

# 基于栅格的三维 GIS 缓冲体分析研究

李芳玉

(中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249)

**摘要:** 缓冲区分析是二维 GIS 空间分析的基本功能, 但目前对三维 GIS 中的缓冲体分析研究较少。该文对三维缓冲体分析的意义进行了分析, 并针对地质应用, 根据生长元是否向周围均匀扩散及扩散周围是否存在障碍物, 对三维缓冲体的种类进行了划分。提出了有约束缓冲体的生成算法, 讨论了非均质的缓冲体的生成算法。

**关键词:** 3D 地理信息系统; 缓冲区分析; 距离变换

## Research on Raster-based Buffer Analysis in 3D GIS

LI Fang-yu

(Faculty of Natural Resource & Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249)

**【Abstract】** The buffer analysis is the basic function in 2D GIS, but the research on the buffer analysis in 3D GIS is little. This paper analyzes the importance of 3D buffer analysis. It classifies the 3D buffer according to the geological application, whether the surrounding is uniform or not, and whether the barrier exists around or not. This paper proposes an algorithm for the 3D buffer-generation with the restriction, and discusses the algorithm for the 3D heterogeneous buffer-generation.

**【Key words】** 3D GIS; buffer analysis; distance transform

缓冲区分析是二维 GIS 空间分析的基本功能, 它是为了确定点、线、面的邻近度或影响范围而在其周围自动建立一定宽度的多边形的一种空间分析方法, 在 GIS 中有着广泛的应用。在三维 GIS 中, 缓冲区分析仍然是一项基本的空间分析功能, 这时缓冲区不再是二维的多边形, 而是三维的体, 称为缓冲体分析。由于三维 GIS 在数据模型、拓扑关系等理论和技术方面还不够成熟, 因此三维 GIS 软件主要出现在城市、矿山、石油等专业领域, 通用的商品化的真三维 GIS 软件还没有出现, 三维 GIS 的基本空间分析功能研究则较少。

### 1 三维缓冲体分析的意义及种类

缓冲区分析在二维 GIS 中有着广泛的应用, 同样地, 三维缓冲体分析在地质领域也具有重要的意义。

例如: 为了确定地下污染源的影响范围, 污染源可以简化成点状地物, 这时需要利用点的缓冲体分析; 确定某钻井周围一定范围内的钻井有哪些, 把井看成是线状地物, 由于钻井有直井和斜井, 两口井在地面上距离较近, 但到地下某个层位可能距离较远, 只有运用三维的线缓冲体分析, 才能准确确定某口井的影响范围, 并判断落在此范围内的井有哪些; 在确定距离断层一定范围的井, 一方面钻井有直井和斜井, 另一方面断层具有一定的倾角和弯曲度, 这时需用到三维空间面的缓冲体分析。

在三维地质应用中, 地质体的属性往往是非均质的, 如果生成的缓冲体与地质体的属性有关, 那么生长元往往并不是按等距离向周围均匀扩散, 这时生成的缓冲体是不对称的, 甚至是极不规则的。例如确定地下污染源的影响范围, 污染源往往受岩层属性如渗透率等非均质因素影响向周围非均匀扩散, 这时生成的缓冲体是不规则的。由于栅格模型能有效

地表达地质体内部的非均质性, 而矢量模型很难表达。

另外, 矢量模型表达的三维空间是向无穷维方向呈球状发散的, 而栅格模型可以将三维空间近似简化为向 26 方向发散, 其缓冲计算也可看成是向 26 方向扩散, 这使得缓冲体分析得到简化。也就是说, 采用栅格模型进行缓冲体分析能较好地模拟三维空间各向异性的扩散情况, 这对于矢量模型是较难做到的。

因此, 本文所做的三维缓冲体分析是基于栅格模型的。另外, 在实际的地质应用中, 还需考虑在对某一地物周围生成缓冲体的过程中遇到障碍物或约束面的情况, 例如: 污染源在地下的扩散过程中遇到不渗透层, 地下铺设管道一定距离范围内遇到坚硬岩层等。

通过以上分析, 根据生长元是否向周围均匀扩散, 即生长元向各个方向的扩散强度是否相等, 缓冲体分析可分为均质缓冲体分析和非均质缓冲体分析。根据在物体周围形成缓冲体时是否存在约束条件或不可逾越的障碍物时, 缓冲体分析可分为无约束缓冲体分析和有约束缓冲体分析。所以, 均质缓冲体分析又可分为均质的无约束缓冲体分析和均质的有约束缓冲体分析, 非均质缓冲体分析又可分为非均质无约束缓冲体分析和非均质有约束缓冲体分析。

### 2 三维缓冲体生成的关键算法

距离变换是基于栅格的三维缓冲体生成的基础。自从文

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (40672095)

