

利用约束满足问题进行多洞面实体相似性度量

陈占龙¹ 吴 亮¹ 谢 忠¹ 张丁文^{1,2}

1 中国地质大学(武汉)信息工程学院,湖北 武汉,430074
2 哈尔滨工业大学(深圳)计算机学院,广东 深圳,518055

摘 要:多洞面实体作为现实世界的抽象,主要用来表示拥有多个内部边界的地理实体,如包含多个湖泊的区域,或带有岛屿的湖泊。为了度量这些空间实体,提出了一种顾及多约束的多洞面实体相似性度量模型,该模型将多洞区域看做微场景,将洞视为空间对象,洞之间的方向表示为空间分布关系。顾及复杂多洞面实体中洞与洞之间的方向、几何形状等约束条件,利用傅里叶描述子来描述洞的形状,使用方向特征矩阵来表示洞之间的分布,将相似性度量过程转换变成满足约束条件问题。利用由结点和边组成的关联图对约束条件的匹配过程进行描述。采用伊朗西北部的乌鲁米耶湖作为实验数据,对其不同年份的形态进行相似性度量,实验结果表明该方法简单可行且不失精度。

关键词:多洞区域;相似性度量;形状描述子;空间实体;关联图

中图法分类号:P208 **文献标志码:**A

开放地理空间协会(Open Geospatial Consortium, OGC)在定义面对象作为地理数据库中的简单要素时提到了带洞面的存在^[1],“带洞面实体对象是一个二维平面,由一条外边界和若干条内边界组成;内边界形成了面实体对象中的洞,带洞面实体对象的外部区域是不连续的,每个洞都包含了外部区域的一个分区”。文献[2]在描述 GIS 处理的现实问题时也提到了带洞面,如“圣马力诺共和国被意大利包围”,其他类似的情况如南非的休伦湖完全包围着岛屿 Lesotho 和 Manitoulin,前东德包围着西柏林等,上述文献对带洞面实体进行了定义,并对带洞面实体的现实情形进行了描述。空间实体的相似性度量是一个重要课题,在空间实体匹配方面占有举足轻重的地位,面实体的匹配是空间数据库的更新和融合的核心问题,面实体的几何相似性度量是决定匹配的关键。文献[3]研究了空间实体的拓扑、几何等匹配算法。在面实体之间的拓扑相似度匹配方面,文献[4]在空间关系的 4-交矩阵和 9-交矩阵基础上进行了空间相似性度量的研究,文献[5-6]在该研究的基础上,使用模糊隶属函数定义了空间拓

扑,包括一个简单面和一个带洞面之间的 23 种拓扑关系、两个单洞面之间的 152 种拓扑关系及一个不带洞面和一个多洞面之间的拓扑相似度等,文献[7]对经典的 9-交集模型进行了改进,利用分解的思想建立了复合面状对象拓扑关系的表达模型。

在面实体之间的几何相似度方面,由于带洞面实体中的洞可表现为形成区内外边界的线圈^[1],现阶段的模型大多利用成熟的形状描述子来精确描述面实体,如豪斯多夫距离^[8]、基于形状图像检索的弹性匹配^[9]、尺度空间表示^[10-11]、傅里叶描述子^[12-16]、小波描述子^[17-19]、链条编码表示^[20]、多边形近似^[21-23]、光滑曲线分解^[24]及语法分析^[25]等,取得了较好的效果。

复杂带洞面实体的相似性度量除了需要对几何图形的整体和局部特征都能较好地进行描述外,由于带洞面实体的组合复杂性,还需顾及多洞区域之间的空间分布关系,而不仅仅是对带洞面实体的单圈边界进行描述和度量。现有的模型将带洞面实体机械割裂开来进行度量,对多洞面实体中洞的方向关系^[26]考虑不足。本文将多洞面

实体视为空间微场景(空间场景包含一组空间对象及对象间的空间关系)来度量多洞面实体之间的相似度,该算法可应用于检索、分类更新不同来源的地理空间数据。

1 多洞面实体相似度约束满足条件

1.1 约束满足条件

本文将多洞面实体间的相似度计算转换为约束满足问题(constraint satisfaction problem, CSP),并以多洞面实体中边界的形状及洞之间的方向作为约束条件。对于带 m 个洞的多洞面实体 R_m ,度量其与多洞面实体 R_n 相似度的 CSP 中包含了:

- 1)与 R_n 和 R_m 的外边界相对应的变量 e_n 和 e_m 。
- 2)与 R_n 中的洞相对应的 n 个变量 $H_1 \cdots H_n$ 的集合。
- 3)对于每个变量 H_i ,实体 R_m 中与 H_i 可能存在对应关系的变量集合 $H_i = \{H_1 \cdots H_l\}$ 。
- 4)对于每个变量 H_i ,存在描述形状的一元约束 s_i 。
- 5)对于每对变量 (H_i, H_j) ,描述了它们之间方向关系的二元约束 d_{ij} 。

