

体绘制技术在地学 3D GIS 可视化中的应用研究

徐绘宏, 潘懋*

(北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 体绘制技术是目前科学计算可视化研究的一个重要组成部分, 对地质体内部属性分布的可视化有重要意义。该文针对地学研究中几何建模和属性建模同样重要的特点, 基于一种矢栅一体化的混合数据模型, 对地质体表面采用三角面片描述几何形状, 对地质体内部采用基于八叉树的自适应网格剖分技术描述内部属性特征。对网格剖分后的体数据, 采用体元投射的体绘制技术进行地质体内部属性可视化, 显示出很好的效果, 具有实际应用意义。

关键词: 三维地理信息系统; 八叉树; 网格剖分; 体绘制

中图分类号: P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-0504(2005)02-0006-04

三维地理信息系统(3D GIS)是当前 GIS 发展的一个热点。其中的关键问题包括: 三维数据生成、三维数据模型、三维数据的组织和管理、三维空间分析和三维可视化^[1]。3D GIS 在地学中有重要的应用需求和应用前景, 其中三维可视化在地学数据中起着重要作用。地学数据丰富多样, 数据量大, 具有真三维的数据特征, 过去常用数值方式或二维平面图形方式表达, 不利于地质工作者直观地认识和分析地下地质构造特征; 现在通过三维可视化技术, 可以将大量的三维数据以三维图形、图像的方式逼真、直观地表达出来, 易为研究人员理解和分析^[2]。

随着计算机软硬件的发展及科学计算可视化方法的逐步提高和完善, 可视化技术逐渐向各个学科渗透, 存在广阔的应用前景, 其中三维地学数据可视化成为一个重要应用领域。科学计算可视化是研究如何把计算数据、测量数据、从卫星传送回来的图像、医学 CT 和 MRI 数据或地震勘探数据转换成可视的、能够帮助领域专家理解的信息, 为高效处理和解释科学数据提供有力的工具。体可视化主要是针对体数据的一种科学计算可视化方法, 它的重要特点是能显示物体内部复杂结构, 也是目前科学计算可视化研究的主要方向。利用科学计算可视化技术不仅丰富了体现数据的手段, 而且为方法解释提供了依据, 使人们更清晰地模拟研究对象, 将视线深入到无法到达的地球内部和远古的地质时代^[3]。

真三维的数据模型是空间分析和三维可视化的基础, 在 3D GIS 研究中, 常见的数据模型有基于表面的、基于栅格的和混合数据模型^[4], 目前还没有被广泛认可的、统一的数据模型。本文基于一种矢栅

格一体化的数据模型, 采用体视化技术显示地质体内部属性, 进行体视化在地学 3D GIS 中的应用研究。

1 体绘制技术简介

科学计算可视化技术是在计算机图形学基础上发展起来的崭新领域, 它的一个突破性进展便是体绘制技术的出现。体视化技术研究包含物体内部信息的体数据的表示、处理分析、操作、物体重建和显示等内容, 它的任务就是揭示物体内部的复杂结构^[5]。体绘制是将三维体数据可视化, 它与传统计算机图形学的主要差异在于: 1) 传统计算机图形学以面、边等边界基元来描述物体, 不包含任何内部信息; 体绘制技术不通过几何造型等其它的中间转换手段, 即它的处理对象不再是曲线、曲面等几何元, 而是以三维基元(体素)来描述整个物体, 它包含物体内外的全部信息, 由此导致对物体的处理、操作、变换、分析和显示方法的截然不同^[3]。2) 传统计算机图形学只能体现三维形体表面的效果, 而不能揭示三维数据的内部变化规律, 虽然可以通过切片技术、剖面技术等来观察数据体的内部潜在特征, 但其反映的信息量有限。体绘制技术直接对一个三维标量场或矢量场进行操作, 不仅克服了由传统方法的中间过程带来的误差, 还通过给数据体赋以不同的不透明度值来观察数据体的内部。

在体视化中, 体数据的获取主要有两种途径: 1) 仪器探测或数值模拟; 2) 函数表达或面片表达的几何模型经过体素化转换而成。与体素化相反的过程是物体三维重建, 它是从体数据中抽取出物体的表面。体素化和物体重建是实现离散体数据表示与连