**作者简介:** 李芳玉(1973 -), 女, 博士, 主研方向: 三维地理信息系统

**收稿日期:** 2007-04-30 **E-mail:** 1734@163.com

献[1]首次提出了距离变换以来,距离变换就被广泛地应用于图像处理和模式识别领域。可以利用它实现目标细化、骨架抽取、形状的插值和匹配,也有一些研究将其应用到GIS空间分析中<sup>[2-3]</sup>,例如:缓冲区分析,Voronoi图生成等。但是这些应用都是基于二维的,如何针对具体的应用扩展到三维是一个值得研究的问题。

缓冲体生成可以看成是从生长元开始,逐步向周围邻域扩张,扩张的半径逐步增大,直至扩张到的体元与生长元的最小距离大于或等于给定的缓冲半径为止。在有约束和非均质的情况下,缓冲体在各个方向的扩张距离不是相等的并且不同距离缓冲体范围内的研究属性也不是一样的。

将特征体元看成是生长元,其它体元看成是非特征体元,三维缓冲体生成的关键就是如何计算每个非特征体元到所有生长元的最小距离,本文将将其简称为体元的距离。在文献[4]中提出了一种高效的、基于栅格的等值面扩张的三维缓冲体生成算法,该算法采用桶数据结构,每个桶中放入的体元的距离值相同,并且以该距离值作为桶的索引,按照一定的方向以及距离由小到大的顺序计算体元的距离,直到达到给定的缓冲半径为止,超出缓冲半径的体元不需要计算距离值。该算法的思想同样适用于有约束和非均质的情况,不同的是具体距离的计算方法。对于均质缓冲体分析,生长元向周围各个方向的扩散强度相等,在这种情况下,非特征体元与生长元之间的距离用最小欧氏距离表示。对于非均质缓冲体分析,生长元向周围各个方向的扩散强度不等,在这种情况下,每个体元需记录经过该体元的阻力值,非特征体元与特征体元之间的距离用广义的最小阻力距离。对于无约束缓冲体分析,整个研究区域任意两点是连通的,连通域为凸的,并且任意两点之间存在直线距离。对于有约束缓冲体分析,生长元周围存在障碍物或边界约束条件,整个研究区域并不是完全连通的,连通域可以是凹的,任意两点之间可能不存在直线距离,这时用最短路径来计算最小距离。

对于均质无约束的缓冲体的生成算法在文献[4]中有较详细的论述,下面具体讨论均质有约束的缓冲体的生成算法和非均质无约束缓冲体的生成算法,本文将将其简称为有约束缓冲体生成和非均质缓冲体生成。

### 3 有约束缓冲体生成

为了计算在有约束的情况下非特征体元与特征体元之间的最短距离将三维的栅格空间图来进行定义,这样,距离变换和缓冲体分析问题转化成最短路径问题。对于给定的三维二值数字图像  $M$ ,  $v$  表示特征体元,  $v'$  表示非特征体元。在这里规定特征体元是 26-连通的,非特征体元是 8-连通的。

如果特征体元与一个或多个非特征体元 8-邻近,则称该体元为边界特征体元,用  $v_b$  表示,有  $v_b \in v$ 。这样,三维二值数字图像可转换成图  $G = \langle V, E \rangle$ :  $V$  是图  $G$  的顶点集合,  $V = v_b \cup v'$ ;  $E$  是图  $G$  的边,如果  $v_1, v_2 \in V$ , 并且  $v_1, v_2$  是 26-连通的,则  $(v_1, v_2) \in E$ ,  $e$  为  $v_1, v_2$  之间的距离。下面将距离变换描述成最短路径问题:对于每个体元  $v_0 \in V$ , 求连接它与最近的边界特征体元  $v_b$  的最短路径的长度。

同样,缓冲体分析也可以描述成最短路径问题:与最近的边界特征体元  $v_b$  的最短路径的长度小于或等于缓冲半径  $r$  的体元集合。

体元  $p$  和  $q$  之间的最短距离定义为连接体元  $p$  和  $q$  的最短路径的长度。如何计算最短路径的长度直接影响到最短距离的

值。假设  $P = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  是体元  $v_i$  和  $v_n$  之间的一条连通路,那么,对于  $i \in \{1, 2, \dots, n-1\}$   $v_i$  和  $v_{i+1}$  是相互连通的邻居,并且  $v_i$  属于连通域。将路径的长度  $l(p)$  定义为

$$l(p) = \sum_{i=1}^{n-1} e(v_i, v_{i+1})$$

即连接  $v_i$  和  $v_n$  的相邻体元之间的局部距离  $e$  的和。在不同的距离测度定义下和不同方向上,  $e$  的值是不同的。

常用的距离测度有棋盘距离  $d_8$ 、城市距离  $d_4$ 、切削距离  $d_{cha}(d_1 : d_2 : d_3)$ 、欧氏距离  $d_e$  等。为方便起见,在这里假设栅格或体元的边长为 1。在有约束的条件下,特别是约束条件比较复杂的情况下,很难在每个点都得到精确的欧氏距离,一般采用上述计算局部距离的方法对欧氏距离进行近似。