解决该约束满足问题的关键在于基于所有约束条件将 R_m 与 R_n 中的洞进行相互匹配。本文使用由节点和边组成的关联图来表现 R_n 中的约束(见图 1),每个节点上的值与边界的几何约束相对应,每条边上的值则描述了洞之间的方向约束。由于所有的洞都位于 R_n 外边界的内部,因此不考虑外边界与洞之间的方向,即节点 e 与其他节点间不存在边。

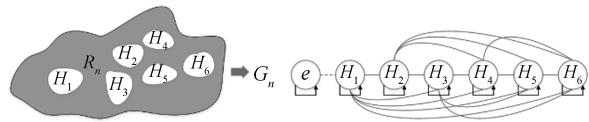


图 1 多洞区 R_n 中洞间约束的关联图
Fig.1 Association Graph of Multiple Constraints in R_n

两个不同多洞面实体的关联图通常包含了不同数量的节点, R_n 与 R_m 不一定具有相同数量的洞,因此两个多洞实体之间的匹配存在 3 种类型的情形。

- 1)完整的解决方案。 R_m 的关联图 G_m 中的子关联图 G'_m 与 R_n 的关联图 G_n 相匹配,即 R_n 中所有的洞和方向关系在 R_m 中都能找到对应(图 2(a))。
- 2)不完整的解决方案。 G_m 的子关联图 G'_m 与 G_n 的子关联图 G'_n 相匹配,即 R_n 中洞及方向关系的

子集在 R_m 的子集中找到对应(图 2(b))。

3)不存在解决方案(图 2(c))。

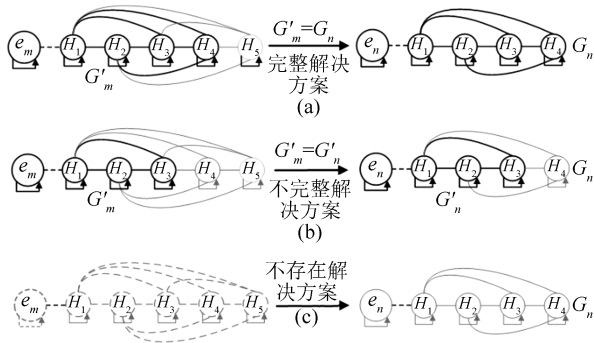


图 2 两个多洞实体间的 3 种匹配情形
Fig.2 Three Matching Cases Between Two Multi-holed Regions

1.2 形状相似性约束

对两个实体边界进行准确的几何形状相似度量时,需要对边界进行详细的描述。本文使用多等级弦长弧段弯曲度的傅里叶描述子来描述边界。

将形状描述为一组空间点的有序集合 $\{P_i = (x_i, y_i), i = 1, 2 \cdots N\}$,假设 P_0 是起始点,则 c_i 可表示为弧段 $\overline{P_0 P_i}$ 的长度,对点 P_i 第 t 级弦长的弧段弯曲度 $\theta_t(c_i)$ 执行快速傅里叶变换,可得:

$$a(m) = \frac{1}{N'} \sum_{j=0}^{N'-1} \theta_t(c_j) e^{-j2\pi mi/N'}, m = 0, 1 \cdots N' - 1 \tag{1}$$

式中, $a(m)$ 是第 t 级弦长弧段弯曲度的快速傅里叶描述子,则集合 $a_t = \{|a_t(0)|, |a_t(1)| \cdots |a_t(N'-1)|\}$ 描述了坐标点集 $\{P_i = (x_i, y_i), i = 1, 2 \cdots N\}$ 第 t 级弦长的弧段弯曲度; N 表示有序集合中所有点的个数; j 对应有顺序点集中的某一点 P_j ; i 为虚数单位。取 $t = 1, 2 \cdots N$ 即可得到形状 A 、 B 的描述子 α_A 和 α_B ,其中 α_t^A 、 α_t^B 分别表示形状 A 、 B 坐标点集的第 t 级弦长的弧段弯曲度集合:

$$\alpha_A = \{a_1^A, a_2^A \cdots a_N^A\}, \alpha_B = \{a_1^B, a_2^B \cdots a_N^B\} \tag{2}$$

