

GIS Voronoi邻近方法

李佳田 林 艳 赵伶俐 著



科学出版社

GIS Voronoi 邻近方法

李佳田 林 艳 赵伶俐 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以 Voronoi 图构建、Voronoi 邻近提取及 Voronoi 邻近支持下的空间分析为主线,系统地总结了 GIS Voronoi 邻近方法的研究现状与发展趋势。主要包括:反向膨胀 Voronoi 图、变速 Voronoi 图、全要素 Voronoi 图、层次 Voronoi 图,平面与球面 Voronoi 邻近提取, Voronoi 邻近在拓扑空间关系计算、地理注记概括、点群综合、变比例尺地图、地标提取、空间聚类与空间插值中的应用。

本书可供地理信息科学、计算机科学以及相关专业的科研人员、研究生与高年级本科生阅读,同时也可供相关领域的软件设计及开发人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

GIS Voronoi 邻近方法 / 李佳田, 林艳, 赵伶俐著. —北京: 科学出版社, 2016.2

ISBN 978-7-03-047196-3

I. ①G… II. ①李… ②林… ③赵… III. ①地理信息系统-空间测量-测量方法 IV. ①P208

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 012804 号

责任编辑: 杨 红/责任校对: 何艳萍

责任印制: 徐晓晨/封面设计: 迷底书装

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 2 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 2 月第一次印刷 印张: 12 3/4

字数: 322 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

Voronoi 图是一种重要的空间剖分结构,这种结构将空间邻近隐含在其中,蕴含许多有趣而惊人的数学性质。利用 Voronoi 图可以有效地进行空间邻近分析与计算,对地理信息科学(geographic information science, GIS)空间关系模型与空间分析方法具有显著的支撑作用。早在 GIS 技术诞生之前 Voronoi 图便是计量地理的重要几何分析方法,20 世纪 80 年代后期,加拿大学者 C.M.Gold 等首先将 Voronoi 图应用于 GIS 研究。一般而言,学术界普遍的观点是将空间剖分、Voronoi 邻近与势力范围作为 Voronoi 图的主要性质,其中,Voronoi 邻近又被称为自然邻近,它可以同时表达空间拓扑关系与度量关系,完善空间邻近的定义。

笔者以 GIS、数学、计算机科学等领域的先进成果为理论依据,总结课题小组近年来的研究成果,以 Voronoi 邻近为主题,按照计算顺序,以 Voronoi 图及其构建算法、Voronoi 邻近提取方法及 Voronoi 邻近应用三个方面为重点进行阐述。

Voronoi 图及其构建算法部分包括:Voronoi 图反向膨胀构建算法、变速 Voronoi 图及其构建算法、全要素 Voronoi 图构建算法、加权 Voronoi 图生成算法、层次 Voronoi 图及其构建算法。Voronoi 邻近提取方法部分包括:平面 Voronoi 邻近提取方法与球面 Voronoi 邻近提取方法。Voronoi 邻近应用部分包括:拓扑空间关系计算、地理注记评价、点群综合、变比例尺地图方法、地标提取、空间聚类与 DEM 内插。需要说明的是,要将 Voronoi 邻近的定义与计算分开来对待,因此,本书部分章节的叙述是以 Voronoi 图的对偶结构——Delaunay 三角网展开的。读者对象主要为从事 GIS、测绘、地学、计算机等相关领域的科研人员及硕士、博士研究生。

本书完成之际,笔者首先感谢导师陈军教授、赵仁亮高工与赵学胜教授多年来的指导与帮助。导师严谨的治学态度、敏锐的学术洞察力使我终生受教。

本书研究工作主要是在国家自然科学基金(41561082、41161061、41301442)资助下完成的。感谢昆明理工大学国土资源工程学院测绘系研究生所做的实验工作与校对工作,他(她)们是李佳、段平、余莉、王华、李锐、何育枫、蒲海霞、康顺、赵海、李晓娟、张峰奇、张蓝、徐珩、贺飞越、徐燕竹、王红梅、罗富丽、杨琪莉、罗辉兰、李显凯、李应芸、钱堂慧、李果家、贾成林、鲁强、牛一如。

感谢家人的支持与关爱。

由于笔者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请各位读者批评指正。

李佳田

2015 年 11 月 28 日

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 空间邻近概述	1
1.2 不同数据模型中的空间邻近	2
1.3 国内外相关问题研究现状及分析	5
1.4 各章节安排	7
第二章 基于线性四叉树结构的 Voronoi 图反向膨胀生成方法	11
2.1 普通 Voronoi 图	11
2.2 栅格方法中的生长模拟问题	11
2.3 线性四叉树结构与反向膨胀的计算原理与模型	12
2.4 实验与分析	20
2.5 本章小结	26
第三章 变速 Voronoi 图及其算法	27
3.1 问题的提出	27
3.2 变速 Voronoi 图	28
3.3 变速 Voronoi 构建算法	30
3.4 实验与分析	33
3.5 本章小结	35
第四章 全要素 Voronoi 图及其算法	37
4.1 问题的提出	37
4.2 NP 问题的有限差分近似解	38
4.3 分解合并算法	39
4.4 实验与分析	43
4.5 本章小结	46
第五章 基于四叉树结构的加权 Voronoi 图生成算法	47
5.1 加权 Voronoi 图	47
5.2 基于四叉树结构的加权 Voronoi 图膨胀算法	49
5.3 实验与分析	52
5.4 本章小结	53
第六章 层次 Voronoi 图及其算法	54
6.1 问题的提出	54
6.2 层次 Voronoi 图	55
6.3 实验与分析	60

