引文格式:董箭,季宏超,刘国辉,等.临界滚动球半径优化的非航海TIN-DDM自动综合算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(5):996-1005.DOI:10.13203/j.whugis20220719

Citation:DONG Jian,JI Hongchao,LIU Guohui,et al.Non-navigational TIN-DDM Automatic Generalization Algorithm for Optimizing Critical Rolling Ball Radius[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(5):996-1005.DOI:10.13203/j.whugis20220719

临界滚动球半径优化的非航海TIN-DDM自动综合算法

董 箭[1] 季宏超[2] 刘国辉[2] 唐露露[1] 陈 阳[2]

1 海军大连舰艇学院军事海洋与测绘系,辽宁 大连,116018

2 海图信息中心,天津,300450

摘 要:为有效改善当前非航海不规则三角网(triangulated irregular network,TIN)数字水深模型(digital depth model,DDM)综合算法在海底形态维护方面的运算效果,同时能够提升综合算法在工程应用中的计算效率,提出一种临界滚动球半径优化的非航海TIN-DDM自动综合算法。该算法通过深入分析临界滚动球半径的物理意义,阐明了临界滚动球与TIN-DDM采样点法向量的关联性,在精确求取各采样点法向量的基础上,根据采样点空间位置与临界滚动球半径的数值分析,构建了正负向临界滚动球半径计算流程,获取了更加精确的临界滚动球半径值,并将该值直接应用于现有的综合算法中。实验结果表明,所提算法使采样点地形类型属性判定的结果更为合理,采样点地形特征评价指标求解更加准确,同时相比于对比算法,所提算法的综合结果在TIN-DDM的形态维护与地形精度两方面均得到了一定程度的提升,且算法运行速率也有了相对的提高。

关键词:临界滚动球半径;非航海TIN-DDM;法向量;计算流程;自动综合

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-02-25

DOI:10.13203/j.whugis20220719 **文章编号**:1671-8860(2025)05-0996-10

Non-navigational TIN-DDM Automatic Generalization Algorithm for Optimizing Critical Rolling Ball Radius

DONG Jian[1] *JI Hongchao*[2] *LIU Guohui*[2] *TANG Lulu*[1] *CHEN Yang*[2]

1 Department of Military Oceanography and Hydrography & Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China

2 Chart Information Center, Tianjin 300450, China

Abstract: **Objectives**: To address the limitations of existing non-navigational triangulated irregular network (TIN)-based digital depth model (DDM) generalization algorithms in maintaining seabed morphology and improving computational efficiency, this paper aims to develop an optimized automatic generalization algorithm by refining the critical rolling ball radius. The goal is to enhance both the accuracy of morphology preservation and the practical applicability of DDM in engineering projects. **Methods**: The proposed algorithm first investigates the physical significance of the critical rolling ball radius and establishes its relationship with the normal vectors of TIN-DDM sampling points. By precisely calculating the normal vectors of each sampling point, the method derives a novel workflow for determining positive and negative critical rolling ball radii based on spatial analysis of sampling point locations and radius values. This optimized radius is then integrated into existing generalization algorithms to improve their performance. **Results**: Experimental comparisons demonstrate that the proposed algorithm achieves better preservation of seabed morphology and higher terrain accuracy in TIN-DDM generalization compared to conventional methods. Additionally,

基金项目:国家自然科学基金(42071439,41901320);海军大连舰艇学院科研发展基金(DJYKYKT2021-025)。

第一作者:董箭,博士,教授,主要从事海图制图理论、国家海洋权益方面的研究。navydj@163.com

通信作者:季宏超,硕士,助理工程师。jihongchao324459@163.com

the computational efficiency of the algorithm is significantly enhanced, with reduced runtime while maintaining or improving output quality. **Conclusions**: We successfully validate the effectiveness of the critical rolling ball radius optimization approach in enhancing both the accuracy and efficiency of TIN-DDM generalization. This method provides a robust framework for maintaining complex seabed features during data simplification, offering practical benefits for applications such as marine engineering and hydrographic surveying. The integration of normal vector analysis and adaptive radius computation represents a notable advancement in automated DDM generalization techniques..

Key words: critical rolling ball radius; non-navigational TIN-DDM; normal vector; calculation process; automatic generalization

数字水深模型(digital depth model,DDM)是利用有限、离散的水深点实现对海底地形表面高低起伏形态的数字化表达,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(triangulated irregular network DDM, TIN-DDM)[1-5]。区别于GRID-DDM,在TIN-DDM的构建过程中其数据未经任何内插处理,且直接采用实测水深作为其模型采样点,因此TIN-DDM在反映地形形态变化方面的优势相对突出,基于TIN-DDM的海底地形形态分析结论相对更加准确[1-3,6]。虽然TIN-DDM所具备的上述特性与强调海底地形形态分析及特征表达的非航海DDM应用需求高度匹配,但随着海底观探测技术的发展,水深数据密度的较大提升也为其在非航海的应用领域带来了尺度变换的需求及数据化简的障碍[7-9]。因此近年来,专门针对非航海TIN-DDM应用需求的自动综合算法研究愈发受到重视。