对描述子 α 执行标准化运算,形状 A 和 B 之间的差异度可被定义为:

$$d(A, B)_s = (\sum_{t=1}^N |a_t^A - a_t^B|^2)^{1/2} \tag{3}$$

根据形状差异度,且基于差异度及相似度互余的事实, A 和 B 的形状相似度可定义为:

$$S(A, B)_s = 1 - d(A, B)_s \tag{4}$$

1.3 方向相似性约束

为了有效度量洞之间的方向相似度,本文用

特征矩阵来描述两个空间区域的最小外包矩形 (minimum bounding rectangle, MBR) 之间的方向。

定义 1 特征矩阵: 对于矩形对象 A 和 B , 特征矩阵定量地描述了它们之间的空间约束。特征

$$\mathbf{F}_{A,B} = \begin{pmatrix} C(A_{x-}, B_{x-}) + C(A_{x-}, B_{x+}) & C(A_{x+}, B_{x-}) + C(A_{x+}, B_{x+}) \\ C(A_{y-}, B_{y-}) + C(A_{y-}, B_{y+}) & C(A_{y+}, B_{y-}) + C(A_{y+}, B_{y+}) \end{pmatrix} = [f_x \quad f_y]^T \quad (5)$$

式中, C 表示矩形对象 A, B 的边投影至 x 轴及 y 轴上形成的端点间的排序关系。将矩形对象 A, B 的边投影至 x 轴及 y 轴上, 可分别得到 A, B 的投影区间 $(A_{x-}, A_{y-}, A_{x+}, A_{y+})$ 与 $(B_{x-}, B_{y-}, B_{x+}, B_{y+})$, A_{x-} 与 A_{y-} 表示 A 左下角的 x 和 y 坐标, A_{x+} 与 A_{y+} 分别表示 A 右上角的 x 和 y 坐标。 $B_{x-}, B_{y-}, B_{x+}, B_{y+}$ 同理。

本文利用 4 维网格表示法来描述特征矩阵的邻域空间, 如图 3 所示, 两个垂直平面的轴分别标记为 x_1, x_2 和 y_1, y_2 , 代表着特征值元组对中的 4 个特征值, 并与矩形投影区间的约束相对应。 x_1-x_2 平面中 13 个顶点所对应的特征值元组被标记在投影网格上, 每一个顶点 (x_{1i}, x_{2i}) 都有一个对应的 y_1-y_2 平面且 (x_{1i}, x_{2i}) 为该平面原点, 此平面描述了矩形的 y 轴投影区间约束。相似地, 在每个 y_1-y_2 平面上有 13 个顶点分别与 13 个特征值元组相对应。通过将每两个相邻顶点进行连接, 可得到特征矩阵邻域空间的 4 维网格表示。

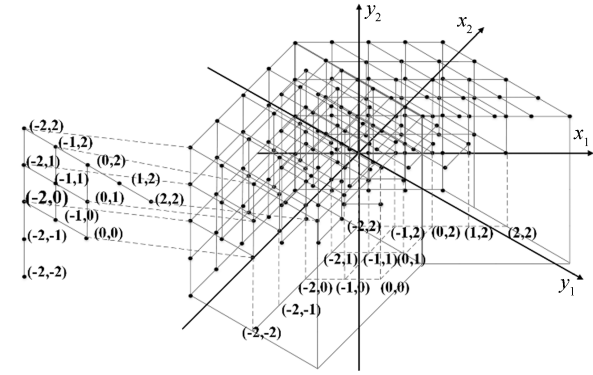


图 3 特征矩阵邻域空间的四维网格

Fig.3 4 Demision Feature Matix Space

在特征矩阵的 4 维网格表示中, 任意两个相邻的矩阵之间的最短距离是 1, 两个矩阵之间最长的距离是 16, 在特征矩阵的概念空间中, 矩阵之间越远, 其方向差别越大。研究发现, 两个矩阵方向差别与其 4 维网格中的最长距离成比例, 因此两个矩阵方向之间的相似度可以表示为:

$$S(d_1, d_2) = 1 - \frac{D(F_1, F_2)}{16} \quad (6)$$

其中, $D(F_1, F_2)$ 表示在 4 维网格表示中特征矩阵 F_1 与 F_2 之间的距离。

矩阵 $\mathbf{F}_{A,B}$ 的构建主要基于 A 和 B 在 x 和 y 轴投影区间端点间的顺序关系。使用特征值元组 f_x, f_y 对特征矩阵进行化简, 则可分别描述矩形对象 A 和 B 在 x 和 y 轴投影区间之间的约束。

2 多洞面实体综合度量

建立多洞面实体 R_n 和 R_m 间的匹配关联图有两个步骤, 其中与 R_n 对应的关联图 G 的节点集为 $\{g_1 \cdots g_n\}$, 与 R_m 对应的关联图 H 的节点集为 $\{h_1 \cdots h_m\}$ 。首先根据 G 与 H 间的匹配关系生成关联图节点。若 H 的节点 h_j 满足 G 的节点 g_i 的约束, 则创建节点 $a_{ij}(g_i, h_j)$ 来描述这个对应关系。其次, 根据洞之间的关系创建边来连接对应节点。使用边连接节点 $a_{ij}(g_i, h_j)$ 和 $a_{lk}(g_l, h_k)$ 。在两个洞的匹配方案中, 某个带洞区的每个洞或方向关系在另一个带洞实体中只存在一个对应的洞或方向关系, 满足一对一匹配的约束。

