

体绘制技术

洪 歧^{1,2}, 张树生¹, 王 静¹, 刘雪梅¹

(1. 西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 陕西 西安 710072; 2. 陕西理工学院 数学与计算机科学系, 陕西 汉中 723001)

摘 要: 可视化技术是继计算、实验两大科学研究方法之后的第三种研究方法, 体绘制技术作为可视化技术的一个重要分支, 已经取得长足发展。对常用体绘制技术进行了分类, 并且指出、分析了各自特点及适用场合, 为进一步应用、改进这些技术提供参考。

关键词: 体绘制; 面绘制; 步进立方体; 光线投射; 溅射

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1001-3695(2004)10-0016-03

Volume Rendering Techniques

HONG Qi^{1,2}, ZHANG Shu-sheng¹, WANG Jing¹, LIU Xue-mei¹

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Contemporary Design & Integrated Manufacturing Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shanxi 710072, China; 2. Dept. of Mathematics & Computer Science, Shanxi University of Technology, Hanzhong Shanxi 723001, China)

Abstract: There are three approaches to scientific research. Visualization is next to one of calculation and experimentation. Volume rendering techniques, as one important area of that, have made great progress during the last decade. In this paper, they are classified and their characteristics and applications are analysed. Results are useful for further employing and improving them.

Key words: Volume Rendering; Surface Rendering; Marching Cubes; Ray Casting; Splatting

可视化是一个快速成长的研究领域, 它是有关帮助科学家和工程师从模拟、实验或测量所得结果中抽取有意义和可视信息各种技术。体绘制是可视化最活跃的研究子领域之一, 它处理定义在三维或更高维网格上的标量和向量数据。十多年来, 在广大科研人员的努力下, 已经发展了一些体绘制技术来分析、理解和绘制数据场中包含的物体, 并且已在医学、无损评价(Non-Destructive Evaluation NDE)、天体物理、气象和地球物理测量及应力、液流等计算机模拟中得到广泛应用。由于受文章篇幅限制, 本文不能对现有全部体绘制技术进行分析, 只能就其主要技术的分类、特点及适用场合等问题展开讨论。

1 体绘制技术分类

根据 Foley 等人在文献[1]中提出的分类观点, 结合体绘制技术最新发展实际, 我们可以把大量的体绘制技术分为两大类: 面绘制(Surface Rendering)和直接体绘制(Direct Volume Rendering)。面绘制技术是从 3D 数据场中抽取有意义和直观信息的重要手段。它实际上是把体数据转换成一种逼近面表示, 从而可以进一步利用成熟的计算机图形学技术, 甚至已有的硬件加速技术完成感兴趣信息的提取。由于它借助于面表示这样一个中间转换过程, 而不是直接把体数据投向屏幕进行绘制, 有时我们又称之为间接体绘制(Indirect Volume Rendering)。直接体绘制技术是以某种方式将整个数据场半透明地投影到 2D 屏幕上, 并不借助中间几何图形。直接体绘

制又分为三种类型: ①物体空间为序算法^{2,3]}, 它们按预先确定的次序扫描体素或单元, 并把体素或单元投射到像素上; ②图像空间为序算法^{4,5]}, 扫描各像素并从数据场单元中累加像素色彩; ③混合算法^[6,7,22], 它是物体空间为序与图像空间为序算法的结合。图 1 给出了具体分类情况。

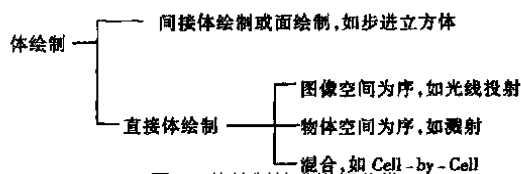


图 1 体绘制技术详细分类

2 面绘制技术及特点

面绘制技术利用了这样一个事实, 对科学家来说, 感兴趣的特征常常只包含在原始体数据的很小一部分里。通过恰当地识别含有特征的单元, 并用一组面片来近似表示它们, 有时在计算和空间上可以得到极大节省。面绘制技术有许多应用, 如在医学成像中, 特殊解剖结构可以用等值面表示, 也可以使用等值面产生算法抽取各种人体组织。目前, 下列几种面绘制技术已经得到发展:

