

滚动球变换的数字水深模型多尺度表达

董 箭^{1,2}, 彭认灿^{1,2}, 张立华^{1,2}, 李 宁^{1,2}, 贾帅东^{1,2}

(1. 海军大连舰艇学院海洋测绘科学与工程系, 大连 116018;

2. 海军大连舰艇学院海洋测绘工程军队重点实验室, 大连 116018)

摘要: 空间数据的多尺度表达, 是 GIS 领域研究的重点和难点问题之一。本文以数字水深模型(Digital Depth Model, DDM)为研究对象, 从 DDM 的地理和尺度特性出发, 在分析二维滚动圆变换算法原理的基础上, 通过对二维滚动圆变换算法的维数扩展, 提出一种可用于 DDM 多尺度表达的滚动球变换算法。即利用不同大小的三维空间球体代替二维滚动圆沿给定 DDM 的上侧表面滚动, 得到可保留正向地貌, 缩小或填平小于一定尺度下的海底负向地貌的 DDM, 从保障舰船海上航行安全的角度, 实现对 DDM 的多尺度表达。另阐述了该算法的基本原理和实现步骤, 并在 VC++ 环境下对算法的正确性和有效性进行了验证。实验结果表明, 该算法在符合 DDM 多尺度表达原则的前提下, 能较好地保持 DDM 的基本地形特征, 且具有较高的计算效率。

关键词: 数字水深模型(DDM); 多尺度表达; 滚动圆变换; 滚动球变换; 海洋水深测量

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2012.00704

1 引言

数字水深模型(Digital Depth Model, DDM)是反映海洋水深变化的模型^[1]。作为海底地貌形态的重要表达方式, 数字水深模型不但是保证舰船海上航行安全的主要信息源之一, 而且也是进行海洋地学研究和海上工程建设、考古活动等的重要信息平台^[1-2]。随着我国海洋地理环境建设的发展, DDM 的应用领域日益扩大, 从而导致了多尺度 DDM 的需求。然而在当前的海洋测绘技术体系下, 同时生产满足各种不同应用层次的 DDM 数据及其派生产品的做法显然是不现实也不科学^[3-4]的。事实上, 在同一海区, 不同尺度的 DDM 是对同一海底地表形态的不同表达。因此, 研究原始 DDM 的多尺度表达方法是实现 DDM 多尺度应用的一种有效途径。

作为数字水深模型可视化表达的一种重要形式, 等深线与 DDM 的多尺度表达具有相同的约束原则^[1,5-6]。现有的 DDM 多尺度表达算法大都是对二维等深线图综合算法的三维扩展。比较典型的有点面距法、滤波法、三维 Douglas-Peucker 法、分形法、小波变换法等化简算法^[7-10]。这些算法都是从

DDM 的几何特性出发, 通过删除 DDM 上的某些格网点而同时保留特征点来进行化简的。然而 DDM 综合不是一个简单格网点取舍的几何操作过程, 应充分考虑 DDM 的地理和尺度特性, 维护其空间认知与抽象程度的一致性^[11-12]。2003 年, Shepard M. Smith 提出了一种用于等深线形状化简的滚动圆变换(Rolling Circle Transform)算法^[13], 该方法充分考虑了 DDM 综合中的“扩浅缩深”原则, 保留等深线中具有航海意义的凸部特征点, 并依据阈值(缓冲距)大小对各类凹部特征点进行合理移位, 初步实现了等深线的多尺度表达与自动综合^[14]。

本文在分析二维滚动圆变换算法原理的基础上, 试图通过对二维滚动圆变换算法的维数扩展, 提出 DDM 多尺度表达的滚动球变换算法。即利用不同大小的三维空间球体代替二维滚动圆沿给定 DDM 的上侧表面滚动, 得到可保留正向地貌, 缩小或填平小于一定尺度下的海底负向地貌的 DDM, 从保障舰船海上航行安全的角度, 实现对 DDM 的多尺度表达。

2 滚动圆变换算法及其特性分析

所谓滚动圆变换, 是指由二维平面上一无限光

收稿日期: 2012-11-19; 修回日期: 2012-11-30。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171349); 国家“863”计划项目(2012AA12A406)。

作者简介: 董 箭(1985-), 男, 江苏大丰人, 博士生, 研究方向为海图制图理论与方法。E-mail: d.j-studio@163.com

滑的圆环沿线要素一侧滚动而形成一内痕迹线的一种几何变换。滚动圆变换有左右侧之分^[13]。数学形式上,滚动圆变换等价于线要素左(右)侧缓冲区边界的变换组合^[15-16]。对于分布轴线为 $\{Q_1, \dots, Q_{N+1}\}$ 的线要素 T ,其左(右)侧缓冲区边界变换 $K_L(r)$ ($K_R(r)$)的数学定义为^[17-18]:

$$\begin{cases} T \cdot K_L(r) = \{P_l \mid \{d_e(P_l, T_i) \parallel \overline{T_i} \times \overline{P_l Q_i}\} \leq 0 \mid T_i \in T\} = r \\ T \cdot K_R(r) = \{P_r \mid \{d_e(P_r, T_i) \parallel \overline{T_i} \times \overline{P_r Q_i}\} \geq 0 \mid T_i \in T\} = r \end{cases} \quad (1)$$

