

# 基于三维 Delaunay 三角化的快速可视化方法

李春鑫<sup>1</sup> 彭认灿<sup>2</sup>

(海军大连舰艇学院测绘科学与技术博士后科研流动站 大连 116018)<sup>1</sup>

(海军大连舰艇学院海洋测绘系 大连 116018)<sup>2</sup>

**摘要** 随着数字海洋战略的深入发展,把不可见的海洋环境参数物理量转变为可见的形式,直观显示和描绘其中的内涵和规律是对计算机虚拟现实与可视化手段提出的迫切需求。针对海洋环境信息三维可视化的快速性问题,提出了一种基于模糊聚类分析和三维 Delaunay 三角化的大量数据可视化快速方法。该方法采用模糊 C 均值聚类分析对原始离散数据集进行预处理,得到需要的分类数据集,并提出了一种改进的三维 Delaunay 三角化快速算法,该算法通过建立点与点之间的相对位置关系来进一步提高点的定位速度,同时给出了生成新四面体的优化处理方法,从而在大量三维离散点集中快速构建三维曲面,最后采取颜色法进行可视化,并将该方法应用于海洋温度场的三维可视化。通过对某海域温度数据的多组可视化仿真实验的比较与分析,验证了提出方法的快速性和有效性。

**关键词** 模糊聚类, 三维 Delaunay 三角化, 可视化

中图分类号 TP391 文献标识码 A

## Rapid Visualization Method Based on 3D Delaunay Triangulation

LI Chun-xin<sup>1</sup> PENG Ren-can<sup>2</sup>

(Postdoctoral Programme of Surveying and Mapping, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)<sup>1</sup>

(Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)<sup>2</sup>

**Abstract** With the rapid development of digital ocean, there are higher demands for the virtual of true feeling environments and the reveal of the rules hidden in massive marine data. In order to know the variation of seawater information intuitively, a rapid visualization method based on fuzzy clustering and 3D Delaunay triangulation was proposed, and it is utilized to visualize marine temperature. In the method, fuzzy clustering is used to attain isothermal dataset, and an efficient 3D Delaunay algorithm which improves the speed by establishing relative relationship of nodes and optimizing the new tetrahedral construction is applied to construct 3D surface from the large scale isothermal dataset. Besides, the color model is adopted to visualize the surface. Experimental results illustrate that the method can visualize marine temperature efficiently, and vector field visualization will be researched based on the presented method in the near future.

**Keywords** Fuzzy clustering, 3D Delaunay triangulation, Visualization

近年来,三维 Delaunay 三角化方法由于具有完整的理论基础和较好的实践效果,得到了广泛的研究和应用<sup>[1-4]</sup>。Bowyer<sup>[5]</sup>和 Watson<sup>[6]</sup>将 Delaunay 三角化推广到多维,并出现了一些利用 Delaunay 三角化构建表面的方法;Edelsbrunner<sup>[7]</sup>提出了  $\alpha$ -shape 算法,以  $\alpha$  球界定 Delaunay 三角化后的凸包,删除包围球半径大于  $\alpha$  的四面体,但该算法很难事先估计合适的  $\alpha$  半径;Chaine<sup>[8]</sup>提出的 SHRINK 算法构造一个伪表面,该伪表面从空间三维点集的 Delaunay 三角化闭包开始收缩,可以得到很好的闭合曲面,但在非闭合曲面时效果不理想,而且该算法需要输入合适的孔洞系数,很难进行事先估计;陈定造等<sup>[9]</sup>提出的三维 Delaunay 三角剖分快速点定位算法,对 Escobar<sup>[10]</sup>的点定位算法进行了优化,提高了运行效率,但该算法还是需要法向一致化调整及相应计算。