(1) 立体沟纹模型(Cubenille)。这种方法实际上把整个单元看作由同一物质构成, 这样, 一个不透明单元可以用该单元的同一种色彩的六个面来表示(绘制)^[8,9]。该方法简单、快捷, 但画面粗糙, 显示图像给人一种“块状”感觉, 不能很好地显示对象的细节。

(2) 面跟踪算法(Surface Tracking)。这种方法利用了相邻

单元间等值面之间的相关性, 把某个包含等值面的单元作为一个种子, 根据单元某一面可能有向外伸展的等值面, 用一定的连接规则形成其余面^[10~12]。这种方法可以充分减少数据场的访问单元, 加快等值面绘制速度。

(3) 步进立方体 (Marching Cubes MC) 算法。与立体沟纹方法不同, 这种方法把单元看作由各向同性的物质构成, 显然, 这种假设在单元规模足够小时是成立的。在这种假设前提下, 根据单元各角点的值与用户指定的阈值, 就可以确定一个单元内有无与阈值相等的面 (即等值面) 通过, 若有, 可以通过沿该单元立方体棱两端角点的值做线性插值, 得到构成三角面片的顶点, 通过适当连接这些顶点就能得到逼近等值面的三角面片。对整个数据场逐个单元进行处理后, 就可以得到一个理想等值面的近似三角网格^[13]。

MC 方法的巧妙之处在于把离散的三维数据场表示转换为等值面的逼近三角面片表示, 从而, 可以利用成熟的计算机图形学技术及现有硬件加速技术完成等值面的近似表示。目前, MC 已经成为三维数据场面绘制的方法, 它具有简单、易实现、图像质量较高等优点。但是, 原始的 MC 方法也存在许多不足或有待改进的地方, 主要表现为:

① 大量三角面片的产生问题。一个包含有等值面的单元中的等值面, 可以由一个, 最多时可以由四个三角面片来逼近, 这样 MC 方法会产生大量三角形。随着三维数据场密度的不断提高, 三角形的数目也会随之增加, 这就面临着空间和时间两个问题, 如从一个典型的 $256 \times 256 \times 113$ 高分辨率数据场中构造的一个 3D 面, 要求 718 964 个三角形, 并且这些三角形要存储需要 25MB 内存 (每个三角形要求 36 个 Bytes); 另外, 大量的三角形意味着需要更多的时间来绘制, 对如此巨大的三角形即便使用最快的图形硬件加速技术也难以应对。因为这些问题, 把 MC 引入 3D 可视化中进行实时交互具有一定困难, 这在许多应用领域中, 如医学可视化, 是个严重问题^[14]。

② 空洞问题。在形成三角面片时, 多个顶点有可能有多于一种的不同连接方法, 这种情况一旦出现在相邻的两个单元共享面上, 如果我们不予以适当处理, 就会产生实际不应有的空洞 (Hole), 在展示小的或定义差的特征时尤其会这样^[19]。

③ 信息丢失问题。在 MC 算法中, 一种隐含假设是由悬浮在透明空气环境中的薄面构成的模型精确地表示原始体。数据常常来自包含几种不同物质的液状物质内部, 如果三维数据场被减少到仅仅为等值面, 那么, 出现在物质间分界面上的稀薄面及体性质的局部变化, 如光吸收和发射, 将被丢失。因为一个体素表示一个点样本, 在采样过程中, 关于微小面的准确位置和方向信息也可能被丢失, 并且希望能够恢复那些信息是不合理的。另外, 常常与面相交的立方体数目只占整个空间的 $30\% \sim 40\%$ ^[15], 这样, 数据场中相当数量的信息在一幅图像中不能表现出来。

④ 与体轮廓计算相关的问题。等值面只在指定的轮廓层上创建, 这样, 如果等值面的范围选得不好, 或者以太低频率进行采样, 可视化结果可能会引起误解。另外, MC 抽取等值面技术只绘制其值恰为阈值的一层薄面, 不能对存在于数据场中的噪声建模, 它们对这种噪声的高精度表示能引起视觉上的混乱^[19]。