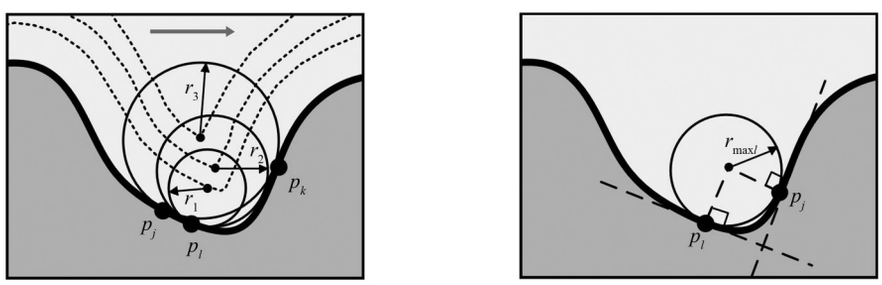
由于模型构建方式及应用场景的相似性,传统非航海TIN-DDM自动综合算法多数由陆地TIN数字高程模型(digital elevation model,TIN-DEM)多尺度表达算法改进获得,如信息量判别法、三角面片法矢量夹角法、点面距法、三维Douglas-Peucker法等[10-12]。虽然从原理上将针对TIN-DEM的综合算法直接引入到TIN-DDM中具有一定可行性,但由于数据获取方式的特殊性,水深数据采集时无法直接获得完整的地形控制信息,采用算法套用的方式会使得TIN-DDM的综合结果难以满足非航海TIN-DDM对海底地形特征信息深层次挖掘的应用需求[13]。为在非航海TIN-DDM的自动综合中实现海底地形特征的挖掘,文献[6]利用滚动球变换的地形形态定量识别特性,构建了采样点地形类型与滚动球半径的关联模型,通过对滚动球接触点与滚动球半径的数值关联性分析,实现了面向非航海TIN-DDM地形形态连续尺度表达的滚动球变换[14]。虽然该算法在一定程度上解决了传统算法存在的地形形态划分边界不明确、空间尺度认知存在差异的问题,但由于其仍无法实现采样点地形特征的定量评价,使得其综合结果难以同时顾及海底地形形态识别的准确性及整体海底地形特征维护的充分性[13]。为兼顾海底地形形态的准确识别与海底地形特征的充分维护,文献[13]将地形形态识别范围的概念引入TIN-DDM采样点地形类型与滚动球半径的关联模型,通过构建采样点微观(宏观)地形类型与滚动球临界半径关联模型与面向海底地形形态识别的采样点地形特征定量评价指标,实现了采样点地形类型的定量识别及特征量化评估。虽然该算法能够在识别海底地形形态的基础上有效维护海底地形特征,但由于其临界滚动球半径的求解原理上存在一定局限性,降低了其算法综合结果的地形精度,削弱了地形特征维护效果,且算法中临界滚动球半径求解效率偏低,使得该算法难以对大数据量水深数据进行快速处理,进而间接影响了算法本身的适用性。

随着非航海TIN-DDM自动综合算法的研究发展,算法本身对海底地形特征信息的挖掘不断深入,TIN-DDM采样点地形特征表达也从定性分析转变为定量评价,使得其综合结果在地形形态维护方面的效果持续提高。需要指出的是,作为TIN-DDM采样点地形特征定量表达的核心因子,临界滚动球半径的计算精度决定着算法综合结果对地形形态维护效果,其求解方式更是影响着算法整体运行的速率(工程应用的关键)。因此,本文在深入分析临界滚动球半径物理意义及其当前求解方式局限性的基础上,以临界滚动球与TIN-DDM采样点法向量的关系为纽带,构建了一种新的正负临界滚动球半径计算流程,提出了临界滚动球半径优化的非航海TIN-DDM自动综合算法。

1 临界滚动球半径及原求解方法的局限性

1.1 临界滚动球半径的物理意义及相关性质分析

为便于叙述TIN-DDM采样点临界滚动球半径的局限性及快速求解方法,首先引入滚动球变换的概念。参照文献[15],滚动球变换定义为三维空间中存在一球体(滚动球)在TIN-DDM地形表面连续滚动生成缓冲面的过程。根据滚动球在TIN-DDM地形上、下表面滚动的差异,滚动球变换可分为正向变换与负向变换。临界滚动球则是TIN-DDM在滚动球变换的过程中,随着滚动球半径r逐渐增大,各采样点由滚动球接触点变为非接触点的临界状态,该临界状态下的滚动球即为临界滚动球,其半径为临界滚动球半径,根据滚动球变换方向的差异,临界滚动球半径也可分为正向临界滚动球半径与负向临界滚动球半径。图1(a)所示为正向临界滚动球半径求解过程分析(负向同理),其中黑色实线圆表示滚动球;r_i表示滚动球半径,$i=1,2,3$,其数值关系满足关系式:$r_1<r_2<r_3$;黑色实线表示TIN-DDM地形纵向剖面;黑色虚线表示滚动球球心位于TIN-DDM上表面滚动形成的上缓冲面纵向剖面;黑色圆点表示TIN-DDM采样点。



(a) 临界滚动球半径求解过程分析 (b) 临界滚动球性质分析

图1 正向滚动球变换纵向剖面图

Fig. 1 Longitudinal Section of Forward Rolling Ball Transformation

由图1(a)可知,在TIN-DDM进行滚动球变换过程中,当滚动球半径为r_1时,滚动球始终与采样点p_l接触。随着滚动球半径的增大,当滚动球半径为r_2时,对于采样点p_l而言,此时滚动球p_l处于临界状态,即若滚动球半径继续增大,如采样点半径为r_3,滚动球会受到周边地形影响(采样点p_j、p_k)与p_l不再接触,故采样点p_l的正向临界滚动球半径为r_2(r_{maxl})。且如图1(b)所示,假设TIN-DDM表面光滑,由海底地形连续可微的特性可知,TIN-DDM的局部地形表面与临界滚动球相交于p_l、p_j,TIN-DDM的局部地形表面在p_l与p_j的切平面与临界滚动球相切。

