

滚动球加速优化模型的 TIN_DDM 缓冲面快速构建算法^{*}

董 箭^{1,2}, 张志衡^{1,2}, 彭认灿^{1,2}, 李改肖^{1,2}, 王 沫^{1,2}

(1. 海军大连舰艇学院军事海洋与测绘系, 辽宁 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, 辽宁 大连 116018)

摘 要:针对 TIN_DDM 缓冲面构建与应用中存在的数据类型特殊、算法效率与模型精度不匹配的问题, 本文将滚动球模型应用扩展至 TIN_DDM 缓冲面的构建过程。在分析滚动球模型构建精度局限的基础上, 建立了滚动球半径关联的滚动球模型整体精度控制方法; 结合大数据量 TIN_DDM 缓冲面多次构建的应用效率需求, 阐明了关键采样点与滚动球半径对 TIN_DDM 缓冲面构建效率的影响规律; 设计了 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点的判定准则, 建立了关键采样点与滚动球半径的数值关联关系; 提出了一种基于滚动球加速优化模型的 TIN_DDM 缓冲面快速构建算法, 算法时间复杂度为 $O(n)$ 。实验结果表明, 该算法可实现任意缓冲半径条件下 TIN_DDM 缓冲面的多次快速构建, 且算法精度控制在 2σ 内。

关键词: TIN_DDM; 滚动球模型; 缓冲面构建; 算法精度; 算法效率

1 引 言

数字水深模型(digital depth model, DDM)是反映水深变化的数字化模型, 也是用深度表达海底地形特征的一种常用数字模型, 根据水深点数据组织方式的不同, 分为规则格网 DDM(GRID_DDM)和不规则三角网 DDM(TIN_DDM)。缓冲区分析是二维 GIS 空间分析的基本功能, 是确定二维地理实体的空间邻近度或影响范围的重要手段。三维条件下的缓冲区分析称为缓冲体分析, 由于 DDM 所固有的单值曲面特性, 其缓冲体分析又被称为缓冲面分析。近年来, 随着人类对海底世界的全方位加速探索, 应用面向海底三维空间分析的 DDM 缓冲面构建技术对于海底污染源扩散解决、水下潜航器航行安全保障、海底矿藏分布探明和海底地形多尺度表达等问题具有重要的理论和现实意义。

目前有关三维缓冲体构建算法的研究主要包括矢量算法和栅格算法两类。矢量算法所构建的缓冲体精度较高, 但其涉及大量的三维空间几何求交运算, 复杂度较高, 运行效率较低。卢新明等人 2012 年通过对布尔运算拓扑关系完整性、逻辑判断一致性及运算容差统一性的条件约束, 提出了一种基于高效布尔运算的三维矢量缓冲区生成算法。然而布尔运算的构建机理决定了该算法受目标实体复杂度及采样点拓扑关系的影响较大, 算法时间复杂度相对较高。李楠等人 2015 年利用带符号的欧氏距离变换技术及缓冲半径对目标模型离散化后的体素进行缓冲控制点的条件筛选, 结合隐式曲面重构模型构建三维缓冲区的参考曲面, 提出了一种基于空间填充思想的三维缓冲区分析算法, 由于体素拓扑关系维护及隐式曲面重构过程相对复杂, 算法效率较低。栅格算法主要采用三维欧氏距离变换方法实现了对各类地理要素的三维缓冲体构建, 与矢量算法相比, 栅格算法简单且较易实现, 运行效率较高。但此类算法只针对栅格数据, 适用范围较窄且所构建的缓冲体精度较低。Saito 等人 1994 年利用三维欧氏距离的递推延续性质, 将栅格曲面的三维欧氏距离变换分解为 n 个 $n \times n$ 的像素点(栅格单元), 其二维二值图像的二维欧氏距离变换过程来构建缓冲体, 算法复杂度为 $O(n^6)$ 。诸葛婴等人 2001 年通过优化方法减少需要参与距离计算和比

^{*} 国家自然科学基金项目(41601498; 41471380); 国家重点研发计划项目(2017YFC1405505)。

较的二维图像个数与二维图像中特征点的个数,使算法的时间复杂度降至 $O(n^3 \lg n)$ 。李芳玉等人 2005 年设计了一种体元信息由生长元向周围邻域传递的等值面扩张路径,提出了一种基于桶数据结构的栅格三维缓冲体生成算法,时间复杂度为 $O(V)$ (V 为体元个数)。董箭等人 2013 年针对单值曲面这类特殊的地理要素,提出了一种基于滚动球模型的单值曲面缓冲体边界生成算法,通过单值曲面逻辑并运算法则的构造,避免了栅格采样点距离场的重复计算,算法时间复杂度降至 $O(n^2)$ 。

与 GRID_DDM 相比,TIN_DDM 采用原始采样点作为模型数据,可以更好地反映海底地形地貌(如山脊、山谷、地形断裂线等),对起伏程度较大区域的地形描述更加精细,也更加有利于提高缓冲面分析结论的准确性。然而,当前三维缓冲体构建的算法研究大部分为栅格算法,主要针对 GRID_DDM 而无法直接应用于 TIN_DDM。研究较少的矢量算法虽可以应用于 TIN_DDM,但构建过程中需要处理大量复杂的三维空间几何求交运算,算法运算效率较低,且最终构建的矢量缓冲面难以存储和表达。

为解决现有三维缓冲体构建算法在处理 TIN_DDM 这类特殊地理空间要素时存在的模型精度与算法效率这一矛盾问题,本文将 GRID_DDM 缓冲面构建的滚动球模型应用扩展至 TIN_DDM 缓冲面的构建过程。在分析滚动球变换原理实质的基础上,以滚动球半径为关键阈值,建立滚动球整体精度的定量评估与控制模型;结合单值曲面逻辑并运算法则的机理剖析,阐明关键采样点与滚动球半径对 TIN_DDM 缓冲面构建效率的影响规律;建立关键采样点的判定准则及与滚动球半径的数值关联关系,构建面向 TIN_DDM 缓冲面构建的滚动球加速优化模型,实现大数据量 TIN_DDM 缓冲面的多次快速构建;最后采用实验验证的方式证明了所提算法的准确性与高效性。

2 滚动球模型在 TIN_DDM 缓冲面构建中的应用扩展及局限性分析

2.1 基于 TIN_DDM 的滚动球模型构建

滚动圆变换是当前自动生成二维线或面要素缓冲区边界的通用算法,其实质是对组成二维线或面要素的无限个采样点的缓冲区求并,从而获得二维线或面要素的缓冲区边界。在栅格算法的基础上,针对 GRID_DDM 这类单值曲面,对滚动圆进行三维扩展,提出滚动球模型构建原理,采用与滚动圆变换类似的方法自动获得三维空间单值曲面要素的缓冲面,所提模型主要依据三维缓冲体边界的数学定义和单值曲面的特性进行三维缓冲面构建。