假设多洞区 R_n 和 R_m 间存在 t 对相匹配的洞, S_{H_i} 为第 i 对洞的几何相似度, w_{H_i} 为该洞对中参照洞的权重, 通过累积所有洞对的几何相似度可得区 R_n 和 R_m 的几何相似度 S_s :

$$S_s = \frac{\sum_{i=1}^t w_{H_i} \cdot S_{H_i}}{\sum_{i=1}^t w_{H_i}} \quad (7)$$

假设多洞区 R_n 和 R_m 间存在 t 对相匹配的洞和 $t \times (t-1)/2$ 对匹配方向关系, S_{D_i} 是第 i 对方向关系的方向相似度, w_{D_i} 是与方向关系对应的参照洞的权重, 通过累积所有方向关系相似度得到可得 R_n 和 R_m 的方向相似度 S_D 。

$$S_D = \frac{\sum_{i=1}^{t(t-1)/2} w_{D_i} \cdot S_{D_i}}{\sum_{i=1}^{t(t-1)/2} w_{D_i}} \quad (8)$$

假设形状和方向相似度的全局权重分别为 w_s 和 w_D , 基于洞的匹配情况可计算出多洞区 R_n 和 R_m 的相似度 S' :

$$S'_{R_n, R_m} = \frac{(w_s \cdot S_s) + (w_D \cdot S_D)}{w_s + w_D} \quad (9)$$

为了确保度量准确, 还需考虑到 R_n 与 R_m 间不匹配的洞对相似度所产生的影响, 将此描述为洞的匹配完整度, 并将其纳入到多洞面实体相似度的计算。

匹配完整度 S_C 是多洞区之间不匹配洞的比例函数,函数值属于区间 $[0, 1]$ 。对于分别有 n 和 m 个洞的多洞区 R_n 和 R_m ,如果它们之间有 t 对匹配洞,并假设 α 和 β 分别为 R_n 和 R_m 不匹配洞的权重,则匹配完整度的计算公式为:

$$S_{C(R_n, R_m)} = \frac{t}{t + \alpha(n - t) + \beta(m - t)} \quad (10)$$

在空间场景匹配对象的完整度计算中,为了实现不同的检索目的,权重 α 和 β 的设置存在3种方式:(1) $\alpha = \beta = 1$,两个场景间的不匹配对象具有相同的重要性;(2) $\alpha = \beta = 0$,忽略场景间的不匹配对象;(3) $\alpha = 1, \beta = 0$,仅参照场景中的不匹配对象数量对匹配完整度计算存在影响。本文严格度量两个多洞面实体之间的相似度,即两个多洞实体中的不匹配洞具有同等重要性, $\alpha = \beta = 1$ 。通过匹配完整度可实现不匹配洞对多洞区相似性度量的影响。

多洞区 R_n 和 R_m 间的相似度函数由多洞实体之间的几何相似度、方向关系相似度及洞的匹配完整度组成。

$$S_{R_n, R_m} = S'_{R_n, R_m} \cdot (\omega_C \cdot (S_C - 1) + 1) \quad (11)$$

式中, S'_{R_n, R_m} 为考虑到几何相似度和方向关系相似度的多洞面实体相似度; S_C 为多洞面实体之间的匹配完整度; ω_C 为匹配完整度权重。两个多洞实体之间可能存在若干种匹配解决方案,通过计算及对不同解决方案的相似度进行排序,可得多洞区之间匹配方案的优先度。

3 相似性度量实验与分析

3.1 数据准备

本文利用乌鲁米耶湖 2010 年与 1985 年的数据对所提出的相似性度量模型进行验证(见图 1)。本文将乌鲁米耶湖视为一个多洞实体,岛屿作为其中的洞,因此匹配问题转换为两个多洞实体之间的相似度计算。1985 年的乌鲁米耶湖表现为多洞面实体 R_m ,而 2010 年的乌鲁米耶湖则表现为多洞面实体 R_n 。可以观察到,由于湖的缩减, R_m 中的洞 H'_5 从区 R_n 中消失了。

3.2 相似度计算与分析

为了创建 R_n 和 R_m 间匹配关联图的节点,本文利用多级弦长弯曲度计算每对洞之间的几何相似度。根据式(1)~(4)进行计算可得表 1,描述了 R_n 和 R_m 的外边界及每对洞的几何相似度。

