

数学形态学在 GIS 空间分析中的应用

马 飞 李德仁

(武汉测绘科技大学 GIS 研究中心, 武汉市珞喻路 39 号, 430070)

摘 要 讨论了数学形态学在基于栅格数据结构的地理信息系统(GIS)空间分析中的广泛应用。提出了基于形态变换的 GIS 空间操作(图层叠置、缓冲区建立、邻域分析和图元量算)方法, 网络最短路径的形态学算法, 应用灰度级形态学解求视视图的新思路。

关键词 数学形态学; 地理信息系统; 空间分析; 栅格数据

分类号 TP391

1 栅格数据并行处理理论——数学形态学

数学形态学是通过栅格数据形态结构的变换而实现数据的结构分析和特征提取^[1~3]。其中二值形态学(函数值域定义在 0 或 1)是将图形视作集合, 通过集合逻辑运算(交、并和补)与集合形态变换(平移、扩张和侵蚀), 在结构元作用下转换到新的形态结构。在基本运算基础上可以构建新的实用算子如断开、合上、减薄和加厚等。其中“断开”可以滤除数据的细微结构, “合上”可以组合数据的细微结构, “减薄”可以剔除数据中不必要的结构特征, “加厚”能使数据增添新的外貌特征。

灰度级形态学与二值形态学的区别在于函数空间从二维平面推广到三维空间, 函数值域扩展到从 0 至 255 的整个灰度区间。同时, 影像与结构元视作在底面(定义域, 三维空间中 xy 平面)上每一个元素(像素)取值在 0 到 255 之间的一个 z 轴向上的柱面, 习惯上将这个概念称作本影。一幅影像可以理解成二维欧氏空间上的一个灰度级函数 $f(x, y)$, 即有 $U(f) = \{(x, y, z) | z \leq f(x, y)\}$ 。容易看到, 灰度级形态学是二值形态学的扩展, 二值形态学是灰度级形态学的一个特例。

数学形态学对栅格数据进行处理出发点是通过数据变换, 从结构特征中提取所需的新信息。因而, 数学形态学作为一种严密的理论体系, 可以成为 GIS 空间分析的有力工具。

GIS 线状要素如河流等, 需要描述其覆盖范围、走向和长度。覆盖范围可以通过对流域中每一个像素保存属性(如河流名称)来表达, 而走向和长度则通过中轴线(亦称骨架)来描述。用集合 X 表达河流, 则中轴线 $SK(X)$ 用形态学序贯减薄算法可求得:

$$SK(X) = X \circ \{L_i\} \quad (1)$$

其中 $\{L_i\}$ 表示各向同性结构元序列,

$$\begin{array}{ccc} \circ & \circ & \circ & i = 1, 3, 5, 7 & \cdot & \circ & \circ & i = 2, 4, 6, 8 \\ \cdot & \textcircled{1} & \cdot & i \text{ 加 } 2 \text{ 则顺时针旋转 } \pi/2 & 1 & \textcircled{1} & \circ & i \text{ 加 } 2 \text{ 则顺时针旋转 } \pi/2 \\ 1 & 1 & 1 & & \cdot & 1 & \cdot & \end{array}$$

河流的走向可通过中轴线从上游到下游的点来表达, 而其长度则是这些点的数目。用 P 表示

这些点构成的点集,则

$$P = SK(X) \circ \{E_i\} \quad (2)$$

其中 $\{E_i\}$ 为线端像素结构元序列,

$$E_i = \begin{matrix} \cdot & \cdot & \cdot & i = 1, 2, \dots, 8 \\ \cdot & \textcircled{1} & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot \end{matrix} \quad \text{加 1 则顺时针旋转 } \pi/4$$

以栅格数据表达的多边形区域需要表达其拓扑结构。以某区域行政区划为例,除表达每个多边形由若干弧段组成的边界外,还要表达每一条弧段由哪些多边形所共享。用 X 表示多边形区域,结构元为:

$$H = \begin{matrix} \cdot & 1 & 1 \\ 1 & \textcircled{1} & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix}$$