6.4 本章小结	60
第七章 平面 Voronoi 邻近表达结构与提取方法	61
7.1 自然邻近探测与空间索引之间的矛盾	61
7.2 自然邻近探测的相关计算方法	63
7.3 Units Delaunay 结构	65
7.4 Quad Gridfile 空间索引	71
7.5 实验与分析	75
7.6 本章小结	79
第八章 球面 Delaunay 邻近表达结构与提取方法	80
8.1 球面 Delaunay 图的基本定义	80
8.2 透视投影算法描述	82
8.3 实验与分析	85
8.4 本章小结	86
第九章 Voronoi 邻近拓扑空间关系计算模型	87
9.1 邻近关系提取对拓扑空间关系计算方法的“依赖”	87
9.2 基于 CDT 的空间目标描述	88
9.3 CDT 中顾及序的空间目标基本定义与空间目标间映射	96
9.4 实验与分析	98
9.5 本章小结	103
第十章 地理注记邻域概括模型	105
10.1 问题的提出	105
10.2 宽泛地理注记	105
10.3 投放模型	106
10.4 实验与分析	111
10.5 本章小结	112
第十一章 层次 Voronoi 图点群综合模型	114
11.1 点群	114
11.2 点群分布	114
11.3 制图综合	115
11.4 点群概括	116
11.5 Voronoi 地图制图综合	117
11.6 层次 Voronoi 点群综合	119
11.7 实验与分析	123
11.8 本章小结	124
第十二章 Voronoi 邻近变比例尺自适应方法	125
12.1 变比例尺可视化	125
12.2 变比例尺地图表达	127
12.3 Voronoi 邻近选择	131

12.4	变比例尺均衡性控制·····	134
12.5	变比例尺易读性控制·····	136
12.6	实验与分析·····	141
12.7	本章小结·····	143
第十三章	Voronoi 邻近地标提取模型 ·····	144
13.1	地标提取·····	144
13.2	地物显著性因素·····	149
13.3	地标层次化描述·····	153
13.4	实验与分析·····	156
13.5	本章小结·····	159
第十四章	Voronoi 邻近空间聚类方法 ·····	160
14.1	空间聚类的瓶颈与自然邻近表达·····	160
14.2	SCBNA 算法的原理与构建·····	162
14.3	实验与分析·····	167
14.4	本章小结·····	176
第十五章	Voronoi 邻近空间内插 ·····	177
15.1	基于自然邻近的插值·····	177
15.2	基于自然邻近的拟合·····	182
15.3	DEM 数据转换技术与可视化·····	185
15.4	本章小结·····	189
参考文献	·····	190

第一章 绪 论

地理空间实体及其分布,是人们从个体到整体、从特殊到一般地认识与理解地理空间的基本过程。作为地理信息科学(geographic information science, GIS)不可缺少的重要组成部分,空间关系与空间分析正是以这两方面为研究目标。研究方法上,通常以相交(intersection)为条件来界定实体之间的位置关系,而实体目标通常表现为相互离散的位置分布,因此,需要以实体目标为基准辅以度量方法来计算与探测位置关系——空间邻近(spatial adjacency)。在拓扑空间关系计算模型、空间内插、空间查询、空间概括等方面空间邻近表现出许多更加优越的作用。

1.1 空间邻近概述

空间邻近是地理空间信息科学领域一个极其重要的研究内容。正如 Gold(1992a)指出,空间邻近是地理信息系统、心理学、语言学、人工智能、图像处理、模式识别等领域内一个经常使用的概念,并起着十分重要的作用。例如,在机器视觉中,特征点的结构化描述需要使用邻近像素,类似地,图像滤波过程的待估值像素也要依赖其邻近像素进行估计;在机器人路径识别中,需要对障碍物的所有邻近目标进行探测;在文本分析中,需要根据邻近词汇提取关键词或是进行文本概括。国内外学者从不同方面针对自身研究领域的空间邻近进行了丰富的研究。

空间邻近的内涵十分丰富,它既可以指真实世界中地理实体之间的位置关系,如中国与日本在地理位置上是邻近关系,也可以指抽象与逻辑上的邻近,如 Egenhofer(1993)指出拓扑关系邻接图是空间关系概念之间的一种邻近关系。从空间关系分类的角度来讲,它既包含距离意义,又有拓扑意义上的性质(赵仁亮, 2002)。因此,与其他拓扑空间关系不同,虽然许多学者将其归为拓扑关系的一种,但是非常明显,邻近含有度量上的意义,如 near、close 等均与距离有关(Frank, 1992)。空间邻近可分为近、中、远三个等级,进而可以分为很近、近、适中、远、很远五个等级。另一个不同的地方是邻近带有模糊性,它受比例尺、认知心理等很多因素的影响,往往与所在的应用环境有关(Gahegan, 1995)。人们在解决问题的时候为了避免问题的复杂性往往只考虑其中的一个部分或是某一方面,而将度量与拓扑等因素结合起来进行综合考虑的研究则很少。也正是由于这个原因,虽然空间邻近概念在许多研究领域内频繁出现,但是它的定义、描述与表达仍然繁杂不一(李成名, 1998),而且许多领域内的研究者在使用这一概念时并没有给出严格的定义与描述,关于邻近的含义是模糊的(Gold, 1992b)。