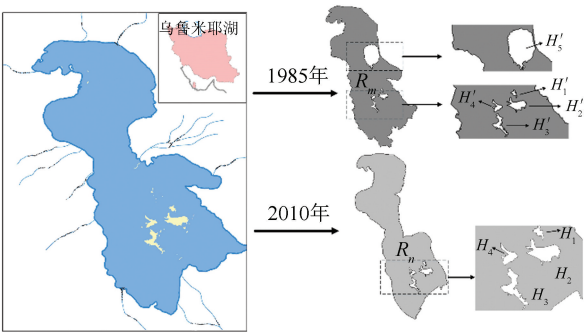


图 4 乌鲁米耶湖
Fig.4 Lake Urmia

表 1 R_n 和 R_m 外边界及每对洞的几何相似度
Tab.1 Similarity of Outer and Holes of R_n and R_m

e_m	H'_1	H'_2	H'_3	H'_4	H'_5
e_n	0.901 75				
H_1	0.827 52	0.683 2	0.712 96	0.704 29	0.682 88
H_2	0.685 5	0.849 12	0.732 75	0.786 79	0.762 22
H_3	0.704 13	0.729 53	0.684 83	0.759 61	0.684 23
H_4	0.721 28	0.751 07	0.706 49	0.747 27	0.712 13

关联图的构建始于在 R_n 中随机选择一个洞 H_x ,并从 R_m 中寻找其匹配洞。将 H_1 作为检索的起始洞,并设检索洞的优先顺序为 H_2 、 H_3 、 H_4 ,到目前为止可得 R_n 和 R_m 间的匹配方案 $\{(H_1, H'_1), (H_2, H'_2), (H_3, H'_4), (H_4, H'_5)\}$,注意到本文并不考虑洞和外边界之间的方向。假设多洞实体中的每个洞都具有同等重要性,即 R_n 的洞在 R_m 中检索匹配对象的优先顺序是随机的,且不同的优先顺序会产生不同的匹配方案,清除重复后,6种可能的匹配方案及相应的关联图如图 5 所示。

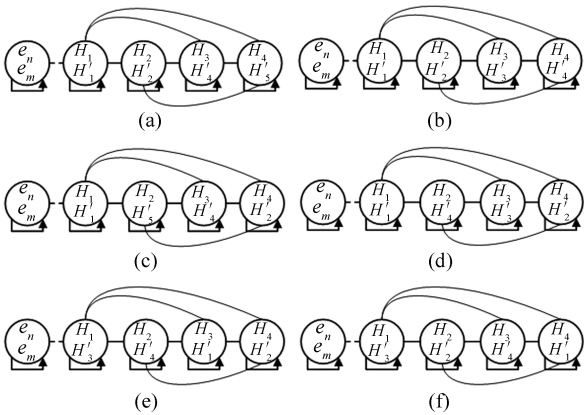


图 5 匹配关联图

Fig.5 Association Graph of Holes Matching

在特征矩阵中,最小外包矩形之间的方向关系被分解为对应投影区间的区间约束。在图 6

中,使用 x - y 平面来描述 R_n 和 R_m 中的洞的最小外包矩形及投影区间端点。

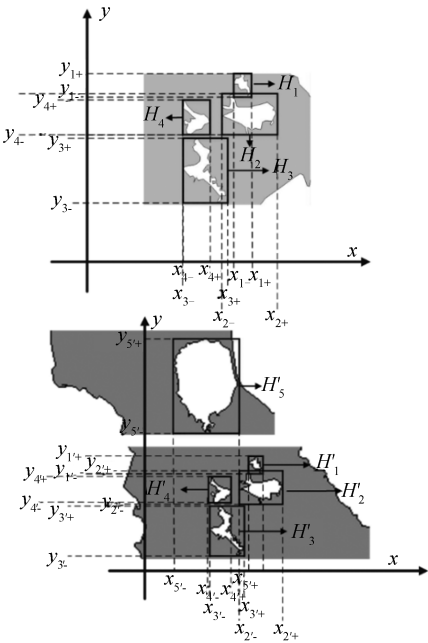


图 6 投影区间

Fig.6 Projection Interval

每两个洞 H_A 和 H_B 间存在方向关系,且 H_A 相对于 H_B 的方向不能简单地由 H_B 相对于 H_A 的方向推断而出。因此将每个洞都作为参照对象来分别计算方向特征矩阵,并得到表 2 和表 3。

根据式(5)~(6)计算出洞对之间的几何及方向相似度,并在关联图的节点和边上附加相应的相似度值,解决方案 1 中的关联图如图 7(a)所示,其他方案的关联图如图 7(b)~7(f)所示。