则多边形边界如图 1a 所示, $PL(X) = X / (X \ominus H)$ 。边界上每一弧段可以通过多边形之间的交叉点来确定,相邻两个交叉点之间的边界像素则构成一条边界弧段,如图 1b 所示,当且仅当两个端点同时属于这个多边形时一条弧段隶属某一多边形。只要确定多边形区域的各个交叉点,就可以推出整个区域的拓扑结构。由形态学知识可知^[4,5],对于八连接多边形区域,其交叉点可以归结为三交叉点和四交叉点两类,而在 3×3 窗口内所有可能的三交叉点种类有且仅有 32 种,而四交叉点种类有且仅有 26 种。若它们分别用结构元序列 $\{Q_1\}$ 和 $\{Q_2\}$ 描述,则多边形区域内所有交叉点可求得:

$$PQ(X) = (X \otimes \{Q_1\}) \cup (X \otimes \{Q_2\}) \quad (3)$$

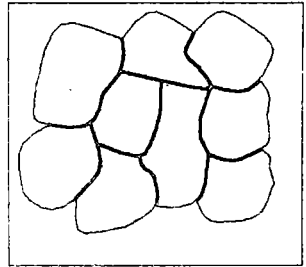


图 1a 多边形边界

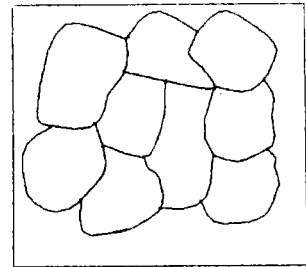


图 1b 多边形结点和弧段

2 基于形态变换的 GIS 空间分析

2.1 图层叠置

图层叠置是将两个或两个以上的地图层叠加覆盖从而产生新的属性明确的图特征的过程。图层叠置一般包括剪取(CLIP)、清除(ERASE)、更新(UPDATE)、联合(UNION)、识别(IDENTITY)、合并(DISSLOVE)、交叠(INTERSECT)、选择(RESELECT)等方式。假定 I 表示输入层, M 表示操作层, O 表示输出层,集合 X 是层的集合表示, X' 表示 X 的非空子集, $F(X)$ 表示将 X 填充(所有像素转换为 1), \bar{X} 表示 X 的补集。

(1) 清除。清除输入层中位于操作层的图特征,如图 2, $O = I - F(M) = I / (I \cap F(M))$ 。

(2) 更新。利用剪贴方法将新的特征合并在一起。在此之前,先用清除命令将输入层位于更新层(操作层)的那部分图特征清除, $O = (I - F(M)) \cup M$ 。

(3) 剪取。将输入层中位于剪取层(操作层)的特征合并到剪取层中, $O = M \cup (I \cap F(M))$ 。

(4) 分割。将输入层分成若干小层,截取所需范围内的特征,如图 3 所示。设点 $P \in I$ 为截取范围内的一点,则先确定输入层中待截取的范范围 $I' = P \oplus \{H\}; I$, 然后求出截取范围内的特征 $O = F(I') \cap I$, 其中序贯条件扩张运算 $P \oplus \{H\}; I = (((P \oplus H) \cap I) \oplus H) \cap I \dots$ 。

(5) 选择。对需要保留的特征进行逻辑选择, $O = F(F') \cdot H = (F(I') \ominus H) \oplus H$ 。

(6) 合并。设输入层 I 中待合并区域为 O' , 不合并区域为 O'' , 则 $O' = ((I \cup F(I')) \ominus \{H\}) \oplus \{H\}$, $O'' = F(I/O')$, I 的边界线 $L(I) = (I \oplus H)/I$, O' 的边界线 $L(O') = (O' \oplus H)/O'$, O'' 的边界线 $L(O'') = (O'' \oplus H)/O''$, 待合并区域要剔除的公共边界线 $L = L(I)/(L(O') \cup L(O''))$, 合并后的输出层 $O = I - L = I/(I \cap L)$ 。

在利用一系列层的属性完成多边形叠加, 从而产生新的特征之后, 输出层(特别是在特征边缘)常常包含许多较小的细碎多边形, “删除”即将这些无意义的多边形合并到邻近的多边形中。先求出细小多边形的骨架, 由骨架将细碎多边形划分为若干小区域, 这些小区域的个数与细碎多边形的相邻多边形个数相同。将这些小区域合并到各自相邻多边形之中, 从而 $O = SK(F(I')) \cup (I - I')$ 。