根据上述分析与临界滚动球半径的定义可知,在假设TIN-DDM地形表面为光滑表面的前提下,任意采样点p_l与其所对应的正向(负向)临界滚动球及半径r_{maxl}(r'_{maxl})间具有如下性质:①p_l与临界滚动球接触,且r_{maxl}、r'_{maxl}值唯一;②临界滚动球球心与p_l的连线垂直于局部地形表面;③正向(负向)临界滚动球边界除与p_l本身接触外必接触其余采样点,且滚动球球心与其接触点均垂直于地形表面,其距离为r_{maxl}(r'_{maxl}),但内部不包含采样点。

1.2 原临界滚动球半径求解方法的局限性分析

为便于叙述在文献[13]中临界滚动球半径的求解方法,首先引入关键采样点的概念。关键采样点是在某一采样点p_l以r为缓冲半径(滚动球半径)构建其缓冲面纵向对应点的过程中起决定性作用的采样点[16]。图2为不同缓冲半径下,TIN-DDM正向缓冲面构建过程(负向同理)。其中,绿色、红色、蓝色的折点与折线分别表示在缓冲半径为r_l、r_j、r_k时,TIN-DDM采样点所对应缓冲面上的采样点及缓冲面纵向剖面;绿色、红色、蓝色的虚线圆分别表示半径为r_l、r_j、r_k的滚动球。

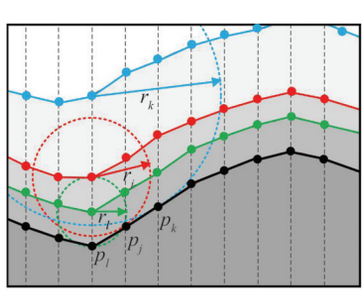
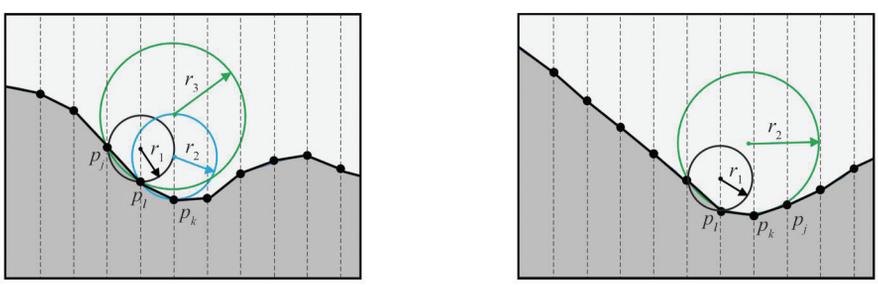


图2 TIN-DDM正向缓冲面构建过程

Fig. 2 TIN-DDM Positive Buffer Surface Construction Process

由图2可知,在缓冲半径为r_l时,采样点p_l所对应的缓冲面采样点位置确定仅与过该点本身的滚动球有关,则在滚动球半径为r_l时,p_l为该点本身的关键采样点。而当滚动球半径为r_j、r_k时,p_l所对应的缓冲面采样点位置确定分别与p_j、p_k有关,则在滚动球半径为r_j、r_k时,p_l的关键采样点分别为p_j、p_k。值得注意的是,关键采样点始终与滚动球接触,如绿色虚线圆与p_l接触,红色虚线圆与p_j接触。

通过滚动球接触点与滚动球半径的数值关联性分析,获得各采样点在缓冲半径(滚动球半径)由小到大变化过程中(0到∞)的所有关键采样点,利用关键采样点与滚动球接触的特性满足§1.1有关临界滚动球半径性质①的要求,将采样点作为自身关键采样点的滚动球半径区间与该采样点作为其他采样点的关键采样点半径区间进行求并运算,运算结果的最大边界值即为该点的正向临界滚动球半径[14]。图3(a)所示为采样点p_l的正向临界滚动球半径求解过程(负向同理),其中,黑色实线圆的半径表示采样点p_l以自身作为关键采样点的最大半径,其值为r_1;蓝色实线圆的半径表示采样点p_l成为p_k关键采样点的最小半径,其值为r_2;绿色实线圆的半径表示采样点p_l成为p_k关键采样点的最大半径,其值为r_3。需要注意的是,r_3也是p_j成为p_k关键采样点的最小半径。



(a) 临界滚动球半径求解过程　　(b) 临界滚动球半径求解问题

图3　正向临界滚动球半径求解及问题分析

Fig. 3　Solving and Problem Analysis of Positive Critical Rolling Ball Radius

根据上文所述采样点临界滚动球半径的求解过程,采样点p_l的正向临界滚动球半径为区间$(0,r_1)$与区间(r_2,r_3)求并的最大值,即$r_{maxl}=\max((0,r_1)\cup(r_2,r_3))=r_3$。需要指出的是,虽然由于TIN-DDM数据的离散性,使得文献[13]所求临界滚动球半径只能逼近真实值而无法达到真实值,但上述方法依然存在一定缺陷,使得其所求滚动球临界半径结果与真实值相差过大。如图3(b)所示,p_l的真实临界滚动球半径逼近于绿色实线圆的半径r_2,而在p_k所在局部地形内,由于采样点p_j的影响使得p_l并不会成为p_k的关键采样点,导致了p_l的临近滚动球半径r_{maxl}($\max((0,r_1)\cup\varnothing)=r_1$)远小于$r_2$,该现象造成了文献[13]所提算法所求解的采样点临界滚动球半径与真实值偏差过大。

由于在TIN-DDM的自动综合中,文献[13]所述算法的综合点序优先级取决于采样点地形特征评价指标值,而在其评价指标中,无论是其中所涉及的采样点地形类型属性的判定,还是地形特征评价指标值的具体求解,均仅与临界滚动球半径相关,因此该问题的出现将直接影响文献[13]所提算法对TIN-DDM的综合效果。