三维缓冲体边界的数学定义为

$$B(T, r) = \{P(x, y, z) \mid \{d_{\min}(P, Q_T) \mid Q_T(x_T, y_T, z_T) \in T\} = r\} \quad (1)$$

式中, $B(T, r)$ 表示地理要素 T 的缓冲半径为 r 的缓冲体边界, $P(x, y, z)$ 表示缓冲体边界 $B(T, r)$ 上的任意一点, $Q_T(x_T, y_T, z_T)$ 表示地理要素 T 上任意采样点, $d_{\min}(P, Q_T)$ 表示缓冲体边界 $B(T, r)$ 上的 P 点至地理要素 T 上各个 Q_T 点间的三维欧氏距离最小值。

基于上述三维缓冲体边界概念,三维缓冲体边界等价于地理要素 T 上无限个采样点的等距离球面的并集。但对于由有限个离散水深采样点构成的 DDM,在保证缓冲面构建精度的前提下,三维缓冲面可等价于 DDM 上有限个水深采样点的等距离球面的并集。然而,等距离球面并集的计算涉及大量三维空间几何求交运算,效率相对低下,且所生成的上下缓冲面存储与表达均较为困难。为提高算法运行效率,结合单值曲面的特性,提出一种基于栅格算法的单值曲面逻辑并运算法则,该运算法则为:单值曲面采样点间上(下)缓冲面的并集运算可简化为各自上(下)缓冲面在 z 轴方向上的极大(小)取值过程,即可通过 DDM 采样点及周围各个离散水深点的等距离球面在采样点 z 轴方向交点的极大(小)值来确定该采样点对应的上(下)缓冲面点。

对于 GRID_DDM 这类单值曲面的缓冲面构建,可通过计算各个离散水深点的等距离球面在任意网格节点 z 轴方向上形成的极大(小)值,来对上(下)缓冲面上的格网节点坐标进行确定,然后利用格网连接方式对 GRID_DDM 的上(下)缓冲面进行存储与表达。由此可知,基于滚动球模型的单值曲面缓冲体边界生成算法的本质为:利用各个离散水深点等距离球面的并集来构建 GRID_DDM 的矢量缓冲面,然后对

该矢量缓冲面进行栅格化,以达到提高运算效率和便于存储与表达的目的。

算法运用基于栅格算法的单值曲面逻辑并运算法则,将复杂的三维空间几何求交运算简化为单一坐标轴方向数值间的比较运算,具有较高的算法运算效率,且算法本身对 DDM 数据类型的依赖性较小。由此,本文提出将滚动球模型应用进一步扩展至 TIN_DDM 缓冲面构建过程的设想,具体实施步骤为:①采用矢量算法精确计算各个采样点的等距离球面;②利用基于栅格算法的单值曲面逻辑并运算法则依次计算各个采样点在 z 轴方向上的上(下)缓冲面点坐标;③以三角网形式对 TIN_DDM 上(下)缓冲面进行存储和表达。尽管上述算法设想在理论层面上可较好地解决 TIN_DDM 缓冲面构建算法运算效率低下及生成缓冲面的存储与表达方面的问题,但实际应用中滚动球模型在构建过程中仍存在一定的精度与效率方面的矛盾。因此,需进一步分析论证滚动球模型在 TIN_DDM 缓冲面构建过程中的精度与效率局限性,设计并提出相应的模型优化方案,以满足当前 TIN_DDM 缓冲面构建的实际应用需求。

2.2 滚动球模型在 TIN_DDM 缓冲面构建中的精度局限性分析

滚动球模型在 TIN_DDM 缓冲面构建过程中的精度损失主要体现在以下两个方面:①采用 TIN_DDM 上有限个水深采样点的等距离球面进行求交运算来构建矢量缓冲面,导致所构建的矢量缓冲面与 TIN_DDM 的三角网面之间并不严格满足三维缓冲体边界的数学定义,存在模型构建原理上的精度缺陷;②为提高模型运算效率,采用基于栅格算法的单值曲面逻辑并运算法则对各个等距离球面进行求交运算,其本质为对所构建的 TIN_DDM 矢量缓冲面进行三角网格化处理,以便生成缓冲面的存储与表达,尽管在一定程度上简化了模型的计算过程,但同时也造成了模型构建过程中的精度损失。

滚动球模型构建 TIN_DDM 缓冲面的原理上存在精度缺陷的关键因素在于:TIN_DDM 离散采样导致矢量缓冲面上各点至原始曲面的距离与缓冲半径之间存在一定的数值误差。如图 1 所示, Q_i 、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 和 Q_4 点分别为 TIN_DDM 中的采样点; Q'_i 为采样点 Q_1 的等距离球面在采样点 Q_i 的 z 轴方向上形成的极大值点(即 Q'_i 点为采样点 Q_i 在 z 轴方向上所对应的 TIN_DDM 矢量上缓冲面点), $Q'_i Q_1$ 之间的距离为滚动球半径 r ; P 点为 Q'_i 点在 $\triangle Q_1 Q_2 Q_3$ 上的投影点, $Q'_i P$ 之间的距离为 r' 。

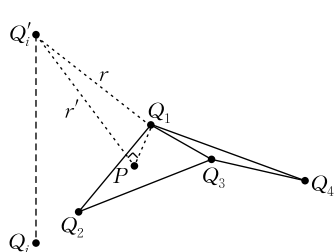


图 1 TIN_DDM 矢量缓冲面构建过程中的模型精度分析示意

图 1 中,假设 $Q'_i Q_1$ 不垂直于任意一个以 Q_1 点为顶点的三角形面,且 Q'_i 点与 $\triangle Q_1 Q_2 Q_3$ 之间的点面距离最小,则在直角 $\triangle Q_1 Q'_i P$ 中,直角边 $Q'_i P$ 长度始终小于斜边 $Q'_i Q_1$ 长度,即 $r' < r$ 。由此可知:利用滚动球模型所构建的矢量缓冲面与 TIN_DDM 的三角形面之间并不严格满足三维缓冲体边界的数学定义, TIN_DDM 矢量缓冲面上各点 Q'_i 的误差 ω_1 为

$$\omega_1 = r - r' = r - \sqrt{r^2 - d_{PQ_1}^2} \quad (2)$$

式中, d_{PQ_1} 表示直角 $\triangle Q_1 Q'_i P$ 中直角边 PQ_1 的长度。由于 P 点存在于 Q_1 点的自然邻域内,因此, PQ_1 的最大距离可能为 Q_1 点与其自然邻点间的最大距离。而在采样点数量足够大的前提下, TIN_DDM 中各自然邻点间的最大距离可近似等于平面 Delaunay 三角网中各自然邻点间的最大平面距离 $d_{\max}$ 。由此可知, TIN_DDM 矢量缓冲面上各点 Q'_i 的误差最大值 $\omega_{\max 1}$ 为