标准的三维 Delaunay 剖分只是在当对象为简单凸体时比较完善,而对于经常遇到的复杂受限的数据场剖分还存在

一些问题,例如点集中存在 5 点共球的情况,其剖分结果是不唯一的<sup>[11]</sup>。此外,逐点插入的三角化方法虽然简单易实现,对内存消耗较少,但对大数据量处理速度很慢。在面向大量多维数据时,影响 Delaunay 逐点插入算法速度的主要因素是包含插入点四面体单元的查找和生成四面体的优化处理。因此,本文针对标准的三维 Delaunay 三角化算法的缺陷,研究利用模糊聚类分析首先将原始数据进行分类得到需要的数据集,进而采用一种改进的三维 Delaunay 三角化快速算法构建表面,并对构建的三维曲面进行渲染着色,并将其应用于海水温度场大量数据的快速三维可视化。

### 1 三维可视化快速方法

#### 1.1 模糊 C 均值聚类

数据集的划分实质上是一个聚类的过程,而聚类<sup>[12]</sup>是一种无监督的学习过程,近年来已广泛应用到数据的组织与分

本文受中国博士后科学基金项目(2014M552659)资助。

李春鑫(1980—),男,博士后,工程师,主要研究方向为海洋环境信息三维可视化技术、视频目标跟踪技术等,E-mail:993088210@qq.com。

类、数据压缩以及模型构造等多领域。C 均值算法是一种硬分类的方法,但通常类与类之间的界限是模糊的,因而产生了模糊 C 均值聚类<sup>[13]</sup>(FCM),FCM 用值在(0,1)之间的隶属度来确定每个给定数据点属于各个组的程度。

设  $\{x_i, i=1, 2, \dots, n\}$  为  $n$  个样本组成的样本集合,  $c$  为预定的类别数目,  $m_j (j=1, 2, \dots, c)$  为每个聚类的中心,  $\mu_j(x_i)$  是第  $i$  个样本对于第  $j$  类的隶属度函数,  $b$  是设定控制聚类结果模糊程度的参数 ( $b > 1$ ), 则模糊 C 均值算法为:

$$\sum_{j=1}^c \mu_j(x_i) = 1 \quad (1)$$

$$m_j = \frac{\sum_{i=1}^n [\mu_j(x_i)]^b x_i}{\sum_{i=1}^n [\mu_j(x_i)]^b} \quad (2)$$

$$\mu_j(x_i) = \frac{(1/\|x_i - m_j\|^2)^{1/(b-1)}}{\sum_{k=1}^c (1/\|x_i - m_k\|^2)^{1/(b-1)}} \quad (3)$$

用迭代方法求解式(2)和式(3)即可,利用该算法对海洋环境信息数据进行预处理可以得到需要的分类数据集。

### 1.2 改进三维 Delaunay 三角化算法

三维 Delaunay 三角化(又称为 Delaunay 四面体化)<sup>[14,15]</sup>采用“空球规则”使每个划分成的四面体各顶点的外接球内不含有点集中的任一点,这样各场值点对整个场分布的影响具有局部化、均匀化的特点。其三角化方法可分为逐点插入法、三角网生长算法和分治算法等,其中逐点插入法是比较适合空间三维数据场三角化的稳定性算法。但标准的 Delaunay 三维剖分对于点集中有 5 点共球的情况剖分结果不唯一,而且会影响逐点插入算法速度,这主要有两个因素:1)包含插入点四面体单元的查找;2)新生成四面体的优化处理。因此,这里针对标准算法存在的缺陷进行改进,进而提高算法的性能。

查找包含插入点的四面体单元主要是通过路径算法<sup>[16]</sup>定位待插入点在当前网格中的位置。首先要选择起始单元,起始单元的位置决定搜索路径的长度,搜索路径的长度影响查找速度。因此,选择恰当的起始单元,可以在三维空间中尽快找到待插入点的位置,提高算法的效率。对于通过模糊聚类得到的分类数据集,先在空间中建立可以包含所有待插入点的背景网格,然后根据点集中每个点的坐标,将其存储到相应的背景网格中,建立点与点之间的相对位置关系,从而在线性时间内可以查找到每个点附近的其他待插入点。为了便于表达,以二维为例,如图 1 所示。当插入点  $p$  时,通过背景网格找出  $p$  点附近的其他待插入点,按由近及远的顺序查找,直到发现已经插入网格内的点为止。以与这一点相连的单元作为起始单元,应用路径算法则可以缩短查找路径长度,进而提高算法的速度。