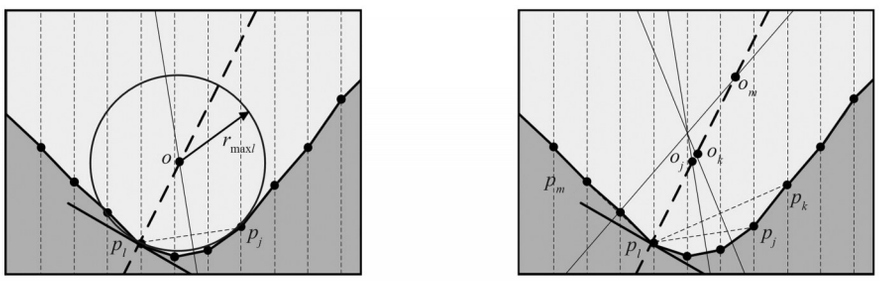
2　临界滚动球半径优化求解

临界滚动球半径的求解关键在于将临界滚动球半径所具备的相关特性进行模拟表达,考虑到§1.1总结的关于临界滚动球半径的三点性质即为临界滚动球半径求解的三点要求,本文将TIN-DDM采样点的法向量引入到其计算过程中,通过采样点的空间位置与临界滚动球半径的数值分析,设计临界滚动球半径计算流程,实现临界滚动球半径的优化求解,最终达到综合算法结果优化改进的目的。

2.1　临界滚动球半径的优化求解原理

根据§1.1有关临界滚动球半径的相关性质可知,合理求解TIN-DDM采样点临界滚动球半径的值,其关键在于明确临界滚动球球心的空间位置。由性质②可知,过任意采样点p_l的TIN-DDM地形局部表面切平面法向量所在直线必然经过滚动球球心,且由性质③可知,临界滚动球球心到其他接触点的距离相等,基于此即可确定临界滚动球球心的空间位置。图4(a)为TIN-DDM采样点p_l正向临界

滚动球半径的求解原理(负向同理),其中,虚线表示过p_l的直线,该直线与p_l所在局部地形法向量的方向一致;黑色实线(细)表示过p_l与p_j中点平面的纵向剖面,该平面的法向量为$\overrightarrow{p_l p_j}$。

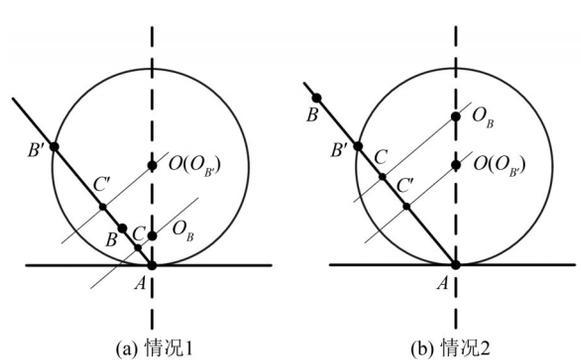


(a) 临界滚动球球心位置求解过程 (b) 不同采样点球心位置比较

图4 正向临界滚动球半径的求解原理

Fig. 4 Principle of the Positive Critical Rolling Ball Radius Solving

假设p_l的临界滚动球在除p_l外与p_j接触,则p_l的临界滚动球球心O为图4(a)中虚线与实线(细)的交点。然而,理论上在p_l的正向临界滚动球球心的求解过程中,在过p_l切平面上方的任意采样点均可求得其与p_l的正向临界滚动球球心,(图4(b))。因此,求取任意采样点(p_l)的临界滚动球半径的关键在于临界滚动球与其非本身接触点(p_j、p_k、p_m…)的空间关系(图5)。如图5(a)所示情况1,假设滚动球内部存在一采样点B,过线段AB中点并以向量$\overrightarrow{AB}$为法向量的平面交虚线于点O_B,延长线段AB交滚动球于点B',同理,过线段AB'的中点并以向量$\overrightarrow{AB'}$为法向量的平面交虚线于点$O_{B'}$,由三角形空间关系可知:$\triangle ACO_B \simeq \triangle AC'O_{B'}$且$AC<AC'$,故$AO_B<AO_{B'}$,同理如图5(b)所示情况2,可知假设滚动球外部存在一采样点B,则$AO_B>AO_{B'}$。因此可得如下结论:滚动球内部采样点所求临界滚动球球心必在滚动球边界点与其球心的线段之间,滚动球外部采样点所求临界滚动球球心必在滚动球边界点与其球心的线段之外。



(a) 情况1 (b) 情况2

图5 临界滚动球与其非本身接触点的空间关系分析

Fig. 5 Analysis of Spatial Relationship Between Critical Rolling Ball and Its Non-self Contact Point

结合上述分析结论与§1.1性质③可知,任意采样点p_l的正向临界滚动球半径是其切平面上方的任意采样点所求球心位置距p_l的最小值,此时可同时满足性质③中p_l的非本身接触点距临界滚动球球心的距离为r_{max},且内部不包含其余采样点。需要注意的是,由于TIN-DDM采样点的离散性,球心与非本身接触点的方向向量并不能完全等同于TIN-DDM在非本身接触点所在局部地形的法向量,所求的临界滚动球半径只能无限逼近真实值。基于上述方法,对在图3(b)所示地形中文献[13]求解临界滚动球半径方法所存在的问题进行优化,其过程如图6所示,其中,红色实线圆表示本文方法所求得p_l的临界滚动球,其半径为r_3。图6中,r_1(文献[13]所求解p_l的正向临界滚动球半径)、r_2(p_l真实的正向临界滚动球半径)、r_3(本文方法所求解p_l的正向临界滚动球半径)满足关系式:$r_1<r_2<r_3$,且$r_1 \ll r_2 \approx r_3$。因此可得结论:本文方法可有效克服文献[13]在求解临界滚动球半径中所存在的问题。