$$\omega_{\max 1} = r - r' = r - \sqrt{r^2 - d_{\max}^2} \quad (3)$$

滚动球模型在 TIN_DDM 缓冲面构建过程中精度损失的关键因素在于 TIN_DDM 矢量缓冲面三角网格化导致的矢量缓冲面上各点至原始曲面的距离与缓冲半径之间存在一定的数值误差。如图 2 所示,采样点 Q_i 等距离球面形成的 TIN_DDM 局部矢量缓冲面以灰色区域表示; Q'_1 、 Q'_2 和 Q'_3 点分别为 TIN_DDM 矢量缓冲面上的三点,共同构成 TIN_DDM 缓冲面上的一个三角形面; P'' 点为 Q_i 点在 $\triangle Q'_1 Q'_2 Q'_3$ 上的投影点, $Q_i P''$ 之间的距离为 r'' ; P' 点为 $Q_i P''$ 延长线与采样点 Q_i 等距离球面的交点。图 2(a)表示 Q'_1 、 Q'_2 和 Q'_3 点均在采样点 Q_i 的等距离球面上, Q'_1 与 Q_i 点间的距离为滚动球半径 r ; 图 2(b)表示 Q'_1 点在采样点 Q_i 的等距离球面上,而 Q'_2 和 Q'_3 点在邻近采样点的等距离球面上, Q'_1 与 Q_i 点间的距离为滚动球半径 r 。

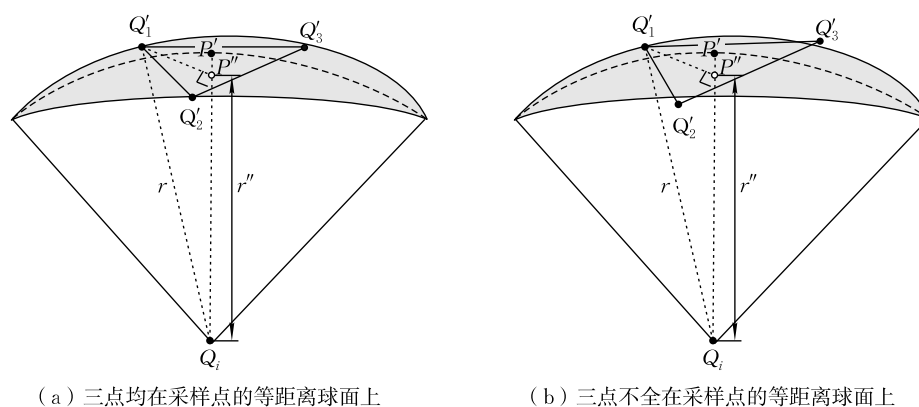


图2 TIN-DDM 矢量缓冲面三角网格化过程中的模型精度分析示意

图2中,假设 Q_i 点与 $\triangle Q'_1 Q'_2 Q'_3$ 之间的点面距离最小,则在直角 $\triangle Q'_1 Q_i P''$ 中,直角边 $Q_i P''$ 长度始终小于斜边 $Q'_1 Q_i$ 长度,即 $r'' < r$ 。 $P' P''$ 之间的距离为对 TIN-DDM 矢量缓冲面进行三角网格化而造成的模型精度损失 ω_2 。因此,三角网格化的 TIN-DDM 缓冲面与 TIN-DDM 矢量缓冲面之间的误差 ω_2 为

$$\omega_2 = r - r'' = r - \sqrt{r^2 - d_{Q'_1 P''}^2} \quad (4)$$

式中, $d_{Q'_1 P''}$ 表示直角 $\triangle Q'_1 Q_i P''$ 中直角边 $Q'_1 P''$ 的长度。由于 P'' 点存在于以 Q'_1 点为顶点的三角形面内,因此, $Q'_1 P''$ 的最大距离可能为 Q'_1 点与其自然邻点间的最大距离。同样,在采样点数量足够大的前提下,TIN-DDM 缓冲面上各自然邻点间的最大距离可近似等于平面 Delaunay 三角网中各自然邻点间的最大平面距离 $d_{\max}$ 。由此可知,三角网格化的 TIN-DDM 缓冲面与 TIN-DDM 矢量缓冲面之间的最大误差值 $\omega_{\max 2}$ 为

$$\omega_{\max 2} = r - r'' = r - \sqrt{r^2 - d_{\max}^2} \quad (5)$$

基于上述分析,采用滚动球模型所构建的 TIN-DDM 缓冲面上各点与真实 TIN-DDM 缓冲面之间的误差最大值 $\omega_{\max}$ 为

$$\omega_{\max} = \omega_{\max 1} + \omega_{\max 2} = 2r - 2\sqrt{r^2 - d_{\max}^2} \quad (6)$$

在实际应用中,根据《海道测量规范》中水深测量的极限误差(置信度95%)可知, $\omega_{\max} \leq 2\sigma$ (σ 表示水深测量的中误差),将其代入式(6)并反解可得 $r \geq \frac{1}{2}\sigma + \frac{d_{\max}^2}{2\sigma}$ 。由此可知,本文所提基于 TIN-DDM 的滚动球模型构建算法在模型构建原理方面具有一定的精度局限性。实际应用中,为保证所构建的 TIN-DDM 缓冲面的误差 ω 控制在 2σ 以内,需确保滚动球半径 $r \geq \frac{1}{2}\sigma + \frac{d_{\max}^2}{2\sigma}$,且随着缓冲半径的增大,误差 ω 逐渐缩小。此外,TIN-DDM 缓冲面的构建精度还取决于影响 $d_{\max}$ 大小的采样点数量及其分布位置。

2.3 滚动球模型在 TIN-DDM 缓冲面构建中的效率局限性分析

评定算法优劣性的指标主要为算法精度和运算效率。在 GIS 实际应用中,当算法精度满足应用需求时,对于 TIN-DDM 这类数据量较大的模型,算法执行效率将显得尤为重要。由2.1节中基于 TIN-DDM 的滚动球模型构建过程可知,TIN-DDM 缓冲面构建的关键在于其上各点 z 坐标值的计算,而缓冲面上各点 z 坐标值的确定主要通过借鉴基于栅格算法的单值曲面逻辑并运算法则进行计算。假设 TIN-DDM 中水深采样点的个数为 n ,对于其中每个水深采样点所对应的缓冲面点的 z 坐标值,均需要遍历所有水深采样点,判断各个采样点的等距离球面是否在所选水深采样点的 z 轴方向上形成极值,以此确定各个缓冲面点的 z 坐标值。由此可知,对于每个水深采样点,需要进行 n 次计算,而采用所提算法构建 TIN-DDM 缓冲面则需要 $n \times n$ 次运算,即算法时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