(7) 联合。进行多边形叠加, 并保留原来两个层的所有区域特征, $O = I \cup M$ 。

(8) 识别。将点、线或多边形叠加到多边形上, 并保留所有输入层的特征, $O = (F(I) \cap M) \cup I$ 。

(9) 交叠。将点、线或多边形叠加到多边形上, 仅仅保留输入层特征中位于叠加层的多边形内的那部分, 如图 4 所示, $O = (F(M) \cap I) \cup (M \cap F(I))$ 。

2.2 缓冲区的建立

缓冲区是指在给定空间实体(点、线或多边形)的边缘形成的一个特定宽度的区域带。利用结构元 H 采用序贯扩张的方法, 当变换到扩张次数 n 与缓冲区宽度一致时, 结果即为所求缓冲区, $O = I \oplus \{H\} = \underbrace{((I \oplus H) \oplus H \dots)}_n \oplus H$ 。

当缓冲区宽度较大时, 用结构元 H 不能形成良好的各向同性效果。这时, 可以优化结构元 H 的各向同性, 即产生一个尽可能大的栅格大圆(即在棋盘或街区测度意义上, 原点到边界栅格像素的距离尽可能相同)。对栅格大圆作式(1)的逐层减薄运算, 即可获得各种宽度的各向同性结构元。选择与缓冲区宽度一致的结构元对输入层作扩张运算, 即可获得满意的各向同性缓冲区。

2.3 邻域分析

邻域分析指对于给定的一组空间实体, 将空间划分为若干个多边形区域, 使得每个多边形区域内有且仅有一个空间实体, 且这个空间实体对多边形内每一个点的影响比其它所有空间实体都小。在二维平面上, 等价于将一个区域划分成若干 voronoi 多边形。设 X 表示二维平面上的一个区域, 在该区域内对空间实体集 I 作附有条件的加厚运算(图 6): $\text{vor}(I) = I \odot \{L_i\}; X$ 。这种方法适宜于空间实体集中点、线、面多种要素实体并存的情况。

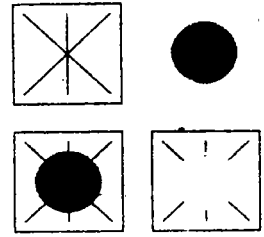


图 2 清除操作

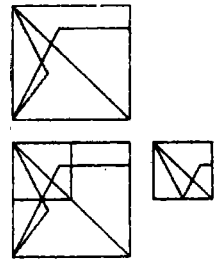


图 3 分割操作

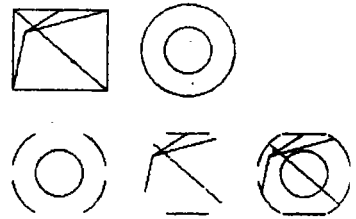


图 4 交叠操作

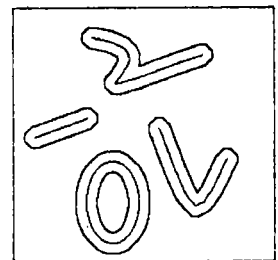


图 5 GIS 要素及缓冲区

2.4 图元量算

(1) 点与点之间距离。设空间两点 P 和 Q , 且集合 $X = \{P\}$, $X' \supset Q$, 作形态变换 $O = (X \oplus \{H\}) \cap X'$, 当 $O \neq \emptyset$ 时扩张次数即点 P 到点 Q 的距离。

(2) 多边形面积与周长量算。设 X 表示多边形区域, 则多边形面积 $A(X) = N(1)$, $N(1)$ 代表栅格区域中置白(取值1)的像素个数总和。多边形边界 $\partial X = (X \oplus H) / X$, 多边形周长 $S(\partial X) = N(1 \ 1) + N \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \sqrt{2} [N \begin{pmatrix} 1 & \cdot \\ \cdot & 1 \end{pmatrix} + N \begin{pmatrix} \cdot & 1 \\ 1 & \cdot \end{pmatrix}]$, 其中 $N \begin{pmatrix} 1 & \cdot \\ \cdot & 1 \end{pmatrix}$ 表示边界上形如 $\begin{matrix} 1 & \cdot \\ \cdot & 1 \end{matrix}$ 结构的个数总和, “ \cdot ”表示该像素