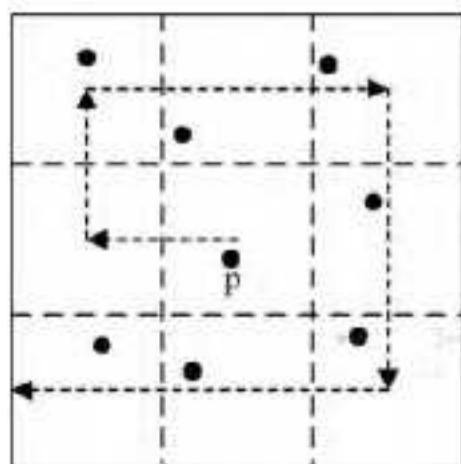


图 1 分类数据集的背景网格图

对于新生成四面体的优化处理,我们采用如下方法:设  $T_{i-1}$  为前  $i-1$  个点形成的 Delaunay 三角化子集,对于  $T_{i-1}$  的一个边界面  $\Gamma$ ,取点  $p$  为以  $\Gamma$  为边界面的四面体内部的一点,

若第  $i$  个点和  $p$  点位于边界面  $\Gamma$  的异侧,并且满足第  $i$  个点位于前  $i-1$  个点组成的凸多边形之外,则将第  $i$  个点与该边界面形成新的四面体,这样就可以将第  $i$  个点加入到前  $i-1$  个点集之中。如果在第  $i$  个点加入到前  $i-1$  个点形成的四面体子集过程之中存在 5 点共球的情况,则局部改变有共同边界面的两个四面体顶点的拓扑连接关系,进而消除五点共球的情形,这样就完成了前  $i$  个点的三角化组合。依此类推,便可完成点集中所有点的三维 Delaunay 三角化。

### 1.3 可视化算法步骤

以海水温度数据集为例,本文提出的三维可视化算法总体思路主要分为以下 3 步:(1)利用模糊 C 均值聚类对原始数据进行预处理得到等温数据集;(2)采用三维 Delaunay 改进算法快速构建三维等温曲面;(3)采取颜色法对三维等温曲面进行着色可视化显示。

详细算法步骤如下:

Step 1 利用模糊 C 均值对数据进行聚类提取等温面数据。

- (1) 确定隶属度范围和分类的个数范围以及划分准则;
- (2) 遍历所有原始数据确定满足划分准则的隶属度和等温面个数,进而得到等温数据集。

Step 2 采用三维 Delaunay 快速算法得到需要的等温曲面。

- (1) 对于某等温面的离散三维点集,定义一个包含所有节点的凸壳;
- (2) 向凸壳中引入一节点,按照第 1.2 节中给出的对于包含插入点四面体单元的快速查找算法,选择合适的起始单元,根据“空球规则”删除不符合规则的四面体单元;
- (3) 将该节点与表面的三角形构成新单元,按照第 1.2 节中给出的方法对生成的四面体进行优化处理;
- (4) 对于下一节点重复步骤(2)和(3)直至所有节点插入完毕;

(5) 对于下一个等温面的数据重复步骤(1)至(4)直至遍历完所有的等温面数据集。

Step 3 添加三角形定点颜色绘制等温面。

- (1) 建立海水温度值与颜色的对应关系,以色相代表等温面的值,用亮度代表等温面的浮动变化;
- (2) 采用 OpenGL 绘制等温面进行三维可视化展示。

## 2 仿真测试与分析

为了验证算法的性能,我们采用多组实验进行仿真比较与分析。实验条件为 Intel Core 2 Duo CPU P8700 2.53GHz,内存为 1.93GB,显卡为 ATI Radeon HD 3450 512MB, Microsoft Windows XP Professional 操作系统的 PC 机。