其中: r 表示缓冲距; $T \cdot K_L(r)$ 表示线要素 T 的左侧缓冲区边界; $T \cdot K_R(r)$ 表示线要素 T 的右侧缓冲区边界; P_l, P_r 分别表示 $T \cdot K_L(r)$ 、 $T \cdot K_R(r)$ 上任意点; T_i 表示线要素 T 上任意线段; d_e 表示二维欧氏求距运算; \times 表示向量积运算; \parallel 表示向量的取模运算。左侧缓冲区边界变换 $K_L(r)$ 对于线要素 T 分布轴线的左侧具有严格的保凸、保平、减凹变平性,而对于分布轴线的右侧则具有严格的保凹、保平、减凸变平性;与之相反,右侧缓冲区边界变换 $K_R(r)$ 对于线要素 T 分布轴线的右侧具有严格的保凸、保平、减凹变平性,而对于分布轴线的左侧则具有严格的保凹、保平、减凸变平性。式(1)中,滚动圆变换的数学定义为^[13,15]:

$$\begin{cases} T \cdot V_L(r) = T \cdot K_L(r) \cdot K_R(r) \\ T \cdot V_R(r) = T \cdot K_R(r) \cdot K_L(r) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $V_L(r)$ 表示左侧滚动圆变换; $V_R(r)$ 表示右侧滚动圆变换。 $T \cdot V_L(r)$ 表示线要素 T 分别经由左侧缓冲区边界变换 $K_L(r)$ 和右侧缓冲区边界变换 $K_R(r)$ 所得到的曲线 $T \cdot K_L(r) \cdot K_R(r)$,即滚动圆沿线要素 T 左侧滚动形成的曲线; $T \cdot V_R(r)$ 表示线要素 T 分别经由右侧缓冲区边界变换 $K_R(r)$ 和左侧缓冲区边界变换 $K_L(r)$ 所得到的曲线 $T \cdot K_R(r) \cdot K_L(r)$,即滚动圆沿线要素 T 右侧滚动形成的曲线。

如图1所示,对于给定等深线 T (左侧为深水区,右侧为浅水区),经由左侧滚动圆变换 $V_L(r)$ 所得到的曲线 $T \cdot V_L(r)$ 具有保持凸部不变、缩小或填平凹部的特性;而经由右侧滚动圆变换 $V_R(r)$ 所得到的曲线 $T \cdot V_R(r)$ 则具有保持凹部不变、缩小或削平凸部的特性。考虑到等深线多尺度表达的“扩浅缩深”原则,实际应用中,通常对等深线的深水区一

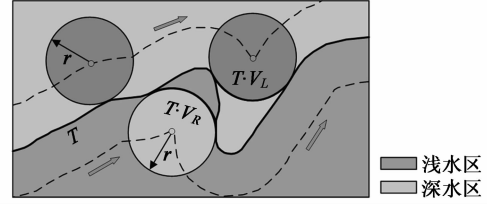


图1 滚动圆变换示意图

Fig. 1 Sketch map of rolling circle transform

侧进行滚动圆变换(图1中对应等深线 T 的左侧滚动圆变换 $V_L(r)$)。通过保留等深线中具有航海意义的凸部特征点,并依据阈值(缓冲距 r)的大小,对各类凹部特征点进行合理移位,以实现等深线的多尺度表达。

3 DDM 多尺度表达的滚动球变换

二维滚动圆变换的“保凸减凹”特性,对于平面海图中顾及舰船海上航行安全的岸线、等深线和岛屿边线等线要素的多尺度表达具有重要意义^[5,6,13]。同时,也启示了我们:对于DDM的多尺度表达,是否可以通过对左(右)侧缓冲区边界变换的维数扩展,利用三维空间的球体代替二维滚动圆沿DDM的一侧滚动,从而达到顾及舰船海上航行安全的DDM多尺度表达的目的。如可行则能通过调节阈值(缓冲距)的大小,保留DDM中影响舰船海上航行安全的正向地貌,缩小或填平小于一定尺度下的负向地貌,以实现DDM的多尺度表达。

3.1 三维缓冲体分析

三维缓冲体分析的数学定义^[19-20]如下:

$$B(T, r) = \{P(x, y, z) \mid \{d_e(P, Q_T) \mid Q_T(x_T, y_T, z_T) \in T\} \leq r\} \quad (3)$$