随着多波束等先进水深测量设备的广泛运用,TIN-DDM 中包含的水深采样点数量日益剧增,单次多波束水深测量获得的采样点数据量可达百万甚至千万级别。水深采样点数据量的日益剧增尽管有利于海

底地形的精细化表达,但同时也决定了构建 TIN-DDM 缓冲面巨大的时间成本。此外,考虑不同行业不同层次的应用需求,实践中往往需要利用不同缓冲半径多次构建 TIN-DDM 缓冲面,这对 TIN-DDM 缓冲面构建算法的效率提出了更为严格的要求。因此,需进一步探索影响 TIN-DDM 缓冲面构建效率的关键因素及其内在关联,简化算法流程,避免冗余运算,以实现面向 TIN-DDM 缓冲面构建的滚动球模型的加速优化。

3 面向 TIN-DDM 缓冲面构建的滚动球加速优化模型

3.1 TIN-DDM 缓冲面构建关键采样点判定准则及步骤

由 2.3 节中分析可知,基于 TIN-DDM 滚动球模型构建算法的关键在于栅格条件下单值曲面逻辑并运算法则的运用,即实现 TIN-DDM 采样点上(下)缓冲面的并集运算的简化处理。对比三维缓冲体边界的数学定义,上(下)缓冲面点在 z 轴方向上形成极大(小)值的等距离球面所对应的球心采样点即为该上(下)缓冲面点所对应的 TIN-DDM 上的最近点。因此,基于栅格算法的单值曲面逻辑并运算法则本质为确定上(下)缓冲面点所对应的 TIN-DDM 上最近采样点,本文定义为 TIN-DDM 缓冲面构建的关键采样点。基于上述分析,实现 TIN-DDM 缓冲面快速构建的效率核心在于滚动球模型中 TIN-DDM 关键采样点的准确快速判定。如图 3 所示,曲面 T 为单值曲面地理要素;曲面 B_1 为曲面 T 的上缓冲面; Q_i 、 Q_1 和 Q_2 点分别为单值曲面地理要素 T 上的三点; L_1L_2 为 Q_i 点的 z 轴方向; P' 点为以 Q_1 采样点为球心的等距离球面在 L_1L_2 方向上形成的极大值点; P' 点至 Q_1 点的距离为滚动球半径 r ; P' 点至 Q_2 点的距离为 d 。

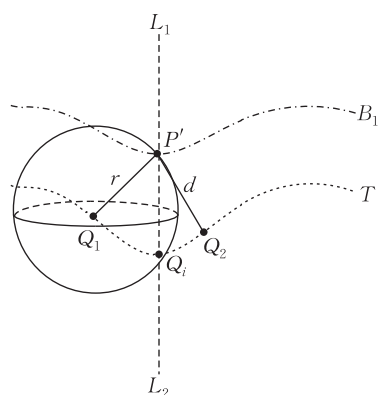


图 3 TIN-DDM 缓冲面构建关键采样点确定示意

图 3 中,由于 P' 点为 Q_1 采样点的等距离球面在 L_1L_2 方向上所形成的极大值点,则单值曲面地理要素 T 上其余采样点的等距离球面在 L_1L_2 方向的交点均位于 P' 点之下。对于曲面 T 上与 Q_1 点相异的任意一点 Q_2 而言, P' 点至 Q_2 点的距离 d 始终大于滚动球半径 r ,即 Q_1 点为 P' 点在曲面 T 上的最近点(且距离等于滚动球半径 r)。因此,在上(下)缓冲面点 z 轴方向上形成极大(小)值的等距离球面所对应的球心采样点即为该上(下)缓冲面点所对应的 TIN-DDM 上的最近点(即 TIN-DDM 缓冲面构建的关键采样点)。基于上述分析,本文提出如下 TIN-DDM 缓冲面构建关键采样点判定步骤:①以 r 为滚动球半径,依次构建 TIN-DDM 中各水深采样点 Q_i 的等距离球面;②判断各个等距离球面是否在水深采样点 Q_i 的 z 轴方向上形成极大(小)值;③将形成极大(小)值的等距离球面所对应的球心采样点标记为采样点 Q_i 的上(下)缓冲面点所对应的 TIN-DDM 上(下)缓冲面构建关键采样点。

3.2 TIN-DDM 缓冲面构建关键采样点与滚动球半径的数值关联性分析

由 3.1 节中分析可知,滚动球半径 r 与 TIN-DDM 缓冲面构建关键采样点的判定具有一定的关联关系。一般情况下,当滚动球半径 r 发生变化时,需重复前述步骤依次判定 TIN-DDM 缓冲面构建的关键采样点,并构建新的 TIN-DDM 缓冲面。这对于大数据量条件下的 TIN-DDM 应用不同缓冲半径进行多次重复缓冲面构建的实际应用而言,显然难以满足其效率需求。考虑滚动球半径的取值具有连续有界的变化规律,且在滚动球半径变化不大的条件下,TIN-DDM 缓冲面构建关键采样点的判定结论具有一定相似性。因此,需进一步分析滚动球半径连续变化条件下 TIN-DDM 缓冲面构建关键采样点判定结论的变化趋势,建立滚动球半径与 TIN-DDM 缓冲面构建关键采样点的数值关联关系,构建面向 TIN-DDM 缓冲面构建的滚动球加速优化模型,实现滚动球半径变化弱相关的 TIN-DDM 缓冲面高效构建算法。

为此,本文以 TIN-DDM 上缓冲面构建关键采样点与滚动球半径的数值关联性分析为例进行说明(TIN-DDM 下缓冲面构建同理)。如图 4 所示, P_i 点为 TIN-DDM 中任意采样点; L_1L_2 为采样点 P_i 的

z 轴方向; P'_i 点为采样点 P_i 的等距离球面在 L_1L_2 方向上形成的交点; P_j 点为在 L_1L_2 方向上的 TIN_DDM 上缓冲面点所对应的构建关键采样点; P'_j 点为构建关键采样点 P_j 的等距离球面在 L_1L_2 方向上所形成的交点。

图 4 中, 当滚动球半径 r 从 0 开始变化时, 采样点 P_i 的 z 轴方向上形成极值点的等距离球面所对应的构建关键采样点同样为采样点 P_i , 即此时构建关键采样点 P_j 与采样点 P_i 为同一点。如图 5 所示, 随着滚动球半径 r 的逐渐增大, 采样点 P_i 的邻域内必然存在一定数量的采样点等距离球面与 P_i 点的 z 轴方向 (L_1L_2 方向) 相交。