在地理信息科学领域,空间邻近具有重要作用,并已在许多方面得到应用。在空间数据挖掘中,以距离定义的强邻近(strong-adjacency)与弱邻近(weak-adjacency)关系被用来提取等温线(Huang and Zhao, 1999);在地表建模与插值方法中,插入点的值取决于与其邻近的生成源的值,以此为基础发展出自然邻近插值(natural neighbours, NN)及地统计学(geostatistics)

分析等方法。在地图综合中, 邻近关系已被用于空间冲突探测、相邻判别、对象移位与群点化简(Gold, 1992c); 在空间认知中, 邻近空间关系是一种重要研究方法; 在空间分析中, 邻近关系被用于最短路径识别; 在空间查询语言中, 邻近关系可以有效地解决一系列邻近查询问题(Okabe et al., 1994), 增加空间查询功能, 以及为现有缺少拓扑关系表达的 GIS 扩展查询及分析功能(陈军, 2002)。

1.2 不同数据模型中的空间邻近

1.2.1 栅格数据模型中的邻近

空间被剖分为规则且互不重叠的像元(pixel), 一组属性相同的像元即构成了一个栅格目标(raster object)。在栅格模型中邻近空间关系的定义是明确的, 栅格目标之间的邻近(adjacency)是通过像元间邻域(neighbor)关系表达的, 边界像元有邻域关系的两个目标存在邻近关系。根据相邻像元的位置, 邻域被定义为 4 邻域和 8 邻域两种类型。位于坐标 (x, y) 的一个像元 p 有 4 个水平和垂直的相邻像元, 其坐标由下式给出(Paul et al., 2002):

$$N_4(p) = \{(x, y) \mid (x+1, y), (x-1, y), (x, y+1), (x, y-1)\}$$

这个像元集合称为 p 的 4 邻域, 用 $N_4(p)$ 表示。 p 的 4 个对角相邻单元有如下坐标:

$$N_D(p) = \{(x, y) \mid (x+1, y+1), (x+1, y-1), (x-1, y+1), (x-1, y-1)\}$$

并用 $N_D(p)$ 表示。它与 4 邻域一起叫做 p 的 8 邻域, 用 $N_8(p)$ 表示,

$$N_8(p) = N_4(p) \cup N_D(p)$$

虽然像元之间的邻近关系是明确的, 但如果用栅格目标近似空间目标就会出现不确定的情况, 如随着像元大小变小, 栅格目标就越接近空间目标, 可使原来有邻近关系的两个空间目标变为相离关系(disjoint)(图 1.1)。

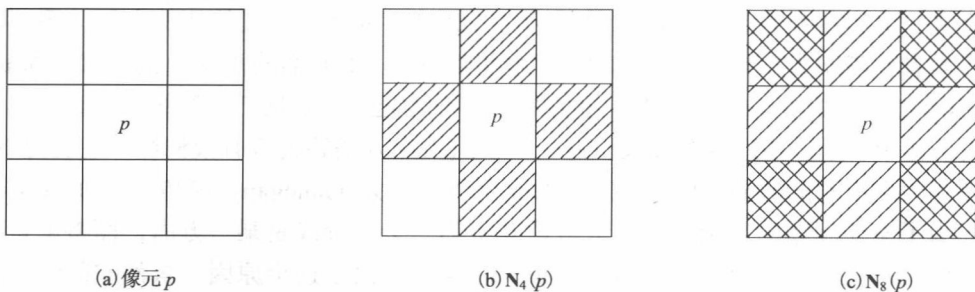


图 1.1 栅格模型中的邻域

1.2.2 矢量模型中的拓扑毗邻(neighborhoods)关系

如果空间对象集可构成平面的一种铺盖(tessellation), 那么可用平面图的方法去考察空间对象, 邻接关系存在于结点、边和网眼之间, 在制图综合中, 将这种邻接关系称为毗邻关系。通过将结点、边和面域的毗邻关系作为基本关系, 可以进行简单及复合拓扑查询(图 1.2)。

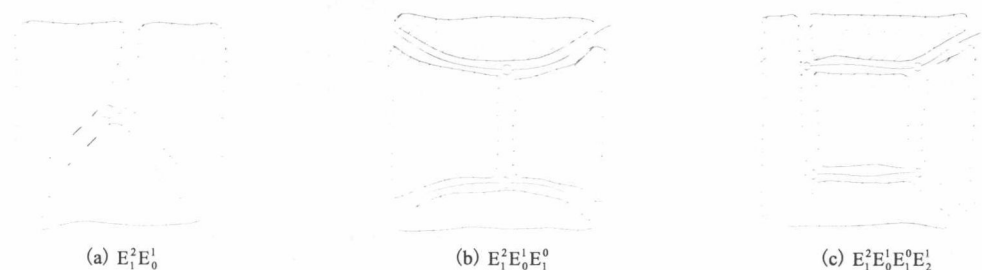


图 1.2 结点、边与面域的基本毗邻关系(毋河海和龚健雅, 1997)