2.2 临界滚动球半径计算模型

2.2.1 基于主成分分析法求解TIN-DDM采样点法向量

准确求取TIN-DDM采样点所在局部地形切平面法向量是本文求解其临界滚动球半径的基础,主成分分析法是一种常见的TIN-DDM采样点法向量提取方法[17-20],基本步骤如下:

1)采样点$p_i(i=1,2,\cdots,n)$以r_i为半径建立局部球邻域采样点集$\mathrm{set}(p_i)$,点集内采样点个数为N,即搜索距p_i最近的$N-1$个点。

2)根据$\mathrm{set}(p_i)$内采样点的三维坐标(x,y,z)构建$N\times 3$矩阵$\boldsymbol{P}$并进行中心化操作;

3)计算其协方差阵cov_$\boldsymbol{P}$,并求解cov_$\boldsymbol{P}$的

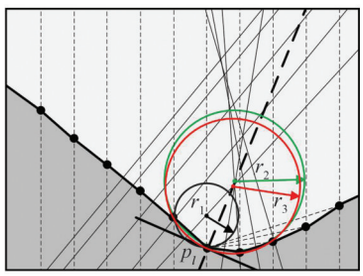


图6　正向临界滚动球半径的优化求解过程及对比分析

Fig. 6　Optimal Solving Process and Comparative Analysis of Positive Critical Rolling Ball Radius

特征值与特征向量;

4)将最小特征值λ_i对应的特征向量α_i作为set(p_i)拟合曲面在p_i处切平面的法向量;

5)α_i与$(0,0,1)$点乘,若其值小于0,则$\alpha_i=-\alpha_i$。

需要注意的是,N的取值与TIN-DDM采样点数据密度相关,合理的取值是精确计算采样点法向量的关键。TIN-DDM采样点法向量的计算结果示意图如图7所示。

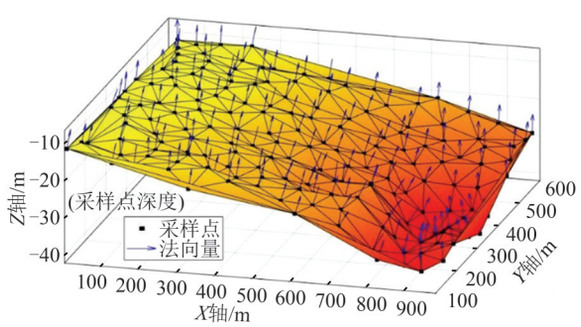


图7　TIN-DDM采样点法向量示意图

Fig. 7　Schematic Diagram of Normal Vector of TIN-DDM Sampling Point

2.2.2　正负向临界滚动球半径计算流程

根据§2.1临界滚动球半径的优化求解原理与§2.2.1对TIN-DDM采样点法向量的计算结果,本节具体地给出TIN-DDM任意采样点p_i正负向临界滚动球半径的求解流程,其基本步骤如下:

1)计算采样点$p_i(i=1,2,\cdots,n)$的法向量α_i,$\alpha_i=(m_1,m_2,m_3)$,p_i的坐标为(x_i,y_i,z_i);

2)求解p_i与$p_j(j=1,2,\cdots,n)$的中点坐标(x_{ij},y_{ij},z_{ij}),其中$i\neq j$;

3)求解向量$\overrightarrow{p_ip_j}$,$\overrightarrow{p_ip_j}=(x_j-x_i,y_j-y_i,z_j-z_i)=(n_1,n_2,n_3)$;

4)求解过p_i并与α_i同向的直线参数方程组:

$$x=x_i+m_1t,y=y_i+m_2t,z=z_i+m_3t \tag{1}$$

5)求解过p_i、p_j中点以$\overrightarrow{p_ip_j}$为法向量的平面方程:

$$n_1(x-x_{ij})+n_2(y-y_{ij})+n_3(z-z_{ij})=0 \tag{2}$$

6)联立式(1)、式(2)可求参数t:

$$t=\frac{n_1(x_{ij}-x_i)+n_2(y_{ij}-y_i)+n_3(z_{ij}-z_i)}{n_1m_1+n_2m_2+n_3m_3} \tag{3}$$

7)将参数t代入式(1)求得交点,并计算交点到p_i的距离dist_{ij};

8)如果$\overrightarrow{p_ip_j}\cdot\alpha_i>0$,将$\mathrm{dist}_{ij}$记录到集合set1中,若$\overrightarrow{p_ip_j}\cdot\alpha_i<0$,则将$\mathrm{dist}_{ij}$记录到集合set2中;

9)返回步骤2)遍历下一采样点,直至除p_i外的采样点全部遍历完毕;

10)计算p_i的正向临界滚动球半径$r_{maxi}=\min(\mathrm{set1})$,$p_i$的负向临界滚动球半径$r'_{maxi}=\min(\mathrm{set2})$,其中,min( )表示寻找集合中的最小值。

需要注意的是,作为文献[13]算法判定TIN-DDM采样点地形属性与评价采样点地形特征的参数,临界滚动球半径的优化过程并不改变文献[13]算法的整体流程,即本文改进算法的采样点宏观(微观)地形类型与临界滚动球半径的关联模型、采样点地形特征定量评价指标均与文献[13]算法相同,因此两种算法的优劣可等价于临界滚动球半径求解准确性的差异。