对于不同方向上  $e$  的值设为  $e_i, i=1, 2, \dots, n$ , 在三维情况下如果只考虑 26 邻域是连通的,则用  $e_1$  表示面邻域的局部距离;  $e_2$  表示边邻域的局部距离;  $e_3$  表示点邻域的局部距离。采用不同的  $e$  计算结果的精度不同。本算法选取使求得的距离的最大绝对误差最小的局部距离<sup>[5]</sup>, 即  $e_1=0.9398, e_2=1.3291, e_3=1.6278$ , 分别代表面邻域、边邻域和点邻域之间的局部距离。

本文仍采用等值面扩张算法的思想,每次处理具有相同距离值的体元,并且距离值不断增大,直到达到给定的缓冲半径。但由于约束条件是任意的,如果采用无约束情况下距离的传递路径,显然不能保证相连接的非特征体元都能被访问。

另外,在这里规定特征体元是 26-连通的,非特征体元是 8-连通的。所以,为了首先保证缓冲体范围内相连接的非特征体元都能被访问,在信息传递过程中,中心体元将信息传给周围 26 邻域。这样,在只有一个生长元的情况下,缓冲体内的每个非特征体元被访问的次数是 26 次。为了减少不必要的访问,对每个体元记录是否被访问以及最近的特征体元,如果被访问并且最近的特征体元相同,则不必计算和比较距离。

等值面扩张算法实际上也是采用宽度优先搜索。体元的处理顺序按照距离由小到大的顺序。在桶排序中,不管采用平方欧氏距离还是整数局部距离近似,计算的结果都是整数,可以对应地放入事先排好序的桶中。

为了使生成的结果误差更小,并且没有明显的棱角,这里采用实数局部距离,即  $e_1=0.9398, e_2=1.3291, e_3=1.6278$ , 这样,距离计算的结果也是实数。如果对实数进行分段,也可将距离值是实数的体元分别放入以整数为索引的桶中。距离值为 0 的是特征体元,将它们放入索引为 0 的桶中,  $0 < d(v) < 1$  的体元放入索引为 1 的桶中,  $1 < d(v) < 2$  的体元放入索引为 2 的桶中。由于局部距离最大为  $e_3=1.6278$ , 中心体元向周围 26 邻域扩张新产生的桶的个数为 2, 所以,算法运行过程中可利用的桶为  $2+1=3$  个。

图 1 为一个点生长元的有约束三维缓冲体,障碍物为长方体,缓冲半径为 100m,  $y=40, z=50$  切面图;图 2 为一个点生长元的有约束三维缓冲体,障碍物为板状体,缓冲半径为 100m,  $y=45, z=45$  切面图。

在以上两种情况下,连通域都是非凸的。对于线状、面状及体状生长元可以看成是有多个点生长元组成的,本算法对于任意形状的生长元及任意形状的障碍物或约束条件都适用,验证了算法的正确性。