为了测试提出的方法快速处理数据的能力,这里分别采用经典的三维 Delaunay 三角化方法和本文提出的方法依次对上万和上百万数据进行仿真测试,两种方法主要步骤的计算量对比分析如表 1 所列。这里重点考察点定位和优化处理的计算量,从表中可以清楚地看到,经典方法计算量主要集中在这两步,而且随着节点数目的增多,点定位计算量比重增大,而本文方法这两步的计算量总和几乎仅占整个计算量的一半,其中点定位算法所占的计算量比重很小,而且随着节点

(下转第 248 页)

[16] Luo Tie, Tan Hwee Pink, Quan P C, et al. Enhancing responsiveness and scalability for OpenFlow networks via control-message quenching[C]// 2012 International Conference on CT Convergence(CTC). 2012;348-353

[17] Xia Weng-feng, Wen Yong-gang, Heng F C, et al. A Survey on Software-defined Networking[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 17(1): 27-51

[18] Tootoochian A, Ganjali Y. HyperFlow: A distributed control plane for OpenFlow[C]// Proceeding of the 2010 Internet Network Management Workshop on Research on Enterprise Networking(INM/WREN) USENIX Association, 2010

[19] Koponen T, Casado M, Gude N, et al. Onix: A distributed control platform for large-scale production networks[C]// Proceeding of the 9th USENIX Conf. on Operating Systems Design and Implementation(OSDI). Vancouver; USENIX Association, 2010

[20] Yeganeh S H, Ganjali Y. Kandoo: a framework for efficient and scalable offloading of control applications[C]// Proceedings of the First Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks, ser. (HotSDN'12). New York, NY, USA; ACM, 2012; 19-24

[21] Kanizo Y, Hay D, Keslassy I. Palette: Distributing tables in software-defined networks[C]// Proceedings of 2013 INFOCOM. Turin, Italy; IEEE, 2013; 545-549

[22] 左青云, 陈鸣, 赵广松, 等. 基于 OpenFlow 的 SDN 技术研究[J]. 软件学报, 2013, 24(5): 1078-1097

[23] Voellmy A, Wang J. Scalable Software Defined Network Controllers[C]// Proceedings of the ACM SIGCOMM 2012 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. New York, NY, USA; ACM, 2012; 289-290

(上接第 237 页)

数目的增多,其比重也没有明显增加,这是因为按照空间距离由近及远的顺序查找。

表 1 两种方法计算量对比分析表

节点数量	经典方法主要步骤 计算量比重(%)			本文方法主要步骤 计算量比重(%)		
	点定位	优化处理	其他	点定位	优化处理	其他
	$1.0 \times 10^4$	20.5	40.3	39.2	6.1	45.3
$1.0 \times 10^6$	33.9	32.6	33.5	7.0	43.2	49.8

为了进一步测试本文提出的方法处理大规模数据的性能,对某海域三月份和五月份的海水温度大量数据集分别进行温度场三维可视化仿真测试,并对温度场的三维可视化纵向截面进行切片展示,实验结果如图 2 所示。本文方法单元生成的平均速度可达到 12.9 万单元每秒。图中不同的颜色代表海水不同的温度,从中可以很清楚直观地了解 and 掌握整个海域内温度随深度变换和季节变化的详细情况。