基本毗邻关系对于矢量图形元素处理的意义在于, 当某一中心元素改变时, 那些要随之一同改动的图形元素已准确地被基本毗邻关系描述。作为一种固定与精确的拓扑关系, 它在 ESRI 的 Coverage 数据结构中实现, 特点是查询速度快。然而, 这种显式表达的拓扑关系缺少动态性与灵活性, 数据结构的维护过程复杂。因此, 其应用性能受到很大限制(毋河海和龚健雅, 1997)。

1.2.3 矢量模型中的距离邻近(distance adjacency)关系

如果空间目标不是对空间的一种铺盖, 最为简单的方法就是基于距离的度量方法, 一般是用欧氏距离(Euclidean distance)定义空间目标之间的邻近关系, 即当两目标满足所给定的距离时为邻近关系。这里以最近邻近(nearest neighbor)、 n 最邻近(n nearest neighbors)为例加以说明。

最近邻近的定义如下: 目标集合 S 与 q , $\exists p_i \in S$, $\forall p \in S$, 如果 $\text{dist}(p_i, q) \leq \text{dist}(p, q)$, $p \neq p_i$ 成立, 称 p_i 是 q 的一个最近邻近(周培德, 2008)。

n 最邻近的定义如下: 目标集合 S 与 q , $S' \subseteq S \wedge |S'| = n$ 。如果对于 $\forall p \in S, \forall p' \in S', \text{dist}(p', q) \leq \text{dist}(p, q)$ 成立, 称 S' 是 q 的 n 最邻近(Song and Roussopoulos, 2001)。

距离邻近是一种定量的关系, 通常情况下较易获得, 而邻近关系则是一种定性的关系, 因此, 这种方法所定义的邻近关系需要从定量到定性的转换。

距离邻近关系存在以下不足。

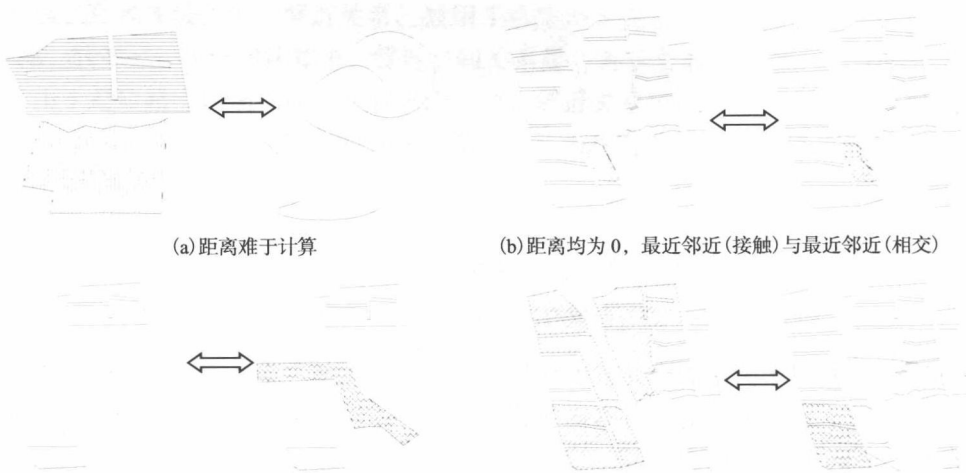
(1) 距离并非总是易于计算, 如处理复杂的线目标与面目标时, 有时是困难与复杂的, 如图 1.3(a) 所示。

(2) 距离并非总是易于解释, 如当两目标相接(touch)与相交(intersect)时, 距离值都是 0, 如图 1.3(b) 所示, 语义信息不明确。

(3) 距离有时并不能有效地表达两目标之间的邻近情况, 如图 1.3(c) 所示, 两目标距离值在两种情况中相同, 但第二种情况在两目标之间存在着空间目标将它们隔开。

(4) 距离邻近查询有时会产生误导, 如图 1.3(d) 所示, 在线目标的 10 最近查询结果中有 3 目标与其不可视, 可能引起新的更加复杂的查询问题。

(5) 距离度量方法不符合人的认知习惯且存在地图坐标系、比例尺等诸多因素的影响。



(a) 距离难于计算

(b) 距离均为 0，最近邻近(接触)与最近邻近(相交)

(c) 距离相同但邻近有所不同，难于解释

(d) 线目标的 10 最邻近结果，其中 3 目标与查询目标不可视

图 1.3 距离邻近的不足之处

1.2.4 栅矢混合模型中的 Voronoi 邻近关系 (Voronoi adjacency relationship, VAR)