收稿日期: 2004-12-14; 修订日期: 2005-02-17

作者简介: 徐绘宏(1978-), 男, 博士研究生, 研究方向为 GIS 和三维可视化。*通讯作者 E-mail: panmao@pku.edu.cn
©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

续几何表示的两个互逆过程, 它们是将体视化和传统计算机图形学连接起来的纽带。对体数据进行显示有两种基本方法: 基于表面重建的显示和基于体素的显示或直接体视, 最终都将生成一个显示图像^[6]。其主要过程如图1所示。

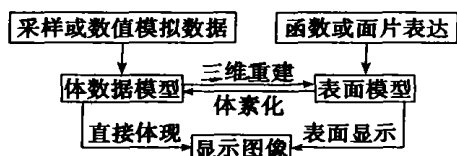


图1 体视化的主要过程

Fig. 1 The main pipeline of volume visualization

2 地学 3D GIS 可视化系统框架

在地质中存在大量的三维体数据, 地质现象(地质体)极其复杂, 虽然其成因、规模、形态结构差别较大, 但从几何学的观点来看, 各种地质体的构造都可以归纳为面状构造、线状构造和体构造。地质体是一个三维实体, 其表面为不规则曲面, 且内部地质属性分布不均匀, 地质的外形可以用一个不规则的封闭曲面来确定。作为表达三维地质现象的三维可视化系统, 其主要考虑的地质现象为采样点、地层、断裂和地质体。其中, 地质体可视化建模包括几何建模和属性建模^[7, 8]。

地质体的表面模型可以用连续参数曲面(如 Bezier、NURBS 或 Coons 曲面)或不连续的片平面(三角片、矩形片或三角与矩形片混合式)构成网状曲面(Mesh-geometry), 用网状曲面技术可以较好地表达生成的三维地质体表面模型。地质体属性建模是指对地质体内部不均质性的表述。一般通过采样点和插值的方法得到体内的属性描述。常用基于三维栅格的数据模型来表达地质体内部属性的不均一性。

早期的体可视化方法是从体数据中提取曲线、曲面信息, 再通过传统的显示方法加以显示, 即通过几何单元拼接拟合物体表面来描述地质三维结构, 这种体数据绘制方法通常称为表面绘制方法。但这种方法只能表达物体的外轮廓, 不能深入表达物体内部组成和结构^[9]。本文设计的 3D GIS 可视化系统框架如图2, 它结合了体绘制和传统面绘制的特点, 将主要地质现象抽象为点、线、面和体, 定义相应的文件格式, 作为数据输入; 针对数据进行可视化建模; 将几何和属性数据统一组织和管理; 根据不同的数据特点采用不同的绘制方法, 如表面模型用表面绘制方法, 地质体内部属性可视化用体绘制方法, 同

时也提供了三维交互的工具和实时与真实感控制。

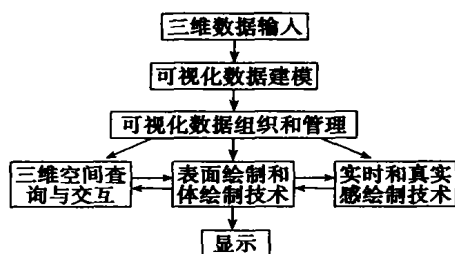


图2 系统基本框架

Fig. 2 The basic framework of the system

3 基于矢栅一体化数据模型的体绘制

3D GIS 研究的关键问题之一是三维数据模型, 它是三维空间分析和可视化的基础。三维数据模型分为: 基于表面的数据模型、基于体的数据模型和混合数据模型。本文提出的矢栅一体化数据模型属于混合数据模型的一种, 同时表达地质体的几何形态和内部属性分布, 后者的表达采用一种基于八叉树的自适应笛卡儿网格剖分技术来完成。这种技术针对被剖分空间的特征, 在需要高精度描述的空间区域采用高分辨率网格剖分, 在使用低精度描述就可以满足要求的空间区域采用低分辨率网格剖分。

