatio-temporal Process of Land Subdivision. Geoinformatica, 2000, 4(4): 387 ~ 402
- 26 舒 红, 陈 军, 杜道生. 时空对象结构的代数模型. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(2): 137 ~ 140
- 27 舒 红, 陈 军, 杜道生, 等. 面向对象的时空数据模型. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(3): 229 ~ 233
- 28 陈 军, 崔秉良. 用 Voronoi 方法为 MapInfo 扩展拓扑功能. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(3): 195 ~ 200
- 29 Zhang Y, Zhou L Z, Chen J, et al. K-Order Neighbor: the Efficient Implementation Strategy for Restricting Cascaded Update in Realm. Lecture Notes in Computer Science-Computational Science-ICCS Amsterdam,

- 2002
- 30 陈军, 赵仁亮, 乔朝飞. 基于 Voronoi 图的 GIS 空间分析研究. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28 (特刊): 32~37
- 31 Li Y L, Li Z L, Chen Y Q, et al. Raster Space with Relativity. The International Journal of Systems and Cybernetics 2003, 32(5/6): 629~639
- 32 李志林. 空间数据集成与多尺度表达的尺度问题. 见: 陈军, 邬伦. 数字中国数据框架. 北京: 科学出版社, 2003
- 33 Li Z L, Openshaw S. A Natural Principle for Objective Generalisation of Digital Map Data. Cartography and Geographic Information Systems 1993, 20(1): 19~29
- 34 Li Z L, Sui H G. An Integrated Technique for Automated Generalisation of Contour Maps. The Cartographic Journal 2000, 37(1): 29~37
- 35 LI Z L, Su B. Some Basic Mathematical Models for Feature Displacement in Digital Map Generalization. Proceedings of ICC 97, 1997
- 36 Su B, Li Z L, Lodwick G. Algebraic Models for Collapse Operation in Digital Map Generalization Using Morphological Operators. Geoinformatica 1998, 2(4): 359~382
- 37 Su B, Li Z L, Lodwick G, et al. Algebraic Models for the Aggregation of Area Features Based on Morphological Operators. International Journal of Geographical Information Science, 1997, 11(3): 233~246
- 38 Li Z L, Choi Y H. Topographic Map Generalization: Association of Road Elimination with Thematic Attributes. The Cartographic Journal 2002, 39(2): 153~166
- 39 Weibel R. A Typology of Constraints to Line Simplification. Proceedings of SDH 96, 1996
- 第一作者简介: 陈军, 教授, 博士生导师, 主要从事多维动态 GIS、空间决策支持系统等研究。
E-mail: chenjun@nsdi.gov.cn

Dynamic and Multi-dimensional Spatial Data Modeling: Models and Methods

CHEN Jun^{1,3} LI Zhilin^{2,3} JIANG Jie¹ ZHU Qing³

(1 National Geomatics Center of China, 1 Baishengcun, Zizhuyuan, Haidian District, Beijing 100044, China)

(2 Department of Land Surveying and Geo-informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong)

(3 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: This paper reviews and introduces the major research progress on spatial tessellation, spatial relation, multi-dimensional data modeling, spatio-temporal and dynamic data modeling, multi-scale data modeling. The challenging issues of dynamic and multi-dimensional GIS are briefly discussed.

Key words: multi-dimensional; dynamic; spatial data model

About the first author: CHEN Jun professor, Ph. D supervisor. His recent research interest includes multi-dimensional and dynamic spatial modeling, spatial decision support, etc.

E-mail: chenjun@nsdi.gov.cn

(责任编辑: 涓涓)