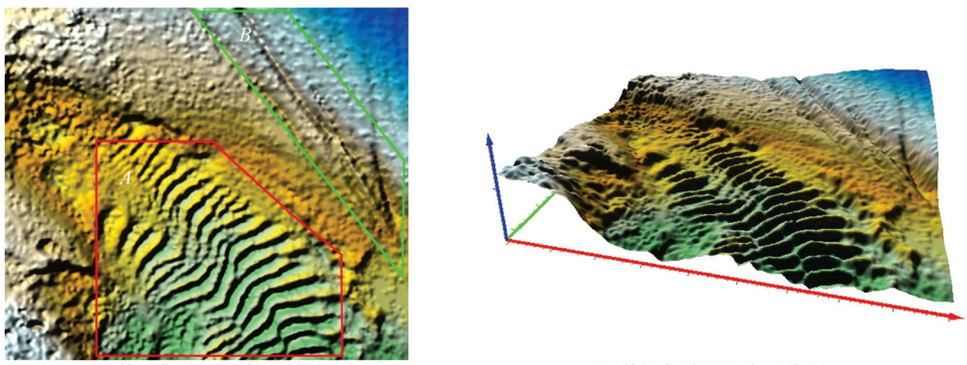
3　实验与分析

3.1　有效性分析实验

为验证本文所提基于临界滚动球半径优化求解的非航海TIN-DDM自动综合算法的有效性,本文在C#环境下实现了该算法(以下简称算法Ⅰ)与文献[13]算法(以下简称算法Ⅱ),并通过Surfer与Matlab对实验结果进行显示与分析。实验数据为中国某海区的一组水深数据集所构建的TIN-DDM,该TIN-DDM共包含12 774个采样点,数据集的地形形态与统计指标见图8与表1。

3.1.1　定性对比实验分析

为定性地对比算法Ⅰ与算法Ⅱ的综合效果,分别采用两种算法对实验数据进行定量综合处理,其中,算法Ⅰ的参数N取6。综合过程中,删除的TIN-DDM采样点数量分别为6 000、8 000、10 000、11 000、12 000个。自动综合后的TIN-DDM地形表面及采样点散点图如表2、表3所示。



(a) 数据集地形形态平面图　　(b) 数据集地形形态三维图

注:红色实线内的区域为海底沟壑构成的面状区域(区域*A*);绿色实线内的区域为海底沟壑构成的条带状区域(区域*B*)。

图8　TIN-DDM地形形态

Fig. 8　Topographic Forms of TIN-DDM

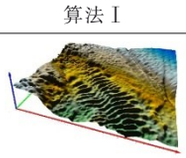
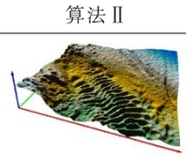
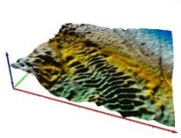
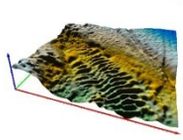
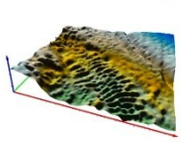
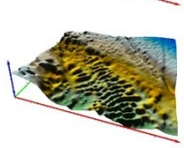
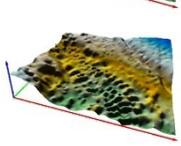
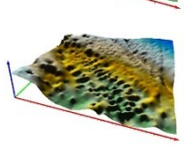
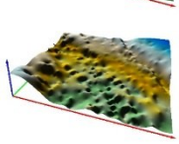
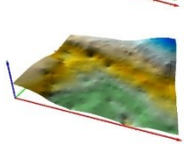
表1　数据集整体统计指标

Table 1　Overall Statistical Indicators of Dataset

水深点个数/个	深度均值/m	深度中位数/m	深度方差/m^2	深度最大值/m	深度最小值/m
12 774	−62.07	−66	261.58	−13.3	−95

表2　综合后的TIN-DDM地形表面

Table 2　Generalized TIN-DDM Terrain Surface

综合点数/个	算法Ⅰ	算法Ⅱ
6 000		
8 000		
10 000		
11 000		
12 000		

由表2可知,在采样点自动综合数量分别为6 000、8 000、10 000个时,两种算法均较好地保持了原有TIN-DDM地形表面主要的形态与特征。随着综合尺度的增大,当采样点自动综合数量为11 000、12 000个时,算法Ⅰ所综合的效果明显优于算法Ⅱ,尤其在采样点综合数量为12 000个时,算法Ⅰ所得结果对区域*A*、*B*均有一定程度上的地形特征保持,而算法Ⅱ在区域*A*、*B*的地形特征基本消失。由表3可知,两算法在TIN-DDM采样点的自动综合中,随着综合尺度的增大,算法Ⅰ所保留的采样点分布更为平均,综合后的连续大面积空白区域相对较少,如采样点综合数量为12 000个时,算法Ⅱ中的红色框区域,该现象也进一步表明算法Ⅰ的适用性强于算法Ⅱ。出现上述两点现象的主要原因在于,相比于算法Ⅱ,算法Ⅰ所求解的临界滚动球半径更加逼近真实数值,使得其采样点地形类型属性判定的结果更为合理,采样点地形特征评价指标求解更加准确,最终使得其综合效果更加优异。

3.1.2　定量对比实验分析

为进一步定量对比算法Ⅰ与算法Ⅱ的综合效果在TIN-DDM精度保持方面的优劣,分别对综合后采样点所构建的TIN-DDM与原始TIN-DDM深度之间的绝对误差极大值、平均绝对误差、均方根误差[21-22]进行计算,两种算法综合结果的精度评估统计如表4所示。

由表4可知,在采样点自动综合数量分别为6 000、8 000、10 000个时,算法Ⅰ所得结果的地形精度略优于算法Ⅱ。随着综合尺度的增大,当采样点自动综合数量为11 000、12 000个时,算法Ⅰ所得结果的地形精度明显优于算法Ⅱ。因此相对于算法Ⅱ,算法Ⅰ具有较高的算法精度,且该现象在大尺度综合的情况下更加明显。

3.2　运行效率对比实验

为对比两种算法运行效率上的优劣,在§3.1实验数据(以下简称数据*A*)的基础上再选取两组数据(以下分别简称为数据*B*、数据*C*),并分别采用两种算法对3组数据定量删减5 000个采样点,其运行时间对比如表5所示。其中数据*B*包含26 424个采样点,数据集*C*包含48 300个采样点。