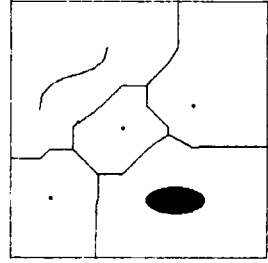


图6 点、线、面及其 voronoi 结构

可以取1也可以取0。余类推。

(3) 线的中心和面的形心。线的中心指线中轴线上距离两端点等长的像素位置。设 $SK(X)$ 表示线 X 的骨架, 则线的中心点 $P = SK(X) \circ \{E_i\}$ 。其中结构元序列 $\{E_i\}$ 与(2)式相同, 序贯运算直至不再发生变化(即只有一个点)时结束。

多边形形心也可以通过序贯减薄运算求得, 此时采用结构元序列

$$\begin{aligned} & \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad i = 1, 2, \dots, 8 \\ \{D_i\} = & \cdot \quad \textcircled{1} \quad 1 \\ & \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad i \text{ 加 } 1 \text{ 则顺时针旋转 } \pi/4 \end{aligned}$$

则形心 $P = F(X) \circ \{D_i\}$ 。

(4) 面的闭包。设 X 为一区域, B 为任意凸集, 且 $X \subset B$, 则 X 的闭包 $\text{Convex-hull}(X) = \bigcap_{i=1}^{\infty} B_i$, 基于形态学的闭包算法为:

$$\text{Convex-hull}(X) = X \circ \{C_i\}$$

其中结构元序列 $\{C_i\}$ 也是一个序贯加厚变换:

$$\begin{aligned} C_i = & \begin{matrix} 1 & 1 & \cdot \\ 1 & \textcircled{1} & \cdot \\ 1 & 1 & \cdot \end{matrix} \quad i = 1, 2, \dots, 8 \\ & \quad \quad \quad i \text{ 加 } 1 \text{ 则旋转 } \pi/4 \end{aligned}$$

2.5 区域的密集度、伸长度和粗糙度

根据定义, 区域的密集度为:

$$F_1(X) = \frac{(\text{周长})^2}{4\pi \cdot (\text{面积})} = \frac{(S(\partial X))^2}{4\pi \cdot A(X)}$$

区域的伸长度为:

$$F_2(X) = \frac{\pi \cdot (\text{特征长度})^2}{4 \cdot (\text{面积})} = \frac{\pi \cdot L^2(X)}{4 \cdot A(X)}$$

其中, 特征长度 $L(X) = \sup_{x,y \in X} d_X(x,y)$ 为区域 X 中大地线的最大值, 可由大地线测度形态变换获取。显然, 在相同面积下, 圆形区域的密集度最大, 伸长度最短。

利用形态学模式谱的概念, 可以求得区域的粗糙度:

$$F_3(X) = - \sum_{k=0}^N PS_X(k, B) \log[PS_X(k, B)]$$

其中 $PS_X(k, B)$ 表示区域 X 对于结构元 B 在尺度 k 时的模式谱分量。区域的粗糙度可以用来

描述区域形状的复杂程度。

3 数学形态学在 GIS 空间分析中的其它应用

3.1 网络的最短路径

网络中两点的最短路径是两点间长度最小的一条连通线路。各向同性的扩张运算可以获得两点间的最短距离,同时附有条件的扩张运算可以保证路径的连通。设集合 X 表示网络,网络上两点 $x_1 \in X, x_2 \in X$ 分别组成 X 的子集 $X_1 = \{x_1\}, X_2 = \{x_2\}$, 则 x_1 和 x_2 之间最短路径为:

$$L = (X_1 \oplus \{H\}; X) \cup (X_2 \oplus \{H\}; X)$$

上述运算当且仅当 $(X_1 \oplus \{H\}; X) \cap (X_2 \oplus \{H\}; X) \neq \Phi$ 时终止。

这样获得的最短路径可能存在两个问题:①由于是各向同性地扩张, L 中存在支线;②最短路径中可能存在自闭合回路。消除支线的方法可以采用保护端点的序贯减薄算法,即

$$L' = (L \cup (X_1 \cup X_2)) \circ \{E_i\} = [(L \circ \{E_i\}) \cup (X_1 \cup X_2)] \circ \{E_i\} \dots$$