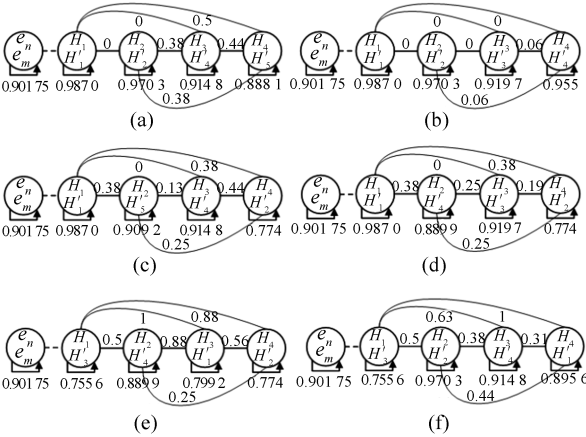


图 7 其余方案的关联图

Fig.7 Association Graph of Other Solutions

表 2 对象 A 的方向矩阵

Tab.2 Direction Matrix of Region A

	H_1	H_2	H_3	H_4
H_1		$[(0,0) (0,2)]^T$	$[(2,2) (2,2)]^T$	$[(2,2) (2,2)]^T$
H_2	$[(-2,2) (-2,0)]^T$		$[(0,2) (2,2)]^T$	$[(2,2) (-1,2)]^T$
H_3	$[(-2,2) (-2,-2)]^T$	$[(-2,0) (-2,-2)]^T$		$[(-1,2) (-2,-2)]^T$
H_4	$[(-2,-2) (-2,-2)]^T$	$[(-2,-2) (-1,0)]^T$	$[(-1,0) (2,2)]^T$	

表 3 对象 B 的方向矩阵

Tab.3 Direction Matrix of Region B

	H'_1	H'_2	H'_3	H'_4	H'_5
H_1		$[(0,0) (0,2)]$	$[(2,2) (2,2)]$	$[(2,2) (2,2)]$	$[(-2,-2) (2,2)]$
H_2	$[(-2,2) (-2,0)]$		$[(0,2) (2,2)]$	$[(2,2) (-2,2)]$	$[(1,2) (-2,-2)]$
H_3	$[(-2,2) (-2,-2)]$	$[(-2,0) (-2,-2)]$		$[(0,2) (-2,-2)]$	$[(0,2) (-2,-2)]$
H_4	$[(-2,-2) (-2,-2)]$	$[(-2,-2) (0,0)]$	$[(-2,0) (2,2)]$		$[(0,0) (-2,-2)]$
H_5	$[(-2,-2) (2,2)]$	$[(-2,-1) (2,2)]$	$[(-2,0) (2,2)]$	$[(-2,2) (2,2)]$	

为了对匹配完整度进行精确度量,本文中的不匹配洞都拥有同等重要性,即式(1)~(2)中不匹配洞的权重 α 和 β 的值为 1。由于匹配完整度只受到匹配和不匹配洞数量的影响,因此 6 种匹配方案中的 R_n 和 R_m 的匹配完整度相等:

$$S_{C(R_n,R_m)} = \frac{4}{4 + (4 - 4) + (5 - 4)} = 0.8$$

(12)

根据式(7)~(8),可以计算出每个匹配方案中形状和方向的总相似度。为了简化案例复杂度及增强可读性,本文将式(7)~(11)中的所有权重

设为 1。表 4 描述了每个解决方案中的形状和方向相似度,基于每个解决方案中的形状和方向相似度及匹配完整度,通过计算可得 6 个方案的总体相似度。同时,对本文中提出的复杂多洞面实体相似性度量模型在计算几何相似度部分与同类算法中利用多级弦长弯曲度复函数的计算方法^[27]进行了对比,计算结果列举在表 4 中,从表 4 中可以看出,在计算轮廓的相似度方面,本文模型与文献^[27]基本一致。但由于本文重点解决的是复杂多洞面实体的相似度计算,解决问题的复杂

度规模远远超过已有相关模型。

通过表4可以看出, R_n 和 R_m 间匹配方案的优先顺序为 S_2 、 S_4 、 S_3 、 S_1 、 S_6 、 S_5 。方案 S_2 具有最高的相似度,匹配的洞对分别为 $(H_1、H'_1)$ 、 $(H_2、H'_2)$ 、 $(H_3、H'_3)$ 、 $(H_4、H'_4)$,洞 H'_5 在 R_n 中

没有匹配对象,因为其所在地在2010年已和陆地连为一体。在实际应用中,根据洞间的匹配顺序及每个方案的相似度,用户可以自行选择合适的解决方案。

表4 解决方案的形状相似度和方向相似度
Tab.4 Shape and Direction Similarity of Solutions

解决方案	1	2	3	4	5	6
形状相似度	0.787/0.751	0.777/0.731	0.775/0.728	0.762/0.720	0.739/0.711	0.76/0.721
方向相似度	0.717	0.98	0.737	0.758	0.322	0.457
综合相似度	0.752	0.879	0.756	0.76	0.53	0.508