表3　综合后的TIN-DDM采样点散点图

Table 3　Generalized TIN-DDM Sampling Point Scatter Plot

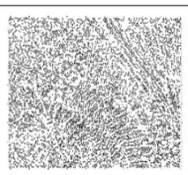
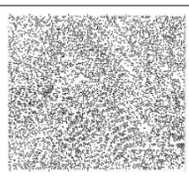
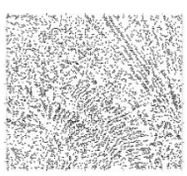
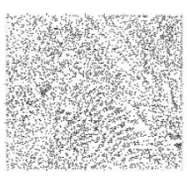
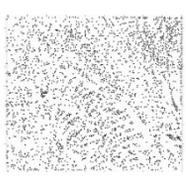
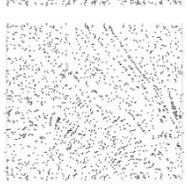
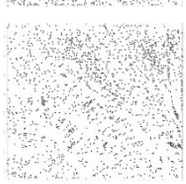
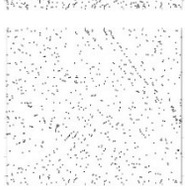
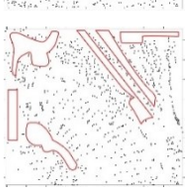
综合点数/个	算法Ⅰ	算法Ⅱ
6 000		
8 000		
10 000		
11 000		
12 000		

表4　综合精度对比分析

Table 4　Comparative Analysis of Generalization Accuracy

综合点数/个	绝对误差极大值/m		平均绝对误差/m		均方根误差/m	
	算法Ⅰ	算法Ⅱ	算法Ⅰ	算法Ⅱ	算法Ⅰ	算法Ⅱ
6 000	5.749	5.769	0.384	0.386	0.578	0.594
8 000	7.422	7.462	0.553	0.567	0.887	0.902
10 000	9.493	10.094	0.852	0.862	1.265	1.301
11 000	11.417	14.171	1.088	1.190	1.595	1.792
12 000	12.901	24.780	1.480	3.613	2.113	4.898

表5　算法运行效率对比/s

Table 5　Comparison of Algorithm Operating Efficiency/s

数据	算法Ⅰ	算法Ⅱ
数据A	137.2	511.7
数据B	515.1	2 438.3
数据C	1 909.1	10 843.9

由表5可知,在采样点删减数量相同时,算法Ⅰ的运行效率均优于算法Ⅱ。对于数据集A,算法Ⅱ的运行时间为算法Ⅰ的3.72倍,数据集B为4.73倍,数据集C为5.67倍。出现上述现象的主要原因在于,由于算法Ⅰ与算法Ⅱ的差异仅在于临界滚动球半径的求解方式,因此临界滚动球半径求解的速度差异是两算法运行效率优劣的关键。根据§1.2所述,算法Ⅱ在求取任意采样点p_i的正(负)临界滚动球半径过程实际上是一个寻找p_i正(负)关键采样点的过程。根据文献[16]可知,在寻找p_i的关键采样点前,需要判断除p_i以外采样点的等距离球面是否在p_i的z轴方向上形成极大(小)值,并将形成极大(小)值的采样点构建为p_i的正(负)关键采样点集,随后在寻找p_i的正(负)关键采样点的过程中,需要以递进的方式不断确定p_i在z轴方向上的关键采样点与其相应区间。而根据§2.2可知,算法Ⅰ的正(负)向临界滚动球半径是通过直接计算两点距离,并以判断正(负)向临界滚动球半径集合中最小值的方式确定其值,该方式从原理上降低了临界滚动球半径的复杂程度,最终使得算法Ⅰ的运行效率优于算法Ⅱ。

4　结　语

本文提出一种TIN-DDM采样点临界滚动球半径优化求解算法,并将其引入到文献[13]实现该算法的改进。本文算法基于临界滚动球半径的物理意义及其与临界滚动球相关的三点性质,在深入分析文献[13]算法求解临界滚动球半径局限性的基础上,利用上述性质作为临界滚动球半径求解条件,阐明了临界滚动球半径优化求解的原理及具体计算流程。为验证其有效性,本文在相关实验数据集上,分别从定性与定量的角度验证了对本文算法在综合效果、地形精度、运行效率三方面的优势。需要注意的是,作为本文算法临界滚动球半径求解的前提条件,采样点所在局部地形曲面切平面的法向量求解精度与本文算法综合效果密切相关,而由于数据本身是离散化的采样点,故法向量求取结果的精确性与采样点的密度及其所在空间位置密切相关,因此深入分析采样点密度及空间位置对法向量求解的影响,并依此对法向量求解进行优化是本文算法今后的改进重点。

参　考　文　献

[1]　李志林, 朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001: 78-91.
LI Zhilin, ZHU Qing. Digital Elevation Model

[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2001: 78-91.

[2] 张立华,贾帅东,元建胜,等. 一种基于不确定度的水深控浅方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(2): 184-190.
ZHANG Lihua, JIA Shuaidong, YUAN Jiansheng, et al. A Method for Controlling Shoal-Bias Based on Uncertainty[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(2): 184-190.

[3] PORATHE T. 3D Nautical Charts and Safe Navigation[D]. Eskilstuna:Malardalen University,2006.

[4] 贾帅东,张立华,董箭,等. 利用拟构模型面调控水深模型点选取的航海DDM构建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(11): 1715-1722.
JIA Shuaidong, ZHANG Lihua, DONG Jian, et al. A Method for Constructing DDM Serving for Navigation Using Pre-sconstructed Model Surface to Control and Adjust the Selection of DDM Nodes [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(11): 1715-1722.