⑤ 效率问题。MC 需要对数据场全部单元逐一进行检查,

计算, 但通常等值面只与三维数据场内一部分单元相交, 而且该算法许多有用的工作发生在确实与等值面相交的那些单元上。与单元计算相比, 遍历的花费变化很大, 依赖于数据场的总体规模、包含等值面单元的数目以及计算机内存的大小。以前的研究表明, 在等值面产生过程中, $30\% \sim 70\%$ 的时间花费在空单元检查上^[17]。

⑥ 冗余问题。原始 MC 算法把等值面上的样本点等同于等值面内的点。当三角形退化为一个点或一条直线时, 就会产生冗余多边形, 这些所谓的冗余多边形不会对结果图像作出贡献, 但占用计算资源。

(4) 剖分立方体方法 (Dividing Cubes)。该方法是针对三维数据场具有很高密度的情况提出来的。因为在这种情况下, 用 MC 方法在单元中产生的小三角面片与屏幕上的像素差不多大, 甚至还要小, 这样通过插值计算小三角面片是没有必要的。这时完全可以用通过该单元中心点的一个小面片来代替单元内的等值面, 从而省去大量的计算时间。剖分立方体方法逐步扫描每个单元, 当单元的八个顶点越过等值面值时, 将该单元投影到显示图像上。若投影面积大于一个像素的大小, 则该单元被分割成更小的子单元, 直到使子单元在显示图像上的投影为一个像素大小。当然, 其结果仅为等值面的近似表示, 但对于数据场密度值很高的医学图像来说, 其视觉效果是可以接受的^[18]。

3 直接体绘制技术及其特点

在现实世界中, 有许多场景是不能用简单的面来表示的, 实际上, 这些场景形成的数据中并不包含真实面, 如烟、火、云、雾等。在这种情况下, 面绘制技术就不适用了, 直接体绘制为研究者理解数据中有趣的信息提供了一种更加有用的方法。

近年来, 直接体绘制技术已经成为三维数据场可视化的一种重要方法, 它在许多应用中能产生高质量的图像, 并且已经特别成功地应用在医学可视化中。与面绘制方法相比, 直接体绘制的主要优点是它可以使用来自一个物体的表面和内部的数据, 而不仅仅限制用来显示由阈值确定的等值面上的数据。这一点在医学可视化中特别有价值, 其中, 数据场包含了许多物体, 它们大小不一, 并且大小各异的物体间的关系特别重要。在这种环境中, 一个简单的等值面通常不能描绘要求的全部细节。至今, 已经发展了几种直接体绘制技术, 它们各有特点, 但也存在如下共同特征:

(1) 与面绘制不同, 直接体绘制不借助中间几何图元, 直接将数据场绘制到二维图像屏幕上;

(2) 不仅可以绘制面, 还可以展现物体内部结构, 这是直接体绘制技术得到广泛使用的重要原因之一;

(3) 直接体绘制计算量很大, 并且当视点改变时, 图像必须进行大量的重新计算。

下面重点分析两种典型的直接体绘制技术: 光线投射和映射。

3.1 光线投射 (Ray Casting)

光线投射是一种典型的以图像空间为序的直接体绘制算法, 它从屏幕上的每一个像素点出发, 沿设定的视点方向, 发出一条射线, 这条射线穿过三维数据场, 沿这条射线选择若干个

等距采样点,由距离某一采样点最近的八个体素的颜色值及不透明度值做三线性插值,求出该采样点的不透明度值及颜色值。在求出该条射线上所有采样点的颜色值和不透明度值以后,可以采用由后到前或由前到后的两种不同的方法将每一采样点的颜色及不透明度进行组合,从而计算出屏幕上该像素点处的颜色值^[4]。光线投射方法除具有上述一般直接体绘制技术所具有的特点而外,还具有下列特点:

(1)图像质量较高。由于该方法考虑了数据场所有体素对图像的贡献,利用了尽可能多的原始信息,从而能够产生较真实、较高质量的图像。但是,由于采用了光学方法,虽然能在一定程度上看到内部结构,但有时图像看起来比较模糊,需要一些特征增强手段才能表达出用户感兴趣的信息。

(2)走样。由于点采样的不精确性,会产生一定走样,并且在一个方向上采用等距点采样是盲目的,也是不充分的,会丢失一些小的细节。

(3)速度较慢,内存占据量大。因为采取逐个像素处理方法,并且为了产生不走样图像,每条光线要求大量的样本点,从而,计算量特别大。这样,从根本上讲,其速度较慢,要达到实时交互有一定困难。另外,在进行三线性插值前,该算法必须先装入八个样本,每个时间光线在体内向前走一步。因为样本不能按内存顺序存储,这就产生了超高速缓存障碍。此外,运行在同一单元上的别的光线不能利用超高速缓存器中预装入的数据,因为其中经常被别的数据替换。

3.2 溅射(Splatting)

溅射的最初工作是由 Westover 提出的^[19],它是一种以物体空间为序的直接体绘制算法。该方法把数据场中每个体素看作一个能量源,当每个体素投向图像平面时,用以体素的投影点为中心的重建核将体素的能量扩散到图像像素上。这种方法之所以叫溅射是因为把能量由中心向四周逐渐扩散的状态形象地比喻为溅射的雪,就好像把一个雪球(体素)扔到一个玻璃盘子上,雪球散开以后,在撞击中心的雪量(对图像的贡献)最大,而随着离撞击中心距离的增加,雪量(贡献)减少。除具有一般直接体绘制技术的特点之外,溅射方法还具有以下特点:

(1)速度快。与光线投射法相比,溅射的主要优点是速度较快。在光线投射中,要对沿光线的每个样本点(设共有 k 个样本点)进行重建,在每个样本点,要用 k^3 卷积过滤。平均来讲,即使 n^3 个体素的每一个只采样一次,光线投射至少有 $k^3 n^3$ 的时间复杂度。另一方面,在溅射中,卷积被预计算,并且每个体素被准确溅射一次,每个溅射要求 k^2 次合成操作,所以,可望最多 $k^2 n^3$ 的时间复杂度。这就使溅射具有一个特有的速度优势。

(2)图像质量不如光线投射。当然,人们可以使用较大的重建核来改进溅射精度。

(3)色彩扩散。基本的溅射算法按从后向前次序合成溅射时,不能精确地确定隐藏的背景物体的可见性,这样,隐藏的背景物体的色彩可能会扩散到结果图像上^[23]。

(4)渐近细化。因为溅射严格地按由前向后或由后向前的次序产生图像,通过观察图像的逐步生成过程就能看到数据场的内部信息,这一点从图像空间为序的技术中是得不到的。特

别地,按由后向前的次序,可以看到后面最终被隐藏起来的物体结构。

(5)效率问题。因为原始溅射算法按某种次序遍历全部体素,计算成本与数据场的规模呈线性变化,与其内容无关。通常,只有数据场的一小部分包含着要绘制的物体,如典型的 CT 或 MRI 数据中大部分包含着空气,空气很少被绘制。因此,通过只溅射与要绘制物体相对应的那些体素,从而使计算时间得到节省,这是完全有可能的。据报道,数据场中 70%~90% 是不感兴趣的体素,这种情况并不少见^[20,21]。

(6)相关性问题。溅射算法利用了体素本身的空间相关性,但没有利用体素之间的相关性。

3.3 混合(Hybrid Order)

混合算法是物体空间为序与图像空间为序算法的结合。一种与典型的光线投射方法具有同样效果的混合方法如下:将所有单元按从视点开始距离增加的次序投影到图像平面上。对于一个单元,从投影单元覆盖(围绕单元投影的最小轴对齐矩形)的每个像素发出一条光线;然后对该光线重采样该单元;通过合成,把这些样本的色彩和不透明度累加到那些像素上^[22]。