式(3)中: B 表示空间要素 T 的缓冲体; $P(x, y, z)$ 表示缓冲体 B 上任意点; $Q_T(x_T, y_T, z_T)$ 表示空间要素 T 上采样点; $d_e(P, Q_T)$ 表示 P 与 Q_T 的三维欧氏距离 $[(x-x_T)^2 + (y-y_T)^2 + (z-z_T)^2]^{1/2}$ 。式(3)的含义可理解为:到空间要素 T 距离为 r 的缓冲体 B ,应是那些到空间要素 T 上采样点 Q_T 的三维欧氏距离 $d_e(P, Q_T) \leq r$ 的点 P 的集合。

3.2 正(负)向缓冲体边界变换

二维条件下,滚动圆变换的关键在于线要素左(右)侧缓冲区边界的正确生成。作为一类特殊形

态的三维空间单值曲面,DDM 某一坐标方向的坐标值可由另两个坐标的单值函数示出^[5,8]。即:DDM 上格网点(采样点) Q_T 的坐标值 (x_T, y_T, z_T) 之间,存在 $z_T = f(x_T, y_T)$ 的函数关系。利用式(3),并令 $d_e(P, Q_T) = r$,则 DDM 缓冲体边界上任意点 P 的坐标值 (x, y, z) 之间存在如下函数关系:

$$\begin{cases} z' = f'_{Q_T}(x, y) = f(x_T, y_T) + \\ [r^2 - (x - x_T)^2 - (y - y_T)^2]^{1/2} \\ z'' = f''_{Q_T}(x, y) = f(x_T, y_T) - \\ [r^2 - (x - x_T)^2 - (y - y_T)^2]^{1/2} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中:若 $z' \geq f(x_T, y_T)$,则表示 (x, y, z') 位于 DDM 上方,记为 DDM 缓冲体上边界点 P_u ;反之,若 $z'' \leq f(x_T, y_T)$,则表示 (x, y, z'') 位于 DDM 下方,记为 DDM 缓冲体下边界点 P_d 。基于(4)式,DDM 正(负)向缓冲体边界变换 $K_U(r)$ ($K_D(r)$)定义为:

$$\begin{cases} T \cdot K_U(r) = B'(T, r) = \{P_u(x, y, z') \mid z' = \\ f'_{Q_T}(x, y) \mid Q_T(x_T, y_T, z_T) \in T\} \\ T \cdot K_D(r) = B''(T, r) = \{P_d(x, y, z'') \mid z'' = \\ f''_{Q_T}(x, y) \mid Q_T(x_T, y_T, z_T) \in T\} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: $B'(T, r)$ 表示 DDM 缓冲体上边界; $B''(T, r)$ 表示 DDM 缓冲体下边界。正向缓冲体边界变换 $K_U(r)$ 具有严格的保凸、保平、减凹变平性;与之相反,负向缓冲体边界变换 $K_D(r)$ 则具有严格的保凹、保平、减凸变平性。

表 1 缓冲体边界变换特性分析

Tab. 1 Characteristics of 3D-buffer boundary transform

变换类型	正向地貌 α	负向地貌 β
正向缓冲体边界变换		
负向缓冲体边界变换		

如表 1 所示,正向地貌 α 和负向地貌 β 分别由

DDM 格网单元 GFPH、FEDP、PDCB 和 PBAH 构成。其中, P 为地形特征点,其余格网点水深值相等。经由正向缓冲体边界变换 $K_U(r)$ 后,地形特征点 P_u 与 $\alpha \cdot K_U(r)$ 中,其余格网点的相对距离保持不变(保凸、保平性),而与 $\beta \cdot K_U(r)$ 中,其余格网点的相对距离则减小(减凹变平性);经由负向缓冲体边界变换 $K_D(r)$ 后,地形特征点 P_d 与 $\alpha \cdot K_D(r)$ 中,其余格网点的相对距离减小(减凸变平性);而与 $\beta \cdot K_D(r)$ 中,其余格网点的相对距离则保持不变(保凹、保平性)。

3.3 滚动球变换

所谓滚动球变换,是指三维空间一无限光滑球体沿 DDM 一侧滚动而形成一内痕迹面的一种几何变换。滚动球变换有正(负)向之分。其数学形式上,滚动球变换等价于 DDM 正(负)向缓冲体边界变换 $K_U(r)$ ($K_D(r)$)的组合。即:

$$\begin{cases} T \cdot V_U(r) = T \cdot K_U(r) \cdot K_D(r) \\ T \cdot V_D(r) = T \cdot K_D(r) \cdot K_U(r) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: $V_U(r)$ 表示正向滚动球变换; $V_D(r)$ 表示负向滚动球变换; $T \cdot V_U(r)$ 表示 DDM 分别经由正向缓冲体边界变换 $K_U(r)$ 和负向缓冲体边界变换 $K_D(r)$ 所得到的曲面 $T \cdot K_U(r) \cdot K_D(r)$,即滚动球沿 DDM 上侧滚动形成的曲面; $T \cdot V_D(r)$ 表示 DDM 分别经由负向缓冲体边界变换 $K_D(r)$ 和正向缓冲体边界变换 $K_U(r)$ 所得到的曲面 $T \cdot K_D(r) \cdot K_U(r)$,即滚动球沿 DDM 下侧滚动形成的曲面。