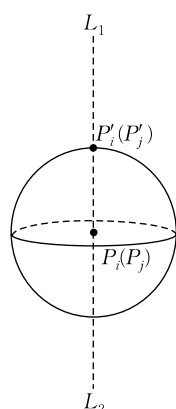


图 4 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点与滚动球半径的数值关联性分析示意(一)

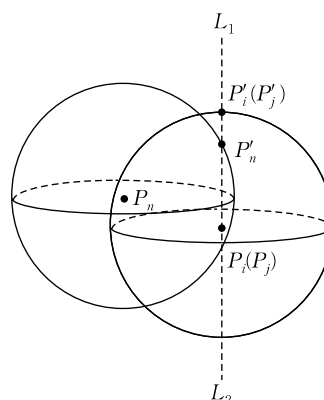


图 5 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点与滚动球半径的数值关联性分析示意(二)

图 5 中, P_n 为采样点, P'_n 点为 P_n 的等距离球面在 L_1L_2 方向上的交点。 L_1L_2 方向上 P'_n 点与 P'_j 点间的距离差 Δ_n 的计算公式为

$$\Delta_n = Z_{P_n} + \sqrt{r^2 - a_{P_{ni}}^2} - Z_{P_j} - \sqrt{r^2 - a_{P_{ji}}^2} \quad (7)$$

式中, Z_{P_n} 为采样点 P_n 的 z 坐标值, $a_{P_{ni}}$ 为采样点 P_n 至采样点 P_i 的水平距离, Z_{P_j} 为构建关键采样点 P_j 的 z 坐标值, $a_{P_{ji}}$ 为构建关键采样点 P_j 至采样点 P_i 的水平距离。记滚动球半径的最大取值为 $r_{\max}$ ($r_{\max} \rightarrow +\infty$), 假设滚动球半径在 $r_{\max}$ 条件下的交点 P'_n 位于 P'_j 之上, 即 $\Delta_n > 0$ 。由式(7)可知, 若 $Z_{P_n} < Z_{P_j}$ 且 $\Delta_n > 0$, 则 $a_{P_{ji}} > a_{P_{ni}}$, 即式(7)为以 r 为变量的递减函数。然而, 由于滚动球半径 r 在小于 $r_{\max}$ 的局部范围内, 构建关键采样点 P_j 必然会在 L_1L_2 方向上形成极大值点, 则在此局部范围内 $\Delta_n < 0$ 。结合式(7)为以 r 为变量的递减函数, 则随着滚动球半径 r 的增大, Δ_n 逐渐减小, 即在滚动球半径 $r_{\max}$ 条件下, Δ_n 同样小于 0。因此, 在滚动球半径 $r_{\max}$ 条件下交点 P'_n 将一直位于 P'_j 之下, 与前述假设矛盾。由此, $Z_{P_n} > Z_{P_j}$ 且 $a_{P_{ji}} < a_{P_{ni}}$, 即式(7)为以 r 为变量的递增函数。

在滚动球半径 $r_{\max}$ 条件下, 为确定在 L_1L_2 方向上可能位于交点 P'_j 之上的 P'_n 点及其所对应的采样点 P_n , 可将最大缓冲半径 $r_{\max}$ 、采样点 P_n 、采样点 P_i 和构建关键采样点 P_j 的参数代入式(7)中, 若 $\Delta_n > 0$ (构建下缓冲面时 $\Delta_n < 0$), 可将采样点 P_n 置于点集 Ω 中。随着滚动球半径 r 的持续增大, 点集 Ω 中必然存在一点的等距离球面在 L_1L_2 方向上的交点首次超越交点 P'_j , 图 6 即为超越时临界状态的示意图。

图 6 中, 对于点集 Ω 中各点在 L_1L_2 方向上所形成的交点首次超越交点 P'_j 时的临界状态下的滚动球半径, 可令式(7)中的距离差 $\Delta_n = 0$, 解得各交点超越时的临界滚动球半径为

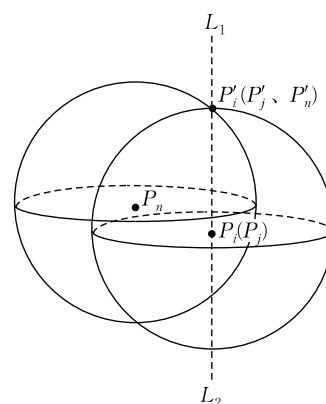


图 6 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点与滚动球半径的数值关联性分析示意(三)

$$r = \frac{\sqrt{(a_{P_{ni}}^2 - a_{P_{ji}}^2)^2 + 2a_{P_{ji}}^2(Z_{P_n} - Z_{P_j})^2 + 2a_{P_{ni}}^2(Z_{P_n} - Z_{P_j})^2 + (Z_{P_n} - Z_{P_j})^4}}{2(Z_{P_n} - Z_{P_j})} \quad (8)$$

按照式(8)依次求解点集 Ω 中各点所形成的交点超越时的临界滚动球半径,结合式(7)为以 r 为变量的递增函数的结论,则所求临界滚动球半径中的最小值即为点集 Ω 中各点在 L_1L_2 方向上所形成的交点首次超越交点 P'_j 时的临界滚动球半径。滚动球半径在 0 到该临界滚动球半径范围内,在 L_1L_2 方向上形成极值点的等距离球面所对应的 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点 P_j 为采样点 P_i 。

如图 7 所示,将首次超越交点 P'_j 的交点 P'_n 所对应的采样点 P_n 作为下一个 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点 P_{j+1} ,依据上述操作确定 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点 P_{j+1} 的滚动球半径范围,以及下一个 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点,直至滚动球半径达到所设定的最大滚动球半径 $r_{\max}$ 。

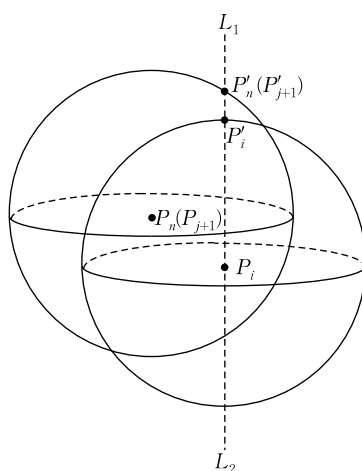


图 7 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点与滚动球半径的数值关联性分析示意(四)