4 结论

面绘制技术首先把三维数据场的表示缩减为一种感兴趣的面抽取,再把离散的三维数据与多边形表示相联系,这样,可以最大程度地利用现有计算机图形学和硬件加速技术,这种技术速度较快。与面绘制不同,直接体绘制是研究光线通过数据场时与体素或单元的相互关系,无须构造中间面,其计算量大,因而速度不如面绘制,但能够看到数据场内部结构。另一方面,溅射基于将体素投影到屏幕上,一个体素的贡献向许多像素分散。与光线投射相比,溅射能以较高速度产生图像。

体绘制技术是随着可视化的发展而出现的一个新的研究方向,其中体光照模型、体绘制算法中存在许多问题还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Foley J D, et al. Computer Graphics Principles and Practice (Second Edition) [M]. Addison-Wesley, 1990. 1034-1039.
- [2] Westover L. Footprint Evaluation for Volume Rendering [J]. Computer Graphics, 1990, 22(4): 367-376.
- [3] Wilhelms J, Gelder A Van. A Coherent Projection Approach for Direct Volume Rendering [J]. Computer Graphics, 1991, 25(4): 275-284.
- [4] Levoy M. Display of Surfaces from Volume Data [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1988, 8(5): 29-37.
- [5] Yagel R, Kaufman A. Template-based Volume Viewing [C]. Proc. Eurographics 92, volume 11(3), 1992. 153-157.
- [6] Drebin R, Carpenter L, Hanrahan P. Volume Rendering [J]. Computer Graphics, 1988, 22(4): 65-74.
- [7] Upson C, Keeler M. V-buffer: Visible Volume Rendering [J]. Computer Graphics, 1988, 22(4): 59-64.
- [8] Chen L, et al. Surface Shading in the Cuberille Environment [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1985, 5: 33-43.
- [9] Herman G T, Liu H K. Three Dimensional Display of Organs from Computed Tomograms [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1979, 9(1): 1-21.

(下转第 38 页)

“冲突暂停”两个状态对应;最后,谈判以签订合同或一方退出谈判而结束。

4 结束语

本文首先分析了“商务谈判三步曲”进程框架的不足和 Petri 网作为一种建模工具的优点。然后,在电子谈判执行过程的基础上结合人工智能的主体技术,为电子商务活动执行过程建立了一个 Petri 网模型,该模型具有智能、并行、高效的特点。另外,该模型中的谈判协议并不是以主体代码的一部分隐性地编辑在主体中,而是独立于主体之外^[19]。这种设计提高了该模型的灵活性,也使其更适应诸如 Internet 或将来的 Semantic Net 的开放式环境。因此,为电子谈判过程建立一个协议本体是我们下一步的工作。

参考文献:

- [1] 吉思·希尔特伯,等.谈判 NEGOTIATION[M].北京:中国人民大学出版社,1997.17-57.
 - [2] 朱美娥,等.商务谈判[M].北京:机械工业出版社,1997.98-129.
 - [3] 袁崇义.Petri网原理[M].北京:电子工业出版社,1998.1-24.
 - [4] 乐晓波,等.面向对象的 Petri网建模技术的研究[J].计算机工程,2002(5):86-88.
 - [5] 张云勇.移动 Agent 及其应用[M].北京:清华大学出版社,2002.
 - [6] 曹晓东,等.对电子商务 Agent 技术的研究[J].微型电脑应用,2000,16(7):31-47.
 - [7] 史忠植.智能主体及其应用[M].北京:科学出版社,2000.
 - [8] Patrick C K Hung et al. Modeling E- Negotiation Activities with Petri Nets[C]. HICSS' 02, 2002.
 - [9] N R Jennings, et al. Automated Negotiation: Prospects, Methods and Challenges[J]. Journal of Group Decision and Negotiation, 2001, 10(2): 199-215.
 - [10] 王洪耘,等.商务谈判——理论·实务·技巧[M].北京:首都经济贸易大学出版社,1998.97-172.
 - [11] 王健.商务谈判三步曲[J/OL].http://www.ittimes.com.cn/a2/b1/20021226/080001319.shtml, 2002-12-26.
 - [12] A Lomuscio M Wooldridge et al. A Classification Scheme for Negotiation in Electronic Commerce[EB/OL].http://www.dcs.kcl.ac.uk/staff/alessio/papers/Lomuscio+GDN.ps, 2002.
 - [13] Guttman R H, et al. Agent-mediated Electronic Commerce: A Survey[J]. Knowledge Engineering Review, 1998, 13: 3-12.
 - [14] 王泊,史佩雯,田启家,等.协商支持系统中的模型管理框架[J].计算机科学,2002,29(10):107-109.
 - [15] Sierra C, Faratin P, et al. A Service-Oriented Negotiation Model between Autonomous Agents[C]. MAAMAW' 97 (LNAI 1237), Springer-Verlag, 1997.17-35.
 - [16] Tamma V, Wooldridge M, et al. An Ontology Based Approach to Automated Negotiation[C]. AMEC IV, Springer-Verlag, 2002. 219-237.
- ### 作者简介:
- 纪淑娟(1977-),女,河北唐山人,助教,硕士研究生,主要从事智能软件、数据挖掘和电子商务等方面的研究;梁永全(1967-),男,山东阳谷人,教授,硕士生导师,博士,主要从事人工智能、多媒体和数据库等方面的研究;赵春燕(1975-),女,山东菏泽人,讲师,硕士研究生,主要从事人工智能及图形图像处理等方面的研究。
-
- (上接第18页)
- [10] Artzy E, Frieder G, Herman G T. The Theory, Design, Implementation and Evaluation of a Three Dimensional Surface Detection Algorithm[C]. Proceedings of the 7th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Washington, 1980. 2-9.
 - [11] Gordon D, Udupa J K. Fast Surface Tracking in 3D Binary Images[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1989, 45(2): 196-214.
 - [12] Sobierajski L, Kaufman A, et al. A Fast Display Method for Volumetric Data[J]. The Visual Computer, 1993, 10(2): 116-124.
 - [13] Lorensen W, et al. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm[J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 163-169.
 - [14] Shu R, Chen Z, Kankanhalli M S. Adaptive Marching Cubes[J]. The Visual Computer, 1995 11(4): 202-217.
 - [15] Kwang-Man Oh, Kyu Ho Park. A Type-Merging Algorithm for Extracting an Isosurface from Volumetric Data[J]. The Visual Computer, 1996, 12(8): 406-419.
 - [16] Wolff R S, Yaeger L. Visualization of Natural Phenomena[M]. Springer-Verlag, 1993. 138-142.
 - [17] Wilhelms J, Gelder A Van. Topological Considerations in Isosurface Generation[J]. Computer Graphics, 1990 24(5): 79-86.
 - [18] Cline H E, et al. Two Algorithms for Three-Dimensional Reconstruction of Tomograms[J]. Medical Physics, 1988, 15(3): 320-327.
 - [19] Dürst M J. Letters: Additional Reference to “Marching Cubes”[J]. Computer Graphics, 1988, 22(2): 72-73.
 - [20] Levoy M. Efficient Ray Tracing of Volume Data[J]. ACM Transactions on Graphics, 1990, 9(3): 245-261.
 - [21] Wilhelms J, Gelder A Van. Octrees for Faster Isosurface Generation[J]. ACM Transactions on Graphics, 1992, 11(3): 201-227.
 - [22] Mueller K, Yagel R. Fast Perspective Volume Rendering with Splatting by Utilizing a Ray-Driven Approach[C]. IEEE Visualization' 96, 1996. 65-72.
 - [23] Westover L. Interactive Volume Rendering[C]. Proc. 1989 Chapel Hill Volume Visualization Workshop, 1989. 9-16.
- ### 作者简介:
- 洪歧(1961-),男,浙江东阳人,副教授,博士研究生,主要研究方向为可视化技术、图形图像处理、模式识别;张树生(1956-),男,河南人,副主任,教授,博士生导师,主要从事可视化、图形图像、工程图纸理解、逆向工程、神经网络等方面的理论和应用技术研究;王静,博士研究生,主要研究方向为可视化技术、图形图像处理、模式识别;刘雪梅,博士研究生,主要研究方向为可视化技术、图形图像处理、模式识别。