如表 2 所示,对于正向地貌 α 和负向地貌 β ,经由正向滚动球变换 $V_U(r)$ 后,地形特征点 P_{u1} 与 $\alpha \cdot V_U(r)$ 中,其余格网点的相对距离保持不变(保持正向地貌),而与 $\beta \cdot V_U(r)$ 中,其余格网点的相对距离则减小(缩小或填平负向地貌);经由负向缓冲体边界变换 $V_D(r)$ 后,地形特征点 P_{d1} 与 $\alpha \cdot V_D(r)$ 中,其余格网点的相对距离减小(保持负向地貌);而与 $\beta \cdot V_D(r)$ 中,其余格网点的相对距离则保持不变(缩小或削平正向地貌)。

3.4 尺度依赖性分析

滚动球变换中,正(负)向滚动球变换 $V_U(r)$ ($V_D(r)$)的构建原理相同,阈值(缓冲距 r)的大小决定了其对 DDM 空间几何形态的影响程度。正向滚动球变换 $V_U(r)$ 所具有的保持正向地貌不变、缩小或填平负向地貌的特性与 DDM 多尺度表达的“扩浅缩深”原则相符,负向地貌的填平程度与阈值(缓

如下 DDM 缓冲体上(下)边界生法:

4.1 算法初始化

数字水深模型是描述海底表面形态空间分布的有序数值序列。从数学的角度,DDM 可用二维矩阵系列取值的有序集合来表示^[9,17,20]。即:

$$T = \{z_{ij} \mid i \in [0, n-1], j \in [0, n-1]\} \quad (8)$$

式(8)中: i, j 表示格网单元行列号; z_{ij} 表示格网点 (i, j) 的水深值; n 表示 DDM 的格网行列数。由上述 DDM 缓冲体上(下)边界的构建原理可知, $B'(T, r)$ 和 $B''(T, r)$ 均满足 DDM 的单值曲面特性。结合式(8),DDM 缓冲体上边界和下边界分别记为 $B'(T, r) = \{z'_{ij} = -v \mid i \in [0, n-1], j \in [0, n-1]\}$ 和 $B''(T, r) = \{z''_{ij} = v \mid i \in [0, n-1], j \in [0, n-1]\}$,其中: v 为足够大的正整数。

鉴于 DDM 缓冲体上(下)边界 $B'(T, r)$ ($B''(T, r)$),可由其上格网点 (i, j) 缓冲体上(下)边界 $B'(z_{ij}, r)$ ($B''(z_{ij}, r)$)的有限或无限并集表示,从而 $B'(z_{ij}, r)$ 和 $B''(z_{ij}, r)$ 可定义为 $B'(T, r)$ 和 $B''(T, r)$ 在格网点 (i, j) 空间邻域 $\Omega(i, j)$ 处的格网单元集合,即: $B'(z_{ij}, r) = \{z'_{xy} = -v \mid (x, y) \in \Omega(i, j)\}$ 和 $B''(z_{ij}, r) = \{z''_{xy} = v \mid (x, y) \in \Omega(i, j)\}$ 。空间邻域 $\Omega(i, j)$ 由格网点 (i, j) 的行列号 i, j 确定,即:

$$\Omega(i, j) = \{(x, y) \mid x \in [\max(i-r, 0), \min(i+r, n-1)],$$

$$\min(i+r, n-1)],$$

$$y \in [\max(j-r, 0), \min(j+r, n-1)]\} \quad (9)$$

基于式(9),对于 T 上任意格网点 (i, j) ,可计算其在空间邻域 $\Omega(i, j)$ 内的缓冲体上边界 $B'(z_{ij}, r)$ 和下边界 $B''(z_{ij}, r)$,即:

$$\begin{aligned} B'(z_{ij}, r) &= \{z'_{xy} = \max(z'_{xy}, z_{ij} + \\ &\sqrt{r^2 - \xi^2[(x-i)^2 + (y-j)^2]}) \mid (x, y) \in \Omega(i, j)\} \\ B''(z_{ij}, r) &= \{z''_{xy} = \min(z''_{xy}, z_{ij} - \\ &\sqrt{r^2 - \xi^2[(x-i)^2 + (y-j)^2]}) \mid (x, y) \in \Omega(i, j)\} \end{aligned} \quad (10)$$