对 TIN_DDM 中所有采样点对应的 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点与滚动球半径的数值关联性进行分析,将其记录在如图 8 所示的 TIN_DDM 上缓冲面构建关键采样点与滚动球半径的数值关联性数据链中。其中, P_1 至 P_l 为 TIN_DDM 中的各水深采样点; j_1 至 j_l 为各水深采样点对应的 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点个数; $[0 \ r_{11} \ r_{12} \ \cdots \ r_{1j_1}]$ 表示各 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点的滚动球半径范围临界值; $[P_{11} \ P_{12} \ \cdots \ P_{1j_1}]$ 表示各半径范围所对应的 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点。

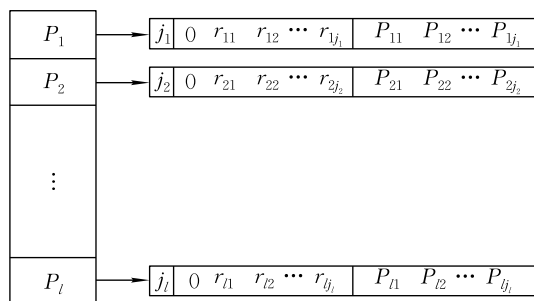


图 8 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点与滚动球半径的数值关联性数据链示意

采用上述面向 TIN_DDM 缓冲面构建的滚动球加速优化模型。通过对 TIN_DDM 进行前期预处理,建立 TIN_DDM 缓冲面构建关键采样点与滚动球半径之间的数值关联性数据链,对面向 TIN_DDM 缓冲面构建的滚动球模型进行加速优化。在后期应用中,只需进行简单查询即可实现任意缓冲半径条件下 TIN_DDM 缓冲面的快速构建,算法时间复杂度降至 $O(n)$,可满足不同行业、不同层次对于利用不同缓冲半径多次构建 TIN_DDM 缓冲面的应用效率需求。

4 实验结果与分析

为验证算法的可行性,本文通过 Matlab 编程实现了基于滚动球模型的 TIN_DDM 缓冲面构建算法(以下简称算法 I)和基于滚动球加速优化模型的 TIN_DDM 缓冲面快速构建算法(以下简称算法 II),并利用 Matlab 的三维显示功能对两类算法的实验结果进行了可视化显示与分析。

实验所采用的数据为我国东海某海区的不规则三角网数字水深模型的水深数据,共包含 12 477 个水深点。实验环境为 Inter(R)core(TM)i3 处理器,主频为 3.4 GHz,内存为 2 G。采用两种算法分别对原始 TIN_DDM 海底地形表面构建缓冲半径为 500 m、1 000 m、1 500 m、2 000 m、2 500 m 和 3 000 m 的缓冲面,利用 Matlab 程序对缓冲半径为 1 000 m、2 000 m 和 3 000 m 的上下缓冲面的空间三角网进行可视化显示,并利用 Surfer8.0 软件绘制各数据等深距为 5 m 的等深线图,实验结果如图 9 至图 15 所示。下列图中方框所圈区域为 TIN_DDM 海底地形表面及其上下缓冲面所对应的凹地形区域,椭圆所圈区域为 TIN_DDM 海底地形表面及其上下缓冲面所对应的凸地形区域。