Voronoi 图及其对偶 Delaunay 三角网本质上是属于基于场 (field based) 的空间数据模型，它融合图论与几何问题求解为一体，是矢量、栅格模型的共同观察途径 (陈军, 2000)，因此，称它们为栅矢混合模型。Sibson (1980) 在插值方法 (interpolation method) 中首先引入了 Voronoi 邻近的概念，他将共享 Voronoi 边界的两个空间目标定义为自然邻居 (natural neighbours)，即这两个空间目标之间存在 Voronoi 邻近空间关系。首先，Voronoi 图是一种空间剖分结构，自然邻近关系具有拓扑性质。然后，Voronoi 图也具有栅格模型特点，可将 Voronoi 区域看作像元，用两个目标之间的像元数来描述它们之间的距离。因此，自然邻近关系具有度量关系性质。李成名 (1998) 对自然邻近关系的定义加以完善，定义如下：

设 P 是 R^2 中有限凸域上空间目标 $p_1, \dots, p_n$ 集合， $\forall p_i \forall p_j \in P (i \neq j, i, j = 1, \dots, n)$ ， p_i 的 Voronoi 区域为 $v(p_i)$ ， p_j 的 Voronoi 区域为 $v(p_j)$ 。如果 $v(p_i)$ 与 $v(p_j)$ 存在且 $\langle p_i, \text{VoronoiAdjacency}, p_j \rangle$ 为真，则称 p_i 与 p_j 之间存在自然邻近关系，

$$\langle p_i, \text{VoronoiAdjacency}, p_j \rangle \Leftrightarrow v(p_i) \cap v(p_j) \neq \emptyset$$

相对于邻近的距离度量方法，自然邻近有以下优点。

- (1) 自然邻居包含最近邻居，即最近邻近查询结果存在于自然邻近查询结果之中。
- (2) Voronoi 图可动态地推断出目标之间的拓扑空间关系，区分邻近、相接与相交等情况 (李成名, 1998)。
- (3) 自然邻居均与查询目标可视，且能有效地区分障碍物 (李武龙和陈军, 1998)，如图 1.4(a) 所示，查询目标与其最近邻居之间有河流相隔，实际到达距离并不等价于欧氏距离，而使用自然邻近将这种情况区分开来。
- (4) Voronoi 邻近可向多阶扩展，进一步区分相离目标之间的邻近关系。如图 1.4(c) 所示，基于欧氏距离的缓冲区邻近查询，其查询结果处于无序状态，进一步分辨有价值目标是困难的，而用 k 阶 Voronoi 邻近查询可以对查询结果更进一步地用邻近阶数区分。

(5) Voronoi 邻近符合人的认识习惯(Gold, 1992), 且实际应用中不受地图坐标系、比例尺等因素的影响。地图的坐标系及比例尺众多, 如在缓冲区邻近查询中, 设置一个合适的缓冲区半径是困难的, 而采用自然邻近方式唯一需要确定的是查询目标位置, 这样可以大大简化查询操作的复杂性。



图 1.4 欧氏距离邻近与 Voronoi 邻近比较

1.3 国内外相关问题研究现状及分析

1.3.1 Voronoi 邻近的形式化描述方法研究

Voronoi 邻近形式化方法是 Voronoi 邻近空间关系表达、判断和空间推理的基础, 同时也是有效计算的理论依据。Voronoi 图是对空间的一种剖分, 这种结构将空间邻近隐含在其中, 另外, 利用 Voronoi 图不经过线交(line intersection)计算仅依靠其本身结构就可以有效地进行空间邻近分析。因此, 利用 Voronoi 图的概念和性质定义空间邻近是最为适合的。

Sibson(1978)和 Gold(1992c)将 Voronoi 邻近关系定义为: 如果两目标具有相同的 Voronoi 边界, 则两目标构成 Voronoi 邻近关系, 互为自然邻居。基于集合拓扑理论, 李成名和陈军(1998)将共享 Voronoi 边界的空间目标定义为直接邻近关系(immediately neighbor relationship), 并对这种直接邻近关系做了更进一步的区分与形式化描述。考虑最近邻居包含在自然邻居中, 在 Voronoi 邻近的基础上给出了最近邻居的定义; 考虑线目标的左右侧向性质, 定义了针对线目标 Voronoi 邻近的侧向邻近关系(lateral neighbor relationship), 对除直接邻近以外的邻近关系统一定义为空间相隔关系(spatial disjoint relationship), 并用栅格方法生成 Voronoi 图提取 Voronoi 邻近关系。显然, 空间相隔关系过于笼统, 赵仁亮(2002)依据

Voronoi 空间剖分的栅格性质将 Voronoi 区域等价于栅格模型的像元作为基本单位,利用两目标间的 Voronoi 区域个数反映它们之间的邻近程度,进而定义 Voronoi 距离并根据 Voronoi 距离提出了一种新的邻近关系类型——Voronoi k 阶邻近。给出了目标 $n+1$ 阶、 n 阶与 $n-1$ 阶 Voronoi 邻近关系命题与数学证明。在度量上, Voronoi k 阶邻近形成了自然邻居的一个序,同时 k 阶邻近又保持了局部拓扑性,它是一种定性与定量相结合的方法。值得关注的是,利用 Voronoi 区域代替目标的外部,Chen 等(2000)提出 V9I(Voronoi 9-intersection)模型,充分地说明 Voronoi 图不仅能对 Voronoi 邻近有效描述,也能在拓扑空间关系计算中发挥重要作用。李成名(1998)在他的博士论文中提出一种基于 Voronoi 图的 4 邻近拓扑空间关系模型,虽然对内部 Voronoi 区域描述存在一些不足,但定性与推理相结合的空间关系计算方法是必然的发展趋势。