[5] 田峰敏,赵玉新,李磊,等. 由矢量电子海图构建海底TIN DEM方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(2): 142-147.
TIAN Fengmin, ZHAO Yuxin, LI Lei, et al. A Method of Constructing Undersea TIN DEM Based on Vector Nautical Chart[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009, 30(2): 142-147.

[6] 董箭,彭认灿,张立华,等. 数字水深优化建模及滚动球处理技术研究[M]. 北京:测绘出版社, 2020: 161-170.
DONG Jian, PENG Rencan, ZHANG Lihua, et al. Research on Optimization Digital Depth Modeling and Rolling Ball Transform Processing [M]. Beijing: Sino Maps Press, 2020: 161-170.

[7] 唐钰涵. 一种基于局部地形复杂度指标的机载LiDAR地面点云数据抽稀方法[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
TANG Yuhan. A Thin-Method Based on Local Terrain Complexity Index for LiDAR Bare Earth Surface Point Cloud[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

[8] 王映雪,李少梅,任丽秋,等. 面向特征的网络空间点群要素自动综合方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(3): 427-433.
WANG Yingxue, LI Shaomei, REN Liqiu, et al. Automatic Generalization Methods of Cyberspace Point Cluster Features Considering Characteristics [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(3): 427-433.

[9] 李兆兴,翟京生,武芳,等. TIN的海底地形复杂度表示与计算方法[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(3): 305-310.
LI Zhaoxing, ZHAI Jingsheng, WU Fang, et al. Seabed Terrain Complexity Representation and Computation Method for TIN[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2018, 35(3): 305-310.

[10] WEBER W. Automations Gestützte Generalisierung [J]. *Nachrichten aus dem Karten-und Vermessungswesen*, 1982,88(1): 77-109.

[11] 蔡先华,郑天栋. 数字高程模型数据压缩及算法研究[J]. 测绘通报, 2003(12): 16-18.
CAI Xianhua, ZHENG Tiandong. A Study of DEM Data Compression and Its Algorithm[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2003(12): 16-18.

[12] 徐道柱. 基于TIN和RGD的地貌综合研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2007.
XU Daozhu. Study on Cartographic Generalization of Relief Based on TIN and RGD[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2007.

[13] 季宏超,董箭,李树军,等. 兼顾地形形态与特征的非航海TIN-DDM自动综合算法[J]. 测绘学报, 2023, 52(1): 129-141.
JI Hongchao, DONG Jian, LI Shujun, et al. Non-Navigational TIN-DDM Automatic Generalization Algorithm Considering Topographic Forms and Terrain Features[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(1): 129-141.

[14] 张志衡,董箭,彭认灿,等. 基于滚动球变换的TINDDM地形形态划分及连续尺度表达[J]. 测绘学报, 2020, 49(5): 644-655.
ZHANG Zhiheng, DONG Jian, PENG Rencan, et al. Division of TINDDM Topographic Forms and Continuous Scale Representation Based on Rolling Ball Transformation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(5): 644-655.

[15] 董箭,彭认灿,张立华,等. 滚动球变换的数字水深模型多尺度表达[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(6): 704-711.
DONG Jian, PENG Rencan, ZHANG Lihua, et al. Multi-scale Representation of Digital Depth Model Based on Rolling Ball Transform [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, 14(6): 704-711.

[16] 张志强,董箭,彭认灿,等. 关键采样点高效判定的TIN-DDM缓冲面快速构建算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1831-1845.
ZHANG Zhiqiang, DONG Jian, PENG Rencan, et al. Fast Construction Algorithm of TIN-DDM Buffer Surface Based on Efficient Determination of Key Sampling Points[J]. *Geomatics and Information Science*

of Wuhan University, 2024, 49(10): 1831-1845.

[17] 宣伟, 花向红, 邹进贵, 等. 自适应最优邻域尺寸选择的点云法向量估计方法[J]. 测绘科学, 2019, 44(10): 101-108.
XUAN Wei, HUA Xianghong, ZOU Jingui, et al. A New Method of Normal Estimation for Point Cloud Based on Adaptive Optimal Neighborhoods [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(10): 101-108.

[18] 冯林, 李斌兵. 一种基于最小广义方差估计的TLS点云抗差法向量求解方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(11): 1647-1653.
FENG Lin, LI Binbing. A Robust Normal Estimation Method for Terrestrial Laser Scanning Point Cloud Based on Minimum Covariance Determinant [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(11): 1647-1653.

[19] 麻卫峰, 王金亮, 张建鹏, 等. 一种改进法向量估算的点云特征提取[J]. 测绘科学, 2021, 46(11): 84-90.
MA Weifeng, WANG Jinliang, ZHANG Jianpeng, et al. Feature Extraction from Point Cloud Based on Improved Normal Vector[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(11): 84-90.

[20] 王海波, 游为, 范东明, 等. 利用ICA方法提取奥卡万戈三角洲水储量变化信号[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(1): 93-103.
WANG Haibo, YOU Wei, FAN Dongming, et al. Using ICA to Extract the Water Storage Variations Signals of the Okavango Delta[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 93-103.

[21] 杜浩, 朱俊锋, 张力, 等. 顾及地形特征的LiDAR点云数据抽稀算法[J]. 测绘科学, 2016, 41(9): 140-146.
DU Hao, ZHU Junfeng, ZHANG Li, et al. A Thinning Method of LiDAR Point Clouds Considering Terrain Features[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(9): 140-146.

[22] 王晞. DEM内插算法与精度评定研究[J]. 现代测绘, 2013, 36(5): 21-23.
WANG Xi. Research on Interpolation Algorithm and Accuracy Assessment of DEM[J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2013, 36(5): 21-23.