上述运算当前后两次运算结果不发生变化时结束。在 L' 中剔除自闭合回路的方法是首先找到线路中全部结点 N :

$$N = (L' \otimes \{Q_1\}) \cup (L' \otimes \{Q_2\})$$

然后仍然采用附有条件的扩张运算确定相邻两结点间的最短路径,剔除自闭合回路中端结点间非最短路径的支线,即得到最终所求的最短路径。

3.2 通视分析

通视分析即确定空间某点(辐射源)沿光线(视线)辐射(照到)的范围。我们已经知道,灰度级形态学本影的概念与地形高程是一致的,而灰度级形态变换并不局限于灰度量级(0 到 255),因而如果取地表面为 xy 平面,高程方向为 z 轴正向,那么数字高程模型中的计算可以利用灰度级形态学的方法。对于通视分析,首先确定球形结构元,使它的本影的函数值与辐射源的高度一致,那么合上运算的结果影像的最小灰度值与辐射源高度一致,结果影像与原影像的差集中包含辐射源的区域是可能通视的范围。在这个范围内滤除前景遮挡后,即为通视范围。

如图 7,点 O 为辐射源,点 P 为前景,阴影为遮挡部分。采用各向同性扩张运算,从点 O 开始至点 P ,扩张次数与辐射平面距离 n 相等,下一次扩张 OP 方向上点为 P' 。设 O, P, P' 的高程分别为 h_0, h_1, h_2 , 则 $h_1 < h_0$ 且 $h_2 < h_0$, 令 $\Delta h = h_0 - h_1, \Delta h_1 = h_2 - h_1$, 则当 $\Delta h_1 < \Delta h/n$ 时 P' 点不可视,当 $\Delta h_1 \geq \Delta h/n$ 时 P' 点可视。

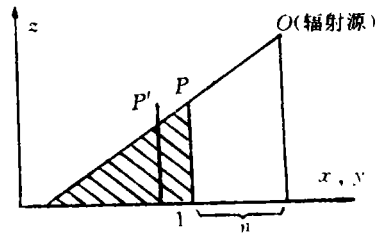


图 7 点的通视分析

参 考 文 献

- 1 Star J, Estes J. Geographic Information Systems: an Introduction. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1990.
- 2 Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology. New York: Academic, 1982.
- 3 Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology, Vol 2. San Diego: Academic, 1988.
- 4 Golay M J E. Hexagonal Parallel Pattern Transformation. IEEE Trans on Computers, 1969.

SEVEN. Enschede: ITC Publication, 1988. 32~41

- 6 Caianiello E R. Neural Associative Memories with Minimum Connectivity. *Neural Networks*, 1992,5(2): 433~439

Recognition of Point-shaped Map Symbols with a New Neural Network Model

Huang Wenqian

(Dept. of Hydrography and Mapping, Dalian Institute of Naval Vessels, 667 Jiefang Road, Dalian, China, 116018)

Abstract Recognition of point-shaped map symbols with use a new neural network model is expounded in this paper. The structural characteristics of the network, the learning algorithm and the process of studying and training are discussed as the principal research contents. Experiments have proved the efficiency of this network in recognizing point-shaped map symbols.

Key words neural network; learning algorithm; train; recognition



(上接第45页)

- 5 陈晓勇. 数学形态学与影像分析. 北京:测绘出版社,1991.
- 6 Huang C, Hsin W, Grall W. GIS Analysis Tools on C-Win. In: Proceedings of Advances in Urban Spatial Information and Analysis. Wuhan: WTUSM,1993.

Applications of Mathematical Morphology in GIS Spatial Analysis

Ma Fei Li Deren

(Research Centre for GIS, WTUSM, 39 Luoyu Road, Wuhan, China, 430070)

Abstract This paper discusses applications of mathematical morphology in GIS spatial analysis. The new method based on morphological transformations is presented, which includes overlay, buffering, proximity, measurement as well as optimum route of network and visibility analysis.

Key words mathematical morphology; geographic information system; spatial analysis; raster data