Voronoi 图与 Delaunay 三角网互为对偶,鉴于 Delaunay 三角网在数据结构表达上的灵活性,使得其成为 Voronoi 邻近分析的强有力工具。二维空间建立约束 Delaunay 三角网模型和形式化检索机制对制图综合、空间分析等领域具有显著的支持作用。艾廷华和郭仁忠(2000)提出一种由 Delaunay 三角形子集表达二维空间不同特征区域的数据结构,在这种数据结构下,多边形的各种感兴趣区域可以通过三角形集合表达,从而实现 Voronoi 邻近区域搜索,给出了邻近搜索过程的形式化描述过程及证明。Jones 等(1995)提出了一种 SDS(simplex data structure)模型,旨在根据 Voronoi 邻近关系搜寻多边形群,进而合并目标,但 SDS 对多边形的凹部区域和邻近多边形间的空白区域不能描述与区分。Jones 和 Ware(1998)提出了基于约束 Delaunay 三角网进行最近线目标邻居搜索方法,给出了约束 Delaunay 三角网的相关邻近性质命题及近似搜索(proximity search)的程序语言过程描述。Delaunay 三角网是一个连通图,其中的每一个点都是连通的。因此, Delaunay 三角形的每一条边都隐含着两个顶点之间的邻近关系。杜晓初和郭庆胜(2004)提出了一个基于 Delaunay 三角网的点目标自然邻近定义及基于 Delaunay 缓冲区(Delaunay buffer) Voronoi 邻居搜索过程的自然语言描述。

1.3.2 空间邻近查询缺陷与自然邻近查询扩展

目前,空间数据管理的最高级形式——空间数据库的出现,使得 Voronoi 邻近的计算显得更为重要。空间数据库中的 Voronoi 邻近计算能够有效地对空间查询语言、空间数据挖掘等方面予以支持,提高空间数据的使用效率。商业空间数据库管理系统所支持的空间邻近查询均是以距离邻近作为计算基础,如 Oracle Spatial 中以 SDO_NN 查询算子的形式实现最近邻近, n 最邻近嵌入 SQL 语句中。距离邻近查询功能是较弱的,究其根本原因,笔者认为这种缺陷主要表现在以下两方面:①实际应用方面,距离邻近计算模型与人的空间认知习惯有较大的差距,不易被人们理解与掌握;②基础理论方面,距离邻近计算模型造成了查询结果在语义上与信息上的不准确,进而限制了实际应用。

基于 Voronoi 图所定义的 Voronoi 邻近空间关系能够有效地克服距离邻近的不足,是数据库中扩展空间查询方法的一个有效途径(陈军, 2002)。20 世纪 90 年代以来,以加拿大拉瓦大学 C.M.Gold 教授为首的一批专家开始研究利用混合空间剖分模型计算 Voronoi 邻近问题,提出了许多模型与方法。值得说明的是,我国国家自然科学基金委员会等部门自 90 年代初也陆续资助了对基于 Voronoi 图的空间关系、时空拓扑关系等方面的研究(舒红和陈军, 1997; 舒红, 1998),如“多维动态 GIS 的关键技术与问题”“基于 Voronoi 图的空间关系研

究”与“基于 Voronoi 图的空间认知研究”等。从近 20 年来的研究成果来看,混合空间剖分模型目前较多仍然停留在形式化定义、描述及空间分析等方法的探索上,缺少有效的数据模型、数据结构及相关算法支持,扩展空间数据库中的 Voronoi 邻居查询既是摆在我们面前的机遇也是一个新的挑战。

1.4 各章节安排

全书以 Voronoi 图构建算法、Voronoi 邻近表达与提取结构及 Voronoi 邻近建模为主线,主要内容包括以下三个方面。

(1) Voronoi 图构建算法。以基本 Voronoi 图为基础,在构建算法与类型上给出其新的扩展, Voronoi 图反向膨胀算法、全要素 Voronoi 图算法、加权 Voronoi 图算法、变速 Voronoi 图算法、层次 Voronoi 图算法。

(2) Voronoi 邻近表达与提取数据结构。以空间数据库为计算环境,给出适用于空间数据库 (spatial database) 环境 Voronoi 邻近查询的空间索引结构;以球面为计算环境,基于 Voronoi 图与 Delaunay 三角网的对偶关系,给出 Voronoi 邻近提取的球面 Delaunay 三角网透视投影算法。

(3) Voronoi 邻近建模。以 Voronoi 邻近关系为基础,将其应用于拓扑空间关系计算、地理注记投放、点群综合、地图变比例尺表达、地标提取、空间聚类及 DEM 插值方法中。