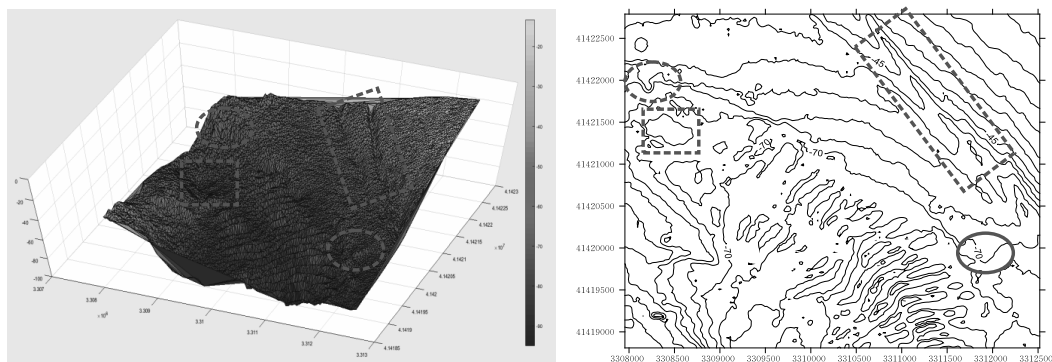


图 9 原始 TIN_DDM 海底地形表面空间三角网及其 5 m 等深线

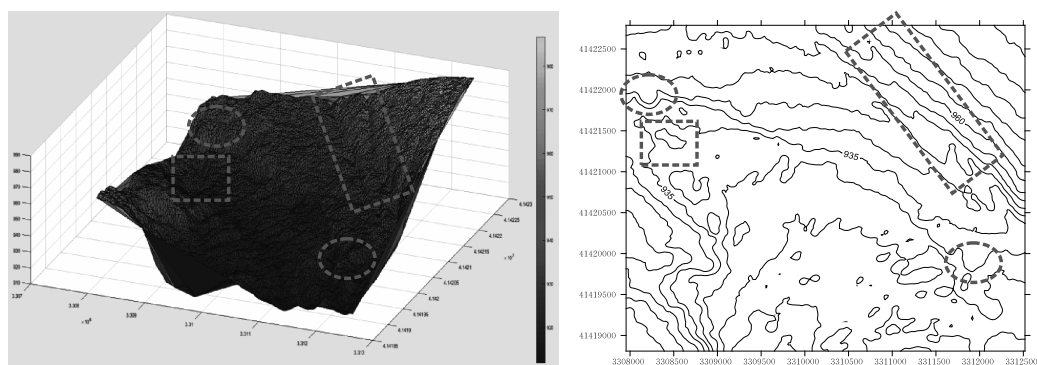


图 10 算法 I 或 II 构建的缓冲半径为 1 000 m 的上缓冲面空间三角网及其 5 m 等深线

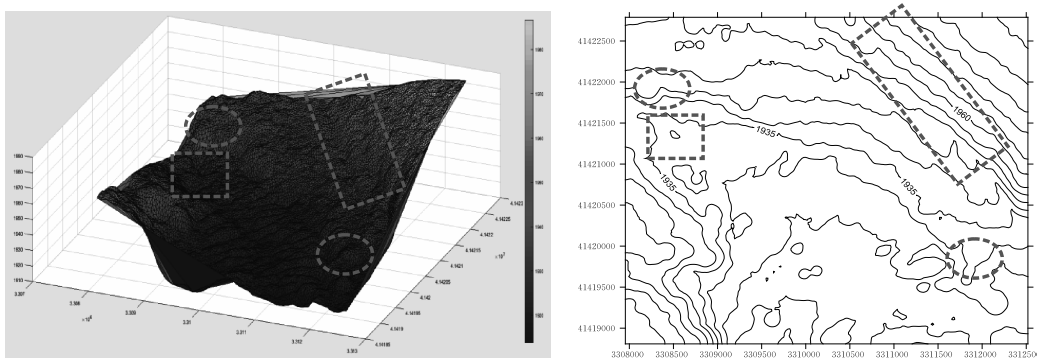


图 11 算法 I 或 II 构建的缓冲半径为 2 000 m 的上缓冲面空间三角网及其 5 m 等深线

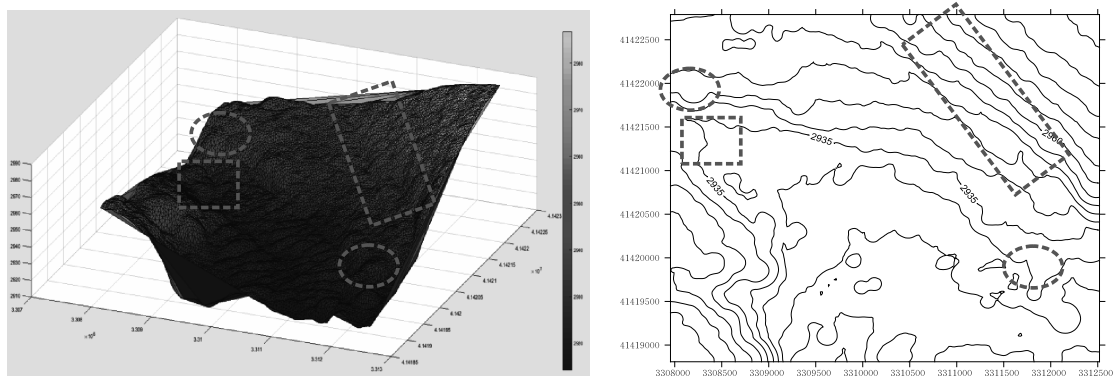


图 12 算法 I 或 II 构建的缓冲半径为 3 000 m 的上缓冲面空间三角网及其 5 m 等深线

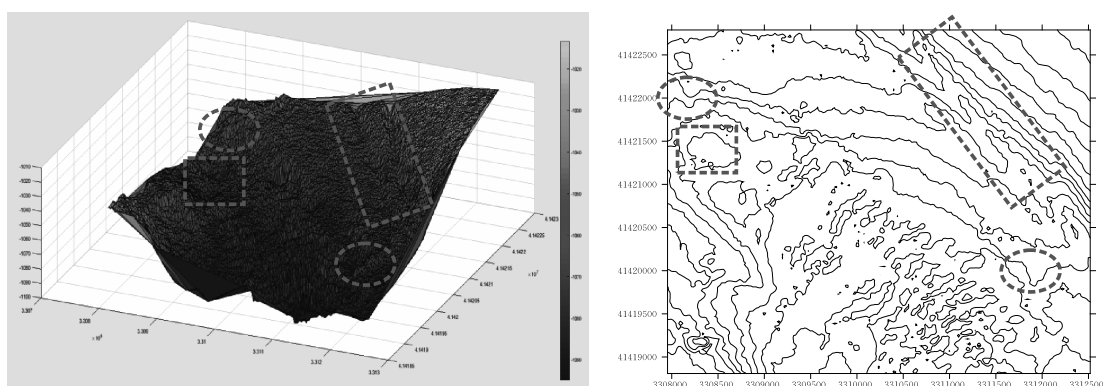


图 13 算法 I 或 II 构建的缓冲半径为 1 000 m 的下缓冲面空间三角网及其 5 m 等深线

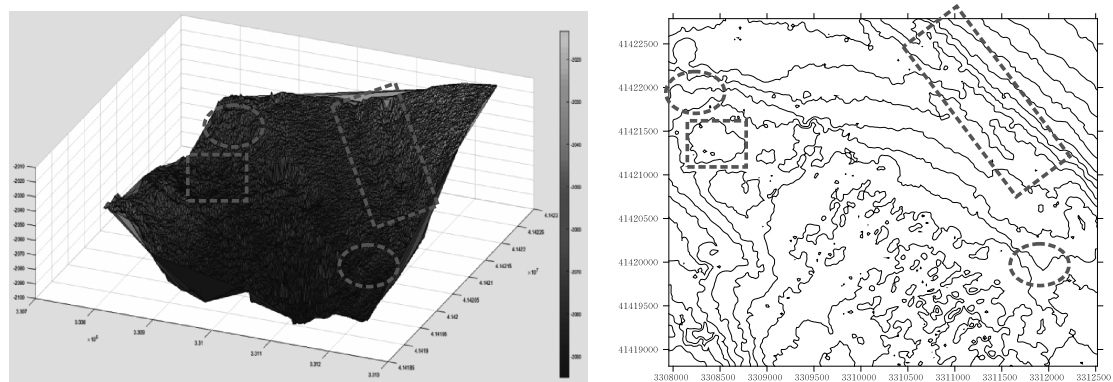


图 14 算法 I 或 II 构建的缓冲半径为 2 000 m 的下缓冲面空间三角网及其 5 m 等深线

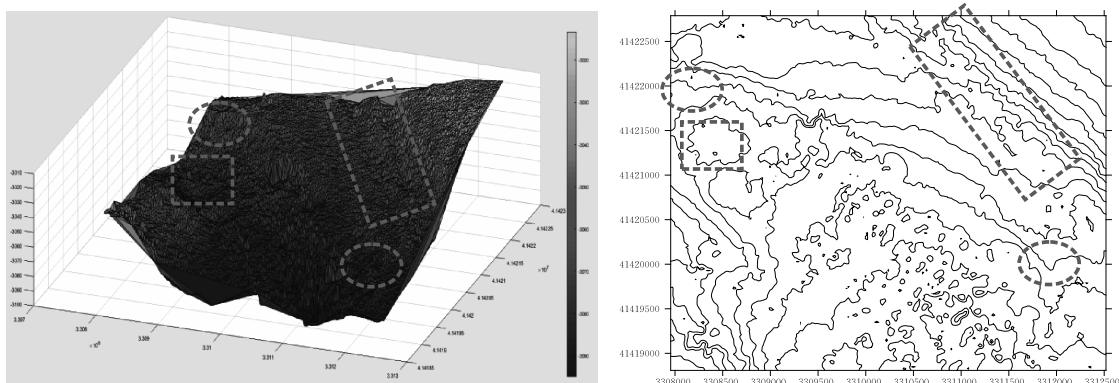


图 15 算法 I 或 II 构建的缓冲半径为 3 000 m 的下缓冲面空间三角网及其 5 m 等深线

实验结果表明:①上缓冲面的凹地形区域均有被填平或缩小的趋势,且随着缓冲半径的增大,填平或缩小的趋势逐渐变大,上缓冲面的凸地形区域形态虽然受到周围地形的影响发生变化,但仍然保持凸部形态;②下缓冲面的凸地形区域均有被削平或缩小的趋势,且随着缓冲半径的增大,削平或缩小的趋势逐渐变大,下缓冲面的凹地形区域形态虽然受到周围地形的影响发生变化,但仍然保持凹部形态;③由等深线图可以看出,由于 TIN-DDM 上缓冲面“填凹保凸”和下缓冲面“削凸保凹”的特性,TIN-DDM 缓冲面均逐渐趋于平坦,且各自然邻点间的 z 坐标值变化幅度随滚动球半径的增大而减小。