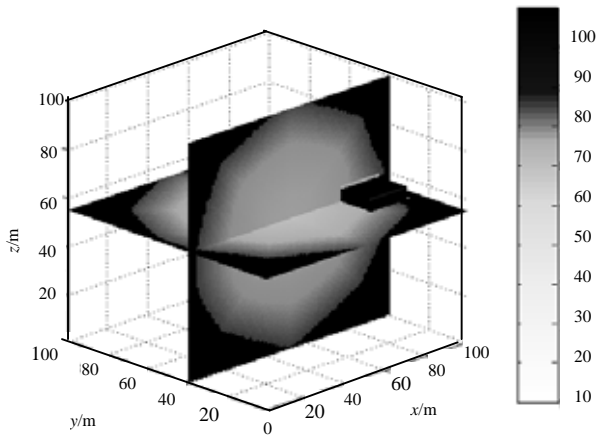


图1 利用本算法生成的缓冲体示意图1

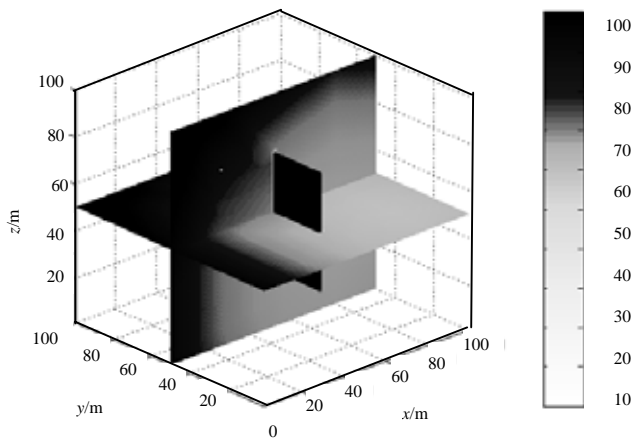


图2 利用本算法生成的缓冲体示意图2

缓冲半径以及缓冲体体元个数与 CPU 时间的关系分别如图 3、图 4 所示。

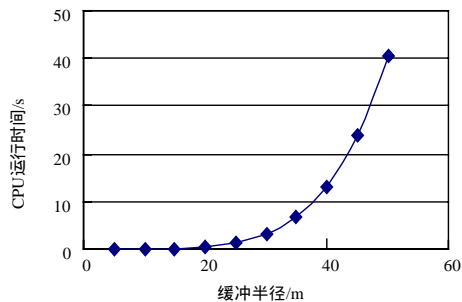


图3 缓冲半径与 CPU 时间关系图

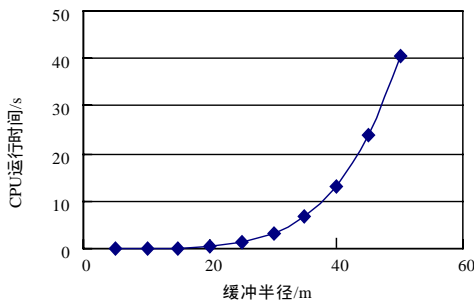


图4 缓冲体体元个数与 CPU 时间关系图

缓冲半径和缓冲体体元个数分别与 CPU 运行时间的关系, 测试数据  $100 \times 100 \times 100$ , 障碍物为长方体, 占整个数据量的 0.97%, 发生元为点。该算法的时间复杂度为  $O(V)$ 。

算法的空间需求主要与桶的个数以及每个桶中元素的个数有关。在本算法中桶的数目固定为 3。每个桶中元素的个数与边界特征体元的数目及缓冲半径有关, 对于  $n \times n \times n$  的数据, 其最大数不会超过  $O(n^3)$ 。

#### 4 非均质缓冲体生成

有约束的三维缓冲体生成算法的基础是图的最短路径算法, 在该算法中最短距离是一系列相邻体元之间的局部距离之和, 面邻域、边邻域和角邻域之间的局部距离采用的是固定的数值。

在非均质的三维缓冲体生成中, 最短距离是最短路径的长度, 它仍然可以表示为一系列相邻体元之间的局部距离之和。但这里的局部距离  $e$  不再是近似的欧氏距离, 对于污染源的扩散可以理解为一个体元扩散到另一个相邻体元所遇到的阻力。

在实际应用中, 可以通过一定的应用模型对每个体元赋予一个属性值, 表示经过该点的阻抗, 如果某点不可逾越, 则将该体元的属性赋为负值。也就是说, 具体的算法实现有约束的三维缓冲体完全相同, 不同的是局部距离不是固定的数值, 而是表示经过某体元的阻抗值, 对于无约束的情况和有约束的情况都可处理的。

#### 5 结束语

针对地质应用, 根据生长元是否向周围均匀扩散, 本文将缓冲体分析分为均质缓冲体分析和非均质缓冲体分析; 根据在生长元周围形成缓冲体时是否存在约束条件或不可逾越的障碍物时, 将缓冲体分析分为无约束缓冲体分析和有约束缓冲体分析。

距离变换是缓冲体分析的基础, 本文重点研究了有约束的缓冲体的生成算法, 算法思想为等值面的扩张, 并将最短距离转变成图的最短路径问题, 算法复杂度为  $O(V)$ 。

最后, 通过将距离的概念进一步推广为阻力距离, 从而将有约束的缓冲体生成算法应用到非均质缓冲体生成。随着三维 GIS 的发展, 缓冲体分析将具有重要的应用价值。

#### 参考文献

- 1 Rosenfeld A, Pfaltz J L. Sequential Operations in Digital Picture Processing[J]. J. Assoc. Comp. Mach., 1966, 13(4): 471-494.
- 2 Smith M J. Distance Transforms as a New Tool in Spatial Analysis and GIS[Z]. (2004-12). <http://www.desmith.com>.
- 3 李成名, 陈 军. 面目标 Voronoi 图生成的动态距离变换策略[J]. 遥感信息, 2000, (1): 6-11.
- 4 李芳玉, 潘 懋, 朱 雷. 三维缓冲体生成栅格算法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(9): 1928-1932.
- 5 Verwer B H, Verbeek P W, Dekker S T. An Efficient Uniform Cost Algorithm Applied to Distance Transforms[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(4): 425-429.