本书组织如下。

第一章,绪论部分提出了空间邻近相关研究问题,对国内外研究现状及存在的问题进行评述,并给出全书主要内容。

第二章,基于线性四叉树结构的 Voronoi 图反向膨胀生成方法。本章首先简要介绍普通 Voronoi 图的相关概念,并针对栅格空间 Voronoi 图生成方法中存在的问题提出了基于线性四叉树结构的 Voronoi 图反向膨胀算法。线性四叉树结构是一种层次剖分结构,基于这种结构对空间目标的边界进行表达,算法提出了从空白区域结点到目标边界结点的距离计算方法来提取等距结点,即 Voronoi 边界结点。因与传统的栅格距离膨胀计算方向相反,故称这种方法为反向膨胀。反向膨胀方法充分利用树结构的栅格(膨胀计算)与矢量(空间索引)性质,实验分析表明,其具有较强的平衡时间、空间复杂度的能力。

第三章,变速 Voronoi 图及其算法。普通 Voronoi 图和权重 Voronoi 图是理想欧氏平面上生长源匀速生长的结果,然而,以 Voronoi 图为基础的实际分析与建模情况不尽如此,通常表现为非理想平面的非匀速生长过程。在权重及数学形态学的基础上,以生长源的生长速度为研究视角,以权重距离函数描述各向异性的非理想平面,通过权重距离函数的时间导数一致性实现生长速度的形式化,定义一种新的 Voronoi 图——变速 Voronoi 图。以高程变化诱发的变速生长为例,借助栅格空间中形态学膨胀操作,给出变速 Voronoi 图的典型构建算法,其重点是权重距离函数建立与时间消耗的变速膨胀过程收敛。研究结果表明,在势力范围与邻近关系表达方面,变速 Voronoi 具有更适宜的指导意义与实际应用价值。

第四章,全要素 Voronoi 图及其算法。基于矢量构建和基于栅格构建是形成 Voronoi 空间划分的两种基本方式。以往研究的矢量构建 Voronoi 方法多是通过剖分点生长源,然而,基于点的划分难以描述线状和面状地物的空间分布。在构建过程中,空间约束性的不足给空

间划分带来了不准确性。从空间实体分布特性出发,提出一种点、线、面的全要素 Voronoi 生成方法,该方法通过把线、面实体转化为空间点要素的 Voronoi 图,根据要素属性的一致性,合并相同属性的 Voronoi 区域,生成线、面生长源的 Voronoi 图。实验表明,该方法克服了传统基于点实体 Voronoi 的局限性和基于栅格算法生成 Voronoi 计算的复杂性,证明是一种简单有效的全要素 Voronoi 空间剖分方法。

第五章,基于四叉树结构的加权 Voronoi 图生成算法。加权 Voronoi 图的构造算法主要包括矢量法与栅格法。矢量方法计算繁琐,数据结构复杂,因此在应用中多使用栅格方法来构造加权 Voronoi 图。本章提出的基于四叉树结构的加权 Voronoi 图生成方法,是一种栅格方法的加权 Voronoi 图构造算法。不同于一般的基于均匀格网结构的算法,该算法利用四叉树结构的层次性,获取未膨胀结点的搜索区域和相关生长源,以时间消耗值替代加权距离,并以结点的最短时间消耗值为依据查找归属生长源。实验验证,该算法能有效平衡时空复杂度,其时间复杂度小于均匀格网结构加权 Voronoi 图生成算法。

第六章,层次 Voronoi 图及其算法。本章将 Voronoi 图与空间聚类相结合,提出层次 Voronoi 图的概念。层次 Voronoi 图根据空间数据的集群性,结合 Voronoi 图及其图形特性,可实现空间数据自适应的层次细节可视化。层次加权 Voronoi 图根据在采样空间数据点集上作用一种自动权重值分配计算模型,动态地为每个空间数据点赋予对应的权重值,表达其势力范围;通过自适应聚类算法建立一种实时层次聚类树结构,实现对空间数据集在结构上的层次划分;在层次结构基础上,实现对空间点要素数据的 LOD 图形可视化表达。最后,本章以 Voronoi 图为支撑,结合构建的层次树结构,给出了空间点要素数据的 LOD 可视化表达试验实例。

第七章,平面 Voronoi 邻近表达结构与提取方法。空间数据库中的 Voronoi 邻近关系计算必须克服的问题是“Voronoi 邻近难以用线交方法探测”,它对空间索引结构提出了新要求。针对二维空间中离散面目标的点自然邻居查询,提出了一种基于约束 Delaunay 三角剖分的空间索引构建方法。首先,在三角网分类的基础上将代表相同目标自然邻近关系的三角形合并形成区域(unit)。然后,用最小外接矩形近似这个区域。最后,考虑索引结构的更新,设计了 Quad Gridfile 索引结构,即先用四叉树对空间进行剖分,再对其叶子结点所代表的子面片采用 Gridfile,用叶子结点的重构来代替索引结构的更新。对比实验结果表明,该索引方法能够有效地支持点 Voronoi 邻近查询,且在构建索引的时空复杂与更新方面表现出较强的性质。

第八章,球面 Delaunay 邻近表达结构与提取方法。为解决球面 Delaunay 构网中的拼接问题,顾及球面数据的位置特点,本章给出利用透视投影模型将球面构网平面化的算法——球面 Delaunay 三角网透视投影算法,对球面目标点进行处理,构成球面与平面位置间的一一映射,避免平行投影产生的像点重合、两半球在拼接过程中导致的算法适用性降低等问题。