此外,为验证本文所提算法在模型精度保持上的优势,以其他算法构建矢量缓冲面作为参考,借鉴 TIN-DDM 精度评估最常用的逐点检查法来对三种算法所构建缓冲面的精度进行对比分析,将检查点按照 50×50 的网格进行分布,其中水深数据的测量中误差 σ 为 1 m,TIN-DDM 平面 Delaunay 三角网中各自然邻点间的最大间距值 $d_{\max}$ 为 31.2 m,对相关算法和算法 I、II 所构建的上缓冲面进行精度对比统计分析,实验结果如表 1 所示。

表 1 相关算法与算法 I、II 所构建缓冲面精度对比统计

单位:m

缓冲半径	检查点最大差值	检查点最小差值	对比精度值
500	1.985	0.853	1.943
1 000	1.904	0.647	1.541
1 500	1.754	0.497	1.296
2 000	1.423	0.308	1.107
2 500	1.221	0.168	1.003
3 000	1.096	0.086	0.788

将测量中误差 σ 和最大间距值 $d_{\max}$ 代入式(6)的反解式 $r \geq \frac{1}{2}\sigma + \frac{d_{\max}^2}{2\sigma}$ 中,可解得满足模型精度要求的最小滚动球半径 r 为 487.2 m。由表 1 可以看出:①各检查点的最大差值均控制在 2σ 范围内,说明在 $r \geq \frac{1}{2}\sigma + \frac{d_{\max}^2}{2\sigma}$ 的前提下,TIN-DDM 缓冲面的构建精度可控制在 2σ 范围内,且随着滚动球半径的增大而减小;②检查点最大差值、最小差值和对比精度值均随着滚动球半径的增大而减小,说明滚动球半径与 TIN-DDM 缓冲面构建精度成正比例关系。

最后,为体现本文所提面向 TIN-DDM 缓冲面构建的滚动球加速优化模型的效率优势,对算法 I、II 的耗时情况进行统计分析,实验结果如图 16 所示。

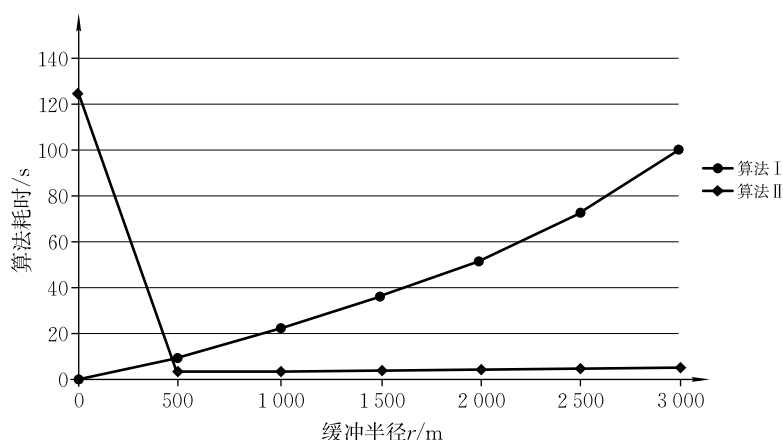


图 16 各算法耗时统计

实验结果表明:①本文所提算法 II 前期需要进行数据预处理,主要建立 TIN-DDM 缓冲面构建关键采样点与滚动球半径之间的数值关联性数据链,以实现滚动球模型的加速优化,而算法 I 不需要进行前期预处理;②在不同缓冲半径的缓冲面构建过程中,算法 I 将滚动球模型应用扩展至 TIN-DDM 缓冲面构建中,采用单值曲面逻辑并运算法则代替大量的几何求交运算,大大缩短算法耗时,将时间复杂度降至

$O(n^2)$), 而算法 II 在算法 I 的基础上进行改进, 通过 TIN-DDM 缓冲面构建关键采样点与滚动球半径之间的数值关联性数据链, 对面向 TIN-DDM 缓冲面构建的滚动球模型进行加速优化, 将后期应用的时间复杂度降至 $O(n)$; ③随着缓冲半径的增大, 算法 I 的耗时逐渐增大, 主要是由于随着滚动球半径的增大, 参与各采样点 z 轴方向上极值点确定的等距离球面逐渐增多, 导致算法耗时增加, 而算法 II 后期主要通过简单的数据查询方式确定 TIN-DDM 缓冲面构建关键采样点, 其算法耗时受缓冲半径变化的影响较小, 且各缓冲半径的上下缓冲面构建时间相差不大。

5 结束语

本文在分析借鉴基于滚动球模型的单值曲面缓冲体边界生成算法的基础上, 通过将滚动球模型引入至 TIN-DDM 缓冲面的构建过程, 提出了一种基于滚动球加速优化模型的 TIN-DDM 缓冲面快速构建算法。首先, 针对滚动球模型在 TIN-DDM 缓冲面构建过程中存在的精度应用局限, 分析论证了影响滚动球模型精度的关键误差累积规律, 并以滚动球半径为关键阈值, 建立了滚动球整体精度的定量评估与控制模型; 其次, 针对大数据量 TIN-DDM 缓冲面多次构建的应用效率需求, 阐明了关键采样点与滚动球半径对 TIN-DDM 缓冲面构建效率的影响机理, 建立了关键采样点的判定准则及与滚动球半径的数值关联关系, 构建了面向 TIN-DDM 缓冲面构建的滚动球加速优化模型; 最后, 结合实验分析对本文所提模型与算法进行了精度与效率的验证。实验结果表明该算法可有效控制 TIN-DDM 缓冲面的构建误差, 且可在一次数据预处理的前提下, 实现大数据量 TIN-DDM 缓冲面的多次快速构建。但需要指出的是, 算法解算过程中, 并未涉及 TIN-DDM 数据分块索引的建立与管理, 难以实现模型的并行运算与处理, 下一步将研究如何根据实际 TIN-DDM 水深采样点分布情况进行数据的自适应分块及算法的并行运算等问题。

参考文献:(略)

第一作者简介:董箭,男,1985年生,讲师,研究方向为地图制图与地理信息系统。E-mail:navydj@163.com