注:A/B中,A是本文方法结果,B为文献[27]结果

4 结 语

为解决多洞面实体之间的匹配问题,本文提出多洞面实体的相似性度量模型,将洞看作独立的空间对象实体,顾及洞之间的方向关系,洞的几何形状和洞之间的方向为约束条件,将复杂多洞面实体的相似性度量过程转变成一个满足约束条件问题,同时采用多级弦长弯曲度半径作为基本的形状描述子。在后续的研究中将着重于研究复杂面实体中单个实体的相对位置对匹配的影响,分析该模型的时间复杂度并得出相应的最佳方案,提高匹配的正确性和唯一性。

参 考 文 献

[1] OpenGIS Consortium Inc. OpenGIS Simple Features Specification for SPL[R]. OpenGIS Consortium, Wayland, M A, 1999

[2] Egenhofer M J, Clementini E, di Felice P. Topological Relations Between Regions with Holes [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1994, 8(2): 129-142

[3] Xu Feng, Deng Min, Zhao Binbin, et al. A Detailed Investigation on the Methods of Object Matching [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, 11(5): 657-663(徐枫,邓敏,赵彬彬,等.空间目标匹配方法的应用分析[J].地球信息科学学报,2009,11(5):657-663)

[4] Frank A U, Kuhn W. CellGraphs: A Provable Correct Method for the Storage of Geometry[C]. International Symposium on Spatial Data Handling, Seattle, USA, 1986

[5] Egenhofer M J, Vasardani M. Spatial Reasoning with a hole[C]. International Conference on Spatial Information Theory, Melbourne, Australia, 2007

[6] Vasardani M, Egenhofer M J. Single-Holed Regions: Their Relations and Inferences[C]. Interna-

tional Conference on Geographic Information Science, Park City, USA, 2008

[7] Chen Zhanlong, Zhou Lin, Gong Xi, et al. A Quantitative Calculation Method of Spatial Direction Similarity Based on Direction Relation Matrix[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(7): 813-821(陈占龙,周林,龚希,等.基于方向关系矩阵的空间方向相似性定量计算方法[J].测绘学报,2015,44(7):813-821)

[8] Chetverikov D, Khenokh Y. Matching for Shape Defect Detection [C]. International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns, Berlin, Heidelberg, 1999

[9] Bimbo A D, Pala P. Visual Image Retrieval by Elastic Matching of user Sketches [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 19(2): 121-132

[10] Abbasi S, Mokhtarian F, Kittler J. Curvature Scale Space Image in Shape Similarity Retrieval[J]. *Multimedia Systems*, 1999, 7(6): 467-476

[11] Mokhtarian F, Abbasi S, Kittler J. Efficient and Robust Retrieval by Shape Content Through Curvature Scale Space [J]. *Series on Software Engineering and Knowledge Engineering*, 1997, 8(2): 51-58

[12] Arbter K, Snyder W E, Burkhardt H, et al. Application of Affine-Invariant Fourier Descriptors to Recognition of 3-D Objects[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(7): 640-647

[13] Chellappa R, Bagdazian R. Fourier Coding of Image Boundaries [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984 (1): 102-105

[14] Krzyżak A, Leung S Y, Suen C Y. Reconstruction of Two-Dimensional Patterns from Fourier Descriptors [J]. *Machine Vision and Applications*, 1989, 2(3): 123-140

[15] Mehtre B M, Kankanhalli M S, Lee W F. Shape

Measures for Content Based Image Retrieval: A Comparison[J]. *Information Processing & Management*, 1997, 33(3): 319-337

[16] van Otterloo P J. A Contour-Oriented Approach to Shape Analysis[M]. Hertfordshire, UK: Prentice Hall International (UK) Ltd., 1991

[17] Ohm J R, Bunjamin F, Liebsch W, et al. A Set of Visual Feature Descriptors and Their Combination in a Low-level Description Scheme [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2000, 16 (1): 157-179

[18] Tieng Q M, Boles W W. Recognition of 2D Object Contours Using the Wavelet Transform Zero-crossing Representation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1997 (8): 910-916

[19] Yang H S, Lee S U, Lee K M. Recognition of 2D Object Contours Using Starting-Point-Independent Wavelet Coefficient Matching [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 1998, 9(2): 171-181

[20] Iivarinen J, Visa A J E. Shape Recognition of Irregular Objects[C]. International Society for Optics and Photonics, Boston, Massachusetts, 1996