第九章,Voronoi 邻近拓扑空间关系计算模型。将 Delaunay 三角网应用于 Voronoi 邻近关系提取时存在着对拓扑空间关系计算方法的“依赖”。利用约束 Delaunay 三角网是单纯复形及保持空间目标边界线性特征的性质,以关联空间目标 0、1 单形三角形集合序为定义域,在三角形分类的基础上,将其按边界的左、中、右三种侧向性质作为值域,建立空间目标的映射函数,进而根据函数的特征曲线来计算简单目标间的拓扑空间关系。

第十章,地理注记邻域概括模型。针对网络地图服务环境中的地理注记评价问题,本章

对传统地理注记内容进行非结构化文本形式扩展,定义宽泛地理注记。用投放过程来模型化标注行为,首先,依据词频分类方法确定地理注记文本内容分类,并根据 Voronoi k 阶邻近关系建立投放邻域的空间相关性定量收敛描述,进而结合地理注记文本与地理注记存在邻域构建基于地理注记类型与类型转化的投放模型。实验验证,在已知两种类型地理注记集的实际情况下,投放模型能够有效地对新增地理注记进行合理性评价。

第十一章,层次 Voronoi 图点群综合模型。作为基础地理信息表达的地图要素——点群,其在空间信息的传达上具有重要的重用。点状目标的分布在地图中是不可或缺的,特别是随着地图比例尺的变化,面状目标可被简化为点状目标。因此,在地图制图综合中,对点群的综合是对地图的线状目标和面状目标进行综合的基础。本章在概述了空间点群及其相关的制图综合方法的基础上,通过层次 Voronoi 图的表达,借助数理统计的相关知识和变差函数,从点群综合的密度与拓扑相似度、角度相似度、距离相似度、范围相似度、排列相似度参数及全局相似度参数计算验证了层次 Voronoi 图方法对点群综合的可行性。最后,通过实验算例具体化该方法在点群中的应用。

第十二章, Voronoi 邻近变比例尺自适应方法。电子地图是移动信息服务中用户交互行为的重要环节,但是小屏幕制图方法不同于传统桌面制图方法,将导致用户在使用过程中存在困扰,主要表现为地图空间参照显示失衡,以及在放大查看地物细节时,周围信息点的丢失。变比例尺地图及基于 Voronoi 邻近关系地物选取方法可以有效地解决小屏幕地图中的信息失衡问题。本章将向读者介绍变比例尺地图及 Voronoi 邻近选择模型,并详细说明保持小屏幕地图均衡性与易读性的方法。最后以一个综合算例分析展示 Voronoi 邻近变比例尺自适应的具体方法。

第十三章, Voronoi 邻近地标提取模型。空间位置描述是人类最为常见的空间活动之一,地标作为空间位置描述中重要的参照物,可对空间目标方位进行表达,也可作为导航工具,是空间地理知识表达的重要基础。本章以地理空间认知、GIS 空间关系等理论为指导,针对传统地标提取方法对空间关系考虑的不足之处,通过对地标特点的分析,提出基于 Voronoi 邻近的地标提取模型,并阐述了地物显著性计算及地标层次化描述的原理和方法。核心思想是利用 Voronoi 图的势力范围和侧向邻近特性,通过计算权重构建 Voronoi 图以 Voronoi 面积描述地物的势力范围和地物之间的空间邻近关系,最终实现地标的提取和层次化。

第十四章, Voronoi 邻近空间聚类方法。空间聚类作为聚类分析的一个研究方向,是指将空间数据集中的对象分成由相似对象组成的类。同类中的对象间具有较高的相似度,而不同类中的对象间差异较大。作为一种无监督的学习方法,空间聚类不需要任何先验知识,比如预先定义的类或带类的标号等。由于空间聚类方法能根据空间对象的属性对空间对象进行分类划分,其已经被广泛应用在城市规划、环境监测、地震预报等领域,并发挥着较大的作用。同时,空间聚类也一直都是空间数据挖掘研究领域中的一个重要分支。本章详细介绍了自然邻近空间聚类算法(spatial clustering base on natural adjacency, SCBNA),验证了距离邻近与自然邻近聚类方法的有效性和实用性,并对两种相似性测度进行对比分析。

第十五章, Voronoi 邻近空间内插。数字高程模型(digital elevation model, DEM)是通过有限的地表高程数据实现对地形曲面的数字化模拟,也就是说,地形表面被一组相互组织在一起的地表采样点所表达。可以通过插值和拟合方法得到数字表面上其他位置上的高程值。近几年来,对 DEM 插值和拟合方法的研究很多。GIS 中存在多种空间数据内插和拟合方法,

内插和拟合的关键是参考点的选择及模型的建立,但是每种插值各有自身的缺点,其缺点可以总结为:①参考点分布不均匀或者过少导致内插精度受影响;②参考点数目过多影响计算效率。因此,本章提出了一种基于自然邻近的插值方法,该方法首先对采样点构建 Delaunay 三角网,然后插入插值点重构 TIN,以插入点的 1 阶邻近点作为插值的参考点,这些参考点相对于插入点具有均匀分布的特点,并以影响三角形集合所构成的凸壳面积有效动态划分作为权重基础建立插值模型。