笛卡儿网格是 CFD 计算中最早使用, 也是最易生成的一种网格, 它不同于传统的贴体网格, 笛卡儿网格中的单元基本按照笛卡儿坐标方向(X, Y, Z)排列, 流场可采用有限体积法进行模拟, 在与模型表面相交的单元处需要给出特殊的处理, 为此, 必须准确计算和判断网格单元与模型表面的相交情况^[10]。

笛卡儿网格虽然在数据交换、数据结构、空间网格生成等方面有优势, 但它在生成贴近物面的一层网格(物面层网格)时却需要做大量的工作, 换言之, 在编制笛卡儿网格生成程序时, 以处理物面层网格的复杂性、多样性替代了分区结构网格中网格拓扑结构的复杂性、多样性。但一个非常重要的结果是它可以实现网格生成的自动化。因此, 近年来笛卡儿网格生成方法受到重视, 有了快速的发展。

自适应笛卡儿网格主要有两种方法达到准确模拟外形的目的: 早期在原始的均匀笛卡儿网格基础上根据几何外形特点或流场特点在局部区域内不断进行网格细化, 得到符合精度要求、分布最理想的非均匀笛卡儿网格; 后来采用求交切割的方法, 该方法产生的物面层网格具有任意形状, 且网格单元很小。

本文在 3D GIS 矢栅一体化数据模型中应用自适应笛卡儿网格方法与在流体力学中的不同点是: 在生成围绕物体的网格后, 物体的几何外形将从一

部分网格中被“切割”出来,从而产生一个围绕着物体的不规则多面体的边界,完成网格的分类。与多边形相交的是物面网格,完全处于几何外形中的网格称为固体网格,其它在计算区域中的为流场网格。在流场计算中,要删除固体网格。本文针对固体网格,采用八叉树数据结构,根据属性分布的变化进行自顶向下的自适应八叉树网格剖分,实现对地质体内部属性的建模。

该一体化数据模型的主要优点是:用三角面片表达的网状曲面来表达地质体的几何形状,用八叉树数据针对地下属性分布的特点自适应剖分,数据量比三维规则网格剖分大大减少。在实现时,对物面网格同时采用网格细化和求交切割的方法。在求交切割中,采用不规则体元来填充剖分八叉树和表面模型之间的空隙,将不规则体元剖分成四面体格网,完成网格的自适应剖分。本文重点对网格细化后的八叉树体数据进行可视化体绘制研究和实现。

直接体绘制主要方法有基于图像空间、对象空间和频域空间^[11,12],研究比较多、比较成熟的是针对三维规则格网的体数据可视化^[13-15]。基于频域空间算法的体绘制方法绘制效果不理想,还没有应用到实际中;基于图像空间的光线投射算法成像质量好,但成像耗时间长。体元投射算法是一种对象空间的体绘制方法,适合体数据比较稀疏、体元较大的情况,效率也比较高。因此,针对自适应网格体数据,本文采用基于体元投射的方法对自适应网格数据进行体绘制。算法流程如下:

(1)数据值的分类和赋值。根据体元不同属性赋予不同的颜色值和不透明度值。

(2)体元投射。将三维体数据经过图像变换投影到二维屏幕。

OpenGL 是一个开放的针对图形硬件的三维图形软件包,是三维图形领域的工业标准,它包含 120 多个图形函数,这些函数实现了七大功能:建模、变换、颜色模式设置、光照设置、材质设置、纹理设置、位图。OpenGL 简化了常规的三维部分的编程,一般操作(如消隐、光照处理等)只需调用 OpenGL 的 API 函数即可。用 OpenGL 来实现三维显示,具有简单、直观、效率高的特点。本文利用 OpenGL 提供的函数帮助完成投影和图像合成。

体元投射的几何模型:在本文的算法中,体元指的是一个长方体区域,该区域的属性均匀唯一。三维空间数据场由大小和形状不同的体元构成。当一个长方体体元向图像一平面投影时,由于观察的方

位不同,可能有 1~3 个面可见。如图 3 和图 4,每个相同大小体元的平行投影在几何上都一样,只不过是平移距离不同而已。不同大小体元的投影可以通过一定的放缩变换得到^[16-18]。