图 3 为 DDM 上格网点 (i, j) 的缓冲体上边界 $B'(z_{ij}, r)$ 和下边界 $B''(z_{ij}, r)$ 解算示意图。空间邻域 $\Omega(i, j)$ 在平面上投影为以格网点 (i, j) 的行列号 i, j 为圆心,半径为缓冲距 r 的圆所包含的全部格网单元的集合。对空间邻域 $\Omega(i, j)$ 内的任意格网

单元 x, y ,依据式(10)中格网点缓冲体边界点计算原理,分别计算格网点 (i, j) 的缓冲体上边界点 z'_{xy} 和下边界点 z''_{xy} 。最终,通过遍历空间邻域 $\Omega(i, j)$ 内的所有格网单元,即可解算出给定格网点 (i, j) 相应的缓冲体上边界 $B'(z_{ij}, r)$ 和下边界 $B''(z_{ij}, r)$ 。

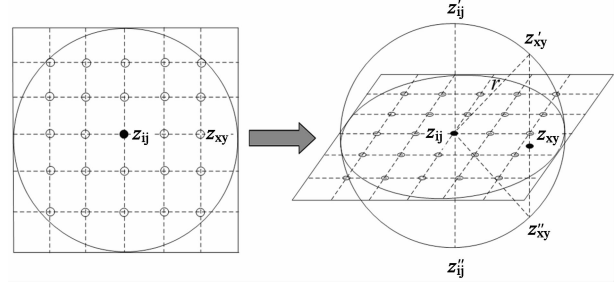


图 3 缓冲体上(下)边界解算示意图

Fig. 3 Sketch map of upper (lower) 3D-buffer boundary solution

4.2 格网点缓冲体边界的逻辑并运算

在算法初始化中格网点缓冲体边界构建的基础上,对于 DDM 上与 (i, j) 相异的另一格网点 (a, b) ($(a-i)(b-j) \neq 0$),若 $\Omega(i, j) \cap \Omega(a, b) \neq \emptyset$,则需对格网点 (i, j) 和 (a, b) 的各自缓冲体上边界 $B'(z_{ij}, r)$ 和 $B'(z_{ab}, r)$ (下边界 $B''(z_{ij}, r)$ 和 $B''(z_{ab}, r)$)进行逻辑并运算。

由前述 DDM 缓冲体上(下)边界的构建原理可知,DDM 上任意格网点 (i, j) 所对应的缓冲体上边界点 z'_{xy} (下边界点 z''_{xy}),分别位于 DDM 的上方(下方),即: $z'_{xy} \geq z_{ij}$ ($z''_{xy} \leq z_{ij}$)。从而对于空间邻域 $\Omega(i, j) \cap \Omega(a, b)$ 内任意格网单元 (x, y) ,其缓冲体上边界点 z'_{xy} (下边界点 z''_{xy})应为其分别在空间邻域 $\Omega(i, j)$ 和 $\Omega(a, b)$ 内所对应上边界点的最大值(下边界点的最小值),即:

$$\begin{cases} z'_{xy} = \max(z'_{xy}, z_{ab} + \sqrt{r^2 - \xi^2[(x-a)^2 + (y-b)^2]}), \\ (x, y) \in \Omega(i, j) \cap \Omega(a, b) \\ z''_{xy} = \min(z''_{xy}, z_{ab} - \sqrt{r^2 - \xi^2[(x-a)^2 + (y-b)^2]}), \\ (x, y) \in \Omega(i, j) \cap \Omega(a, b) \end{cases} \quad (11)$$

DDM 上相异格网点 (i, j) 和 (a, b) 的各自缓冲体上边界 $B'(z_{ij}, r)$ 和 $B'(z_{ab}, r)$ (下边界 $B''(z_{ij}, r)$ 和 $B''(z_{ab}, r)$)的逻辑并运算 $B'(z_{ij}, r) \cup B'(z_{ab}, r)$ ($B''(z_{ij}, r) \cup B''(z_{ab}, r)$)可定义为:

$$\begin{cases} B'(z_{ij}, r) \cup B'(z_{ab}, r) = \{z'_{xy} = \max(z'_{xy}, z_{ab} + \sqrt{r^2 - \xi^2[(x-a)^2 + (y-b)^2]}) \mid (x, y) \in \Omega(i, j) \cup \Omega(a, b)\} \\ B''(z_{ij}, r) \cup B''(z_{ab}, r) = \{z''_{xy} = \min(z''_{xy}, z_{ab} - \sqrt{r^2 - \xi^2[(x-a)^2 + (y-b)^2]}) \mid (x, y) \in \Omega(i, j) \cup \Omega(a, b)\} \end{cases} \quad (12)$$