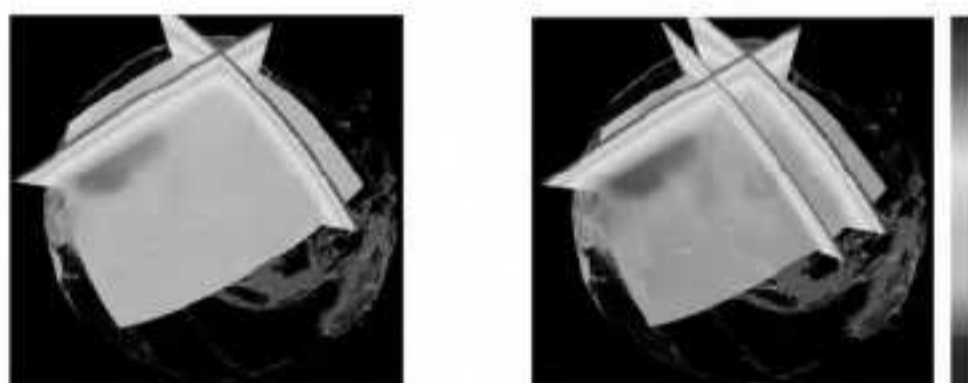


图 2 某海域不同月份温度场三维可视化仿真结果

**结束语** 本文对海洋环境信息三维可视化快速方法进行了研究,采用模糊 C 均值聚类对原始数据进行预处理得到需要的分类数据集,并提出一种改进的三维 Delaunay 算法快速构建三维曲面,最后采取颜色法对三维曲面进行可视化,并采用该方法对海水温度数据进行了三维可视化,使我们能够清楚直观地了解海水温度的变化情况,该方法同样可以推广到海水盐度场的三维可视化。需要说明的是,本文主要是研究大量数据的快速可视化问题,直接对原始数据提取等温面一定程度上会影响精度,但我们是通过对大量数据进行处理为前提,保证了足够的密度。下一步将在此基础上进一步研究海水潮流、海流等矢量场的快速三维可视化问题。

### 参 考 文 献

[1] Liu J, Chen B, Chen Y. Boundary Recovery after 3D Delaunay

Tetrahedralization without Adding Extra Nodes[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 72: 744-756

[2] Si H. Constrained Delaunay Tetrahedral Mesh Generation and Refinement [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2010, 46: 33-46

[3] 李水乡, 陈斌, 赵亮, 等. 快速 Delaunay 逐点插入网格生成算法[J]. 北京大学学报, 2007, 43(3): 302-306

[4] Thompson K E. Fast and Robust Delaunay Tessellation in Periodic Domains[J]. Int J Numer Methods Eng, 2002, 55(11): 1345-1366

[5] Bowyer A. Computing Dirichlet tessellations[J]. The Computer Journal, 1981, 24(2): 162-166

[6] Watson D F. Computing the N-dimensional Delaunay Tessellation with Application to Voronoi Polytopes[J]. The Computer Journal, 1981, 24(2): 167-172

[7] Edelsbrunner H, Mucke E P. Three-dimensional Alpha Shapes [J]. ACM Transaction on Graphics, 1994, 13(1): 43-72

[8] Chaine R. A Geometric Convection Approach of 3-D Reconstruction[C]// Eurographics Symposium on Geometry Processing. 2003

[9] 陈定造, 林奕新, 刘东峰. 三维 Delaunay 三角剖分快速点定位算法研究[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(5): 79-80

[10] Escobar J M, Montenegro R. Several Aspects of Three-Dimensional Delaunay Triangulation [J]. Advances in Engineering Software, 1996, 27(1/2): 27-39

[11] 李强. 三维 Delaunay 剖分在 3D GIS 中的应用[J]. 三晋测绘, 2002, 3(1): 14-16

[12] 高新波, 谢维信. 模糊聚类理论发展及应用的研究进展[J]. 科学通报, 1999, 44(21): 2241-2251

[13] 汤兵勇, 路林吉. 模糊控制理论与应用技术[M]. 清华大学出版社, 2002. 9

[14] Zhu Q, Hu M Y, Zhang Y T, et al. Research and Practice in Three-dimensional City Modeling [J]. Geospatial Information Science, 2009, 12(1): 18-24

[15] 詹芳芳, 胡伟, 袁国栋. 二维 LIC 矢量场可视化算法的研究及改进[J]. 计算机科学, 2013, 40(19): 257-261

[16] Lorensen W E, Cline H E. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm [J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 163-169