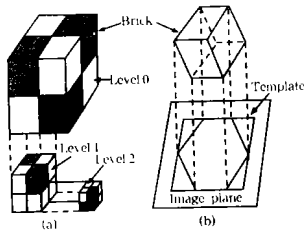


图 3 八叉树体元投影
Fig.3 The cell projection of octree

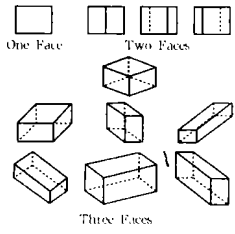


图 4 体元投射的几何模型
Fig.4 The cell projection models

体元的处理顺序:体绘制技术之所以难以实现实时绘制,主要原因在于当观察方向变化后,数据场采样点之间的前后关系也相应发生变化,导致重采样及图像合成的计算需要重新进行。八叉树基于树的层次组织结构方法具有将观察方向按照八个象限来划分的特点,同时可以很方便地将数据按从前到后或从后到前的方式遍历。在实现中,由于对称性,只需要存储四组结点链表数据(图 5)。为了快速显示,采用事先提取八叉树结点的方法。

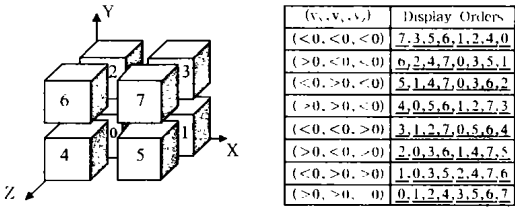


图 5 八叉树的体可视化方法
Fig.5 The volume visualization method of octree

计算每个体元对屏幕像素的贡献:体元投射的几何模型确定后,一个体元将分解为几个子体元,需要计算每个子体元对屏幕像素的贡献。在求出每个子体元投影多边形顶点处的颜色值和不透明度值后,还要求出投影多边形内每个像素点处的颜色值和不透明度值。本文采用多边形填充的方法,利用二维平面上的两次线性插值代替复杂的三维空间离散点的重采样,实践效果很好。

(3)图像合成。将投影的体元按照从前到后或从后到前的顺序合成。Alpha 通道是指加在 24 位真彩色图像上的另外 8 位信息,它用来描述不同的透明度数值。当一幅图像叠合在另一幅图像上时,两幅图像的 Alpha 信息便决定了如何将第二幅图像的像素混合到第一幅图像上,最后每个像素将产生一个新的颜色。被遮挡的物体为源物体,不被遮挡的物体为目标物体,两个物体的融合就是目标物体与源物体颜色组合产生新颜色的过程。OpenGL 中的

函数 `glBlendFunc()` 提供了不同的融合方法, 用源因子乘以源物体的颜色值, 再用目标因子乘以目标物体的颜色值, 最后进行叠加。设融合的源因子为 (R_s, G_s, B_s, A_s) , 融合的目标因子为 (R_d, G_d, B_d, A_d) , 源物体的颜色为 (S_r, S_g, S_b, S_a) , 目标物体在同一像素点的颜色为 (D_r, D_g, D_b, D_a) , 则最后融合的颜色为: $(R_s S_r + R_d D_r, G_s S_g + G_d D_g, B_s S_b + B_d D_b, A_s S_a + A_d D_a)$, 经过归一化处理, 使颜色的各分量在 $[0, 0, 1, 0]$ 区间。本文采用 `glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA)` 实现融合。

4 实验结果

算法在 Windows 2000 平台上应用 Visual 6.0 和 OpenGL 来实现。系统配置: CPU 为 AMD 1.83 G, 内存 512 M, 显卡 GeForce 5900。本文采用自适应网格算法, 按属性分布特征(考虑地质体几何特征)采用自顶向下八叉树分解的方法将地质体分割成不同大小的体元集合。采用网格细化的八叉树剖分方法得到体数据, 当剖分精度为 $32 * 32 * 32$ 时, 空间开销为 8 550 * 4 个体元, 绘制时间为 0.048375 s; 当剖分精度为 $128 * 128 * 128$ 时, 空间开销为 149 525 * 4 个体元, 绘制时间为 1.058399 s。

参考文献:

- [1] STOTER J, ZLATANOVA S. 3D GIS, where are we standing[A]. Joint Workshop on Spatial, Temporal and Multi-Dimensional Data Modelling and Analysis[C]. 2003.
- [2] 刘学锋, 孟令奎, 赵春宇, 等. 基于 GIS 的地质图三维可视化表达及其地质意义[J]. 测绘学报, 2003(3): 59—61.
- [3] 于万瑞, 李春华, 徐宝慈, 等. 地球物理科学计算可视化应用系

统的开发[J]. 物探化探计算技术, 1998, 20(3): 222—225.