4.3 DDM 缓冲体上(下)边界的生成

遍历 DDM 上所有格网点 (i, j) ($i \in [0, n-1], j \in [0, n-1]$), 并生成各自缓冲体上边界 $B'(z_{ij}, r)$ 和下边界 $B''(z_{ij}, r)$ 。在此基础上, 利用逻辑并运算中格网点缓冲体边界逻辑并运算法则, 依次进行 $B'(z_{ij}, r)$ 和 $B''(z_{ij}, r)$ ($i \in [0, n-1], j \in [0, n-1]$) 的逻辑并运算, 即可得到 DDM 的缓冲体上边界 $B'(T, r)$ 和下边界 $B''(T, r)$, 即:

$$\begin{cases} B'(T, r) = \bigcup_{i=0}^{n-1} \bigcup_{j=0}^{n-1} B'(z_{ij}, r) \\ B''(T, r) = \bigcup_{i=0}^{n-1} \bigcup_{j=0}^{n-1} B''(z_{ij}, r) \end{cases} \quad (13)$$

评定算法的优劣性主要考察算法的稳定性、准确性和运算速度。在 GIS 应用中, 由于所处理的数据量比较大, 算法的效率尤为重要。式 (13) 中, DDM 缓冲体上边界 $B'(T, r)$ (下边界 $B''(T, r)$) 生成的关键在于相异格网点 (i, j) 和 (a, b) 各自缓冲体上边界 $B'(z_{ij}, r)$ 和 $B'(z_{ab}, r)$ (下边界 $B''(z_{ij}, r)$ 和 $B''(z_{ab}, r)$) 的逻辑并运算。由算法初始化中格网点缓冲体边界构建原理可知, 格网点 (i, j) 的缓冲体上边界 $B'(z_{ij}, r)$ (下边界 $B''(z_{ij}, r)$) 需对空间邻域 $\Omega(i, j)$ 处的格网单元进行 $r \times r$ 次计算。在此基础上, 利用格网点缓冲体边界逻辑并运算法则, 相异

格网点 (a, b) 的缓冲体上边界 $B'(z_{ab}, r)$ (下边界 $B''(z_{ab}, r)$) 的构建及与 (i, j) 的缓冲体上边界 $B'(z_{ij}, r)$ (下边界 $B''(z_{ij}, r)$) 的逻辑并运算 $B'(z_{ij}, r) \cup B'(z_{ab}, r)$ ($B''(z_{ij}, r) \cup B''(z_{ab}, r)$), 同样需进行 $r \times r$ 次计算。依此类推, 遍历 DDM 上所有格网点 (i, j) ($i \in [0, n-1], j \in [0, n-1]$), 通过生成各自缓冲体上边界 $B'(z_{ij}, r)$ (下边界 $B''(z_{ij}, r)$) 并进行逻辑并运算 $\bigcup_{i=0}^{n-1} \bigcup_{j=0}^{n-1} B'(z_{ij}, r)$ ($\bigcup_{i=0}^{n-1} \bigcup_{j=0}^{n-1} B''(z_{ij}, r)$), 共需进行 $n \times n \times r \times r$ 次计算, 即整个算法的时间复杂度为 $O(n^2 r^2)$ 。

5 算法实验结果与分析

为验证算法的正确性和有效性, 本文在 VC++ 环境下实现了滚动球变换的 DDM 多尺度表达算法, 并利用 Surfer 8.0 软件对生成的实验结果进行了可视化分析。实验采用的数据为我国东海某海区的多波束测深数据, 共包含 12 774 个离散水深点, 极限误差为 1m。经由 Surfer 8.0 软件中的自然邻点插值算法, 生成的原始 DDM 大小为 100×87 , 分辨率为 45m。实验环境为 Celeron(R) 处理器, 主频为 2.53GHz, 内存为 512M。

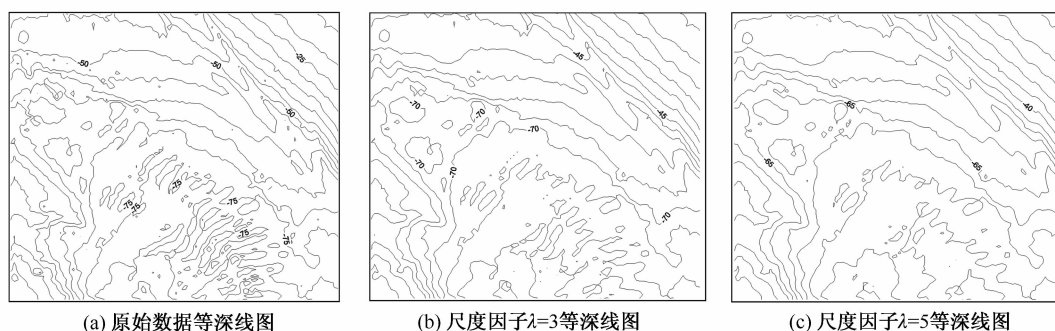


图 4 原始数据与两种不同尺度下数据的等深线比较

Fig. 4 Contrast map of bathymetric contour based on original data and the data at two different scales