[21] Grosky W I, Mehrotra R. Index-Based Object Recognition in Pictorial Data Management [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1990, 52(3): 416-436

[22] Grosky W I, Neo P, Mehrotra R. A pictorial Index Mechanism for Model-based Matching [J]. *Data & Knowledge Engineering*, 1992, 8(4): 309-327

[23] Mehrotra R, Gary J E. Similar-Shape Retrieval in Shape data Management [J]. *Computer*, 1995, 28 (9): 57-62

[24] Berretti S, del Bimbo A, Pala P. Retrieval by Shape Similarity with Perceptual Distance and Effective Indexing [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2000, 2(4): 225-239

[25] Torokhti A, Howlett P. Syntactic Methods in Pattern Recognition [M]. Atlanta, GA: Elsevier, 1974

[26] Chen Zhanlong, Feng Qiqi, Wu Xincui. Representation Model of Topological Relations Between Complex Planar Objects [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(4): 438-444 (陈占龙, 冯齐奇, 吴信才. 复合面状对象拓扑关系的表达模型 [J]. 测绘学报, 2015, 44(4): 438-444)

[27] Chen Zhanlong, Qin Mengjiao, Wu Liang. Establishment of the Comprehensive Shapes Similarity Model for Complex Polygon Entity by Using Bending Multilevel Chord Complex Function [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(2): 224-232 (陈占龙, 覃梦娇, 吴亮, 等. 利用多级弦长弯曲度复函数构建复杂面实体综合形状相似度量模型 [J]. 测绘学报, 2016, 45(2): 224-232)

Similarity Measurement of Multi-holed Regions Using
Constraint Satisfaction Problem

CHEN Zhanlong¹ WU Liang¹ XIE Zhong¹ ZHANG Dingwen^{1,2}

¹ College of Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

² College of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China

Abstract: Multi-holed plane object, as one of the abstracts of the real world, mainly represent geographic objects having more than one interior boundary, such as areas that contain a few lakes, or lakes with islands. To realize the matching between these spatial objects, the paper proposed a model of similarity measurement on multi-holed regions, with several restrictions being taken into account. In this model, the multi-holed plane object was viewed as a micro-spatial-scene, where holes and direction between holes playing roles of spatial objects and spatial distribution relations respectively. Taking into the direction between holes and the shape of holes account, Fourier descriptor was utilized to describe the shape of holes and Feature Matrix of direction was applied to represent the distribution relationship between holes, then the process of measuring similarity would be transformed into a constraint satisfaction problem (CSP). Association graph containing nodes and edges could be adopted to represent the matching solutions of CSP. In the paper, A case study of Urmia, a lake in Iran, is given

(下转第 785 页)

method of ellipsoid patch is studied and improved, and the improved algorithm is analyzed empirically. The results show that the approximating definite integrals by the improved Rectangular Rule has higher computational efficiency than by the conventional rectangular rule. The improved rectangle method can replace the middle layer algorithm and the bottom algorithm in ellipsoid patch area calculation method and simplify the calculating process. With the help of decimal number type variables in C # language, a high accuracy value of the ellipsoid trapezoidal area is obtained using the improved algorithm. The ellipsoid area of large trapezoidal block can be obtained, and the ellipsoid area of arbitrary polygon can be easily solved also by the improved algorithm.

Key words: Earth ellipsoid; patch; formula for area; ellipsoidal trapezoid

First author: SHI Shouzheng, PhD candidate, lecturer, specializes in cartography and geographic information engineering. E-mail: 2010shishouzheng@tongji.edu.cn

Corresponding author: SHI Yishao, PhD, professor. E-mail: shiyishao@tongji.edu.cn

Foundation support: Major Research Project of the New Round of Overall Land Use Planning of Shanghai Municipal Planning and Land Resources Bureau, No. 2015(D)-002(F)-11.

.....
(上接第 751 页)

to illustrate the whole process of similarity measurement among the shapes of the lake in different years, and the result of experiment is presented to be simple and applicable.

Key words: multi-holed plane object; similarity measurement; shape descriptor; spatial objects; association graph

First author: CHEN Zhanlong, PhD, associate professor, specializes in geo-computation and spatial analysis, and high performance computation. E-mail: Chenzhanlong2005@126.com

Corresponding author: ZHANG Dingwen, PhD. E-mail: dingwenzhang@yahoo.com

Foundation support: The National Key R & D Program of China, No.2017YFC0602204; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China University of Geosciences (Wuhan), No. CUG160226; Open Research Fund of State Key Laboratory of Geography Information Engineering, No.SKLGIE2013-Z-4-1; Open Research Fund of State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, No. 13102; Programs; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41401443, 41671400; the Natural Science Foundation of Hubei Province of China, No. 2015CFA012.