- [4] 王继周, 李成名, 林宗坚. 三维 GIS 的基本问题与研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2003, 24: 40—44.
- [5] 朱响斌, 唐敏, 董金祥. 一种基于八叉树的三维实体内部可视化技术[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7A(3): 229—233.
- [6] 戴光明, 李庆华. 三维体可视化若干问题研究[J]. 计算机工程, 2002, 28(7): 48—49.
- [7] 郑贵洲, 申永利. 地质特征三维分析及三维地质模拟现状研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(2): 218—222.
- [8] 胡金星, 吴立新, 高卫贞, 等. 三维地质模拟体可视化技术的应用研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(4): 345—349.
- [9] 朱跃龙, 李强, 张希伟. GIS 三维可视化系统的设计与实现[J]. 计算机工程, 2003, 29(10): 142—144.
- [10] 桑为民, 李凤蔚, 鄂秦. 三维直角叉树切割网格 Euler 方程自适应算法[J]. 空气动力学学报, 2002, 20(4): 394—401.
- [11] 唐泽圣. 三维数据场可视化[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [12] 管伟光. 体可视化技术及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [13] 许寒, 刘希顺. 三维空间规则数据场体可视化系统设计[J]. 计算机应用研究, 2003(1): 96—98.
- [14] 贾艾晨, 韩国城, 魏小鹏. 大坝地震反应数据场快速体绘制算法[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8A(4): 472.
- [15] 彭延军, 石教英. 体绘制技术在医学可视化中的新发展[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7A(12): 1239—1246.
- [16] ROETTGER S, ERTL T. Cell projection of convex polyhedra[A]. Proceedings of the 2003 Eurographics/IEEE TVCG Workshop on Volume Graphics 03[C]. 2003, 103—107.
- [17] GRIMM S, BRUCKNER S, KANITSAR A, et al. Memory efficient acceleration structures and techniques for CPU-based volume raycasting of large data[A]. Proceedings of IEEE/SIGGRAPH Symposium on Volume Visualization and Graphics 2004[C]. 2004, 1—8.
- [18] WILHELMS J, GELDER A V. A coherent projection approach for direct volume rendering[A]. Proceedings of ACM SIGGRAPH 91[C]. 1991, 275—284.

The Application Study of Volume Rendering in the Visualization of 3D GIS for Geology

XU Hui-hong PAN Mao

(School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The research of 3D GIS includes some basic and important issues, such as data creating and preparing, data model, data organization, data visualization and three dimensional space analyses. Among them, the visualization for 3D GIS is a hot research area. The scientific computing visualization has been broadly used in the field of geology and the technique of volume rendering is an important component of current scientific computing visualization research. This new technique can help people understand the inner attribute distribution of the underground geological objects by the means of visualization. So this article adopts a new hybrid data model that integrates both the vector and raster model, and takes the advantage of volume rendering technique to do the research of 3D GIS visualization. The hybrid data model takes consideration of the characteristics of geometry modeling and attribute modeling in geology. In the implementation, the triangular faces are used to model the geometry and the octree-based adaptive meshing refinement technique is used to model the inner attribute of the geological objects. For the meshing data, the authors analyze the most frequently used volume rendering algorithms and adopt the algorithm named cell projection to visualize the inner attribute. The result shows considerably good imaging and high efficiency. In the performance test, a single geological object is decomposed at the resolution of $32 * 32 * 32$ and $128 * 128 * 128$ respectively, which accordingly cost 0.048375 and 1.058399 seconds. The result shows great practical application value.

Key words: 3D GIS; octree; mesh refinement; volume rendering