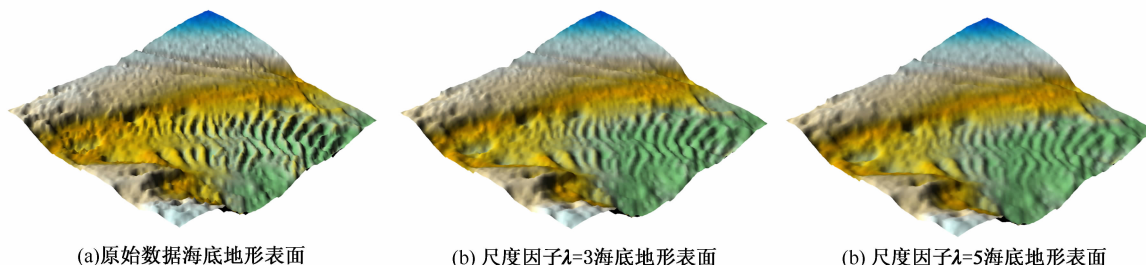


图 5 原始数据与两种不同尺度下数据的海底地形表面图比较

Fig. 5 Contrast map of marine topography surface based on original data and the data at two different scales

实验共分 5 组,分别针对不同的尺度因子应用滚动球变换,对原始 DDM 进行了多尺度表达。如图 4、图 5 分别为原始 DDM 数据与不同尺度因子($\lambda=3$ 和 $\lambda=5$)影响下的等深线(等深距为 5m)及海底地形表面的对比图。从图 5 中不难看出,滚动球变换能较好地实现海底地貌形态的识别和分类,且随着尺度因子的增大,负向地貌呈现逐渐缩小直至填平的趋势,而正向地貌则完全保留。

此外,为进一步验证滚动球变换的 DDM 多尺度表达算法在保障舰船海上航行安全方面的优势,本文借助 Surfer 8.0 软件的坡度分析功能,对 5 组实验结果进行了量化分析,实验结论见表 3。

表 3 多尺度表达实验数据统计

Tab. 3 Statistics of the multi-scale experimental results

统计参数	初始 DDM	尺度因子				
		$\lambda=1$	$\lambda=2$	$\lambda=3$	$\lambda=4$	$\lambda=5$
水深极大值	-13.528	-13.528	-13.528	-13.528	-13.528	-13.528
水深极小值	-94.925	-93.596	-91.232	-89.338	-88.145	-87.333
水深均值	-61.447	-61.411	-61.353	-61.235	-61.019	-60.836
坡度范围	0~10.304	0~9.265	0~8.014	0~7.572	0~7.066	0~6.347
坡度均值	1.914	1.891	1.812	1.704	1.525	1.407
运行时间(s)		0.008	0.049	0.217	0.464	1.173

实验结果表明:(1)采用滚动球变换对 DDM 进行多尺度表达,能基本保持原始数据的特性,山脊与山谷的基本骨架没有发生大的变化,仅局部细小的地形被适当地进行了平滑;(2)水深极大值保持不变,说明 DDM 中正向地貌得到了保留;(3)随着尺度因子的增大,水深极小值和水深均值呈现逐渐变大的趋势,说明浅水深点在 DDM 中所占比重有所上升,同时也表明了滚动球变换具有逐渐缩小或填平负向地貌的特性;(4)坡度的变化表现为在一定范围内的震荡,但坡度的范围呈现出逐渐减小的变化。结合坡度均值的变化可以发现,不同尺度间变化较大的是相邻尺度间的非地形特征点,随着尺度的减小和数据压缩量的增大,DDM 整体则呈现逐步平缓的变化趋势,这与 DDM 多尺度表达的原则是相吻合的。

6 结束语

实现空间数据的多尺度表达旨在建立满足一定条件的抽象模型,多个尺度空间数据集间的变换应该是尺度依赖的。本文从二维滚动圆变换的构建原理出发,通过对二维滚动圆变换的维数扩展,

构建了基于滚动球变换的 DDM 多尺度表达算法。并从理论上分析了阈值(缓冲距)对 DDM 空间几何形态的影响,较好地顾及了 DDM 的地理和尺度特性,从而保证了其空间认知与抽象程度的一致性。但需要指出的是,DDM 较陆地 DEM 有着较大的差异(数据来源、应用模式),因此,其多尺度表达有着不同于陆地 DEM 的诸多要求和特点。本文算法只是从空间几何角度研究了 DDM 的多尺度表达,并未太多的顾及各种不同应用的特殊要求,故对此今后还有待于进一步深入和完善。

参考文献:

- [1] Porathe T. 3-D nautical charts and safe navigation[D]. Eskilstuna: Malardalen University Press Dissertation, 2006.
- [2] 胡金星,马照亭,吴焕萍,等. 基于格网划分的海量数据 Delaunay 三角剖分[J]. 测绘学报, 2004, 33(2): 163-167.
- [3] 艾廷华,成建国. 对空间数据多尺度表达有关问题的思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(5): 377-382.
- [4] 贾俊涛,翟京生,孟婵媛,等. 基于海量多波束数据的海底地形模型的构建与可视化[J]. 测绘科学技术学报, 2008, 25(4): 255-259.
- [5] Christensen A H J. Two experiments on stream network generalization[C]. Proceedings of the 21st International Cartographic Conference. Durban, 2003.
- [6] Christensen A H J. Cartographic line generalization with waterlines and medial-axes[J]. Cartography and Geographic Information Science, 1999, 26(1): 19-32.
- [7] 万刚,朱长青. 多进制小波及其在 DEM 数据有损压缩中的应用[J]. 测绘学报, 1999, 28(1): 36-40.
- [8] 杨族桥,郭庆胜,牛冀平,等. DEM 多尺度表达与地形结构线提取研究[J]. 测绘学报, 2005, 34(2): 134-137.
- [9] 李精忠,艾廷华,王洪. 一种基于谷地填充的 DEM 综合方法[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 272-275.
- [10] 费立凡,何津,马晨燕,等. 3 维 Douglas-Peucker 算法及其在 DEM 自动综合中的应用研究[J]. 测绘学报, 2006, 35(8): 278-284.
- [11] 胡鹏,高俊. 数字高程模型的数字综合原理研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(8): 940-942.
- [12] 李志林. 地理空间数据处理的尺度理论[J]. 地理信息世界, 2005, 3(2): 1-5.
- [13] Shepard M S. The avigation surface: A multipurpose bathymetric database[D]. Durham, New Hampshire: University of New Hampshire, 2003.
- [14] 高王军. 双向缓冲区模型在海图自动制图综合中的应用研究[D]. 大连: 大连海军舰艇学院, 2009.

- [15] 胡鹏,游连,杨传勇,等. 地图代数[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002.
- [16] 胡鹏,耿协鹏,曹枫. 图形的形态变换和地图代数凸壳算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2005,30(11):1003-1007.
- [17] 郭仁忠. 空间分析[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,2000.
- [18] 彭认灿,王家耀. 基于地球椭球体的缓冲区构建技术研究[J]. 测绘学报,2002,31(3):270-273.
- [19] 周培德. 计算几何:算法分析与设计[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [20] 朱长青,史文中. 空间分析建模与原理[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [21] 刘雁春,肖付民,暴景阳,等. 海道测量学概论[M]. 北京:测绘出版社,2006.

Multi-scale Representation of Digital Depth Model Based on Rolling Ball Transform

DONG Jian^{1,2}, PENG Rencan^{1,2}, ZHANG Lihua^{1,2}, LI Ning^{1,2} and JIA Shuaidong^{1,2}

(1. *Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;*

2. *Key Laboratory of Hydrographic Surveying and Mapping of PLA, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China*)

Abstract: The multi-scale representation of spatial data is one of the most important and difficult problems in the field of GIS. Digital Depth Model (DDM) is the digitized model reflecting the depth change of ocean. As an important representation mode of sea floor relief, DDM is not only the main source information guarantying safety navigation, but also the information platform for marine geoscience research, maritime engineering, subaqueous archaeology and so on. With the development of marine geographic environment, the application fields of DDM are expanding increasingly, which results the requirements for multi-scale representation of DDM. In fact, in the same sea area, DDM of different scale is the different digitized representation of the identical sea floor landform. Therefore, it is an effective approach to multi-scale application by studying a multi-scale representation method based on original DDM. As an important visualization representation mode of digital depth model, bathymetric contour shares the same constraint multi-scale representation principle of DDM. Existing multi-scale representation algorithms of DDM are mostly by dimensional extending of generalization algorithms for two dimensional bathymetric contour graphics. For those multi-scale representation algorithms barely focus on the geometry characteristics of DDM, and simplify DDM just by deleting some grid points and reserving the feature points. While DDM generalization is not a simple process of accepting or rejecting the grid points of DDM, some factors including geographic and scale character of DDM should be considered to maintain the consistency of spatial cognition and abstract grade. Mainly focuses on the geographic and scale character of DDM, based on the analysis of the essential principle of the two dimensional rolling circle transform algorithm, and by means of rolling circle transform dimensional extension, the paper has brought forward a multi-scale representation of DDM based on rolling ball transform algorithm. Namely, by using different size of three-dimensional ball instead of planar circle rolling on the upper surface of DDM, which will preserve the positive relief of DDM and reduce the negative relief of DDM contrarily, and realizes the multi-scale representation of DDM from the viewpoint of guarantying safety navigation. Besides, the paper also expatiates the key-stone and solution steps of the algorithm. At last, under the condition of VC++, some experiments have been done to validate the algorithm's validity. The experiments show that the algorithm could preserve the basic characters of the DDM, meanwhile, with high computing efficiency.

Key words: Digital Depth Model (DDM); multi-scale representation; rolling circle transform; rolling ball transform; marine sounding