

体图形学*

管伟光

(哈尔滨理工大学计算机系, 哈尔滨 150080)

解林

(哈尔滨医科大学第一附属医院, 哈尔滨 150000)

马颂德

(中国科学院自动化研究所, 北京 100080)

摘要 体图形学是计算机图形学中新崛起的一个重要分支,它在吸收传统计算机图形学和计算机影像技术等有关知识的基础上,逐步形成自己独特的概念、理论和方法。把传统计算机图形学与体图形学进行了详细对比,并在此基础上评述二者的优缺点;对体图形学的发展历史、研究现状和发展趋势进行综述。

关键词 体图形学 体视化 体素化 离散光线跟踪

0 引言

计算机硬件的飞速发展给我们带来了快速的、价格低廉的大容量存储器,这就为计算机图形学的变革提供了强有力的支持。在70年代,硬件的发展引发了从矢量图形到光栅图形的变革。今天,速度更快、处理能力更强、容量更大的计算机硬件系统正在推动图形学中的另一次变革——从基于面的图形学向基于体的图形学转变。一些制造厂商相继开始设计和研制处理体数据的硬件系统,为体图形学的进一步发展提供了坚实的物质基础。

我们知道,传统的三维计算机图形学对形体的表示、操作和显示都是基于形体的表面,所以这种图形学也称作面图形学^[7,9](Surface graphics)。面图形学适合于描述形状比较规则的物体,象机械零件、建筑物等。但在飞机、轮船、汽车等的造型设计上,面图形学就显得比较吃力了,因为这涉及到了复杂的曲面造型问题。尤其是在描述象山脉、树木等不规则的自然景物时,描述能力差的弱点更加暴露无遗。面图形学的另一个主要缺陷是,它只能描述物体的表面,而无法表示物体内部细微的结构变化。也就是说,它把物体理想化成由单一物质组成的均匀体,

物体内部的物质处处均匀一致。因此它无法表示烟云、土壤等无形的、密度不均匀的、成份复杂的目标。

体图形学^[1,5,8,9](Volume graphics)研究的是体素化物体的合成、操作和显示问题。不同于体视化,体图形学侧重体素化的几何形体及其后续的操作。它弥补了传统面图形学的缺陷,丰富和发展了计算机图形学的理论和方法。

体图形和面图形之间的关系与二维情况下的光栅图形和矢量图形之间的关系有很大的相似性。回顾光栅图形与矢量图形之间的异同之处,将会有助于我们更好地掌握体图形学与面图形学之间的差别以及体图形学的特点。

1 矢量图形与光栅图形

让我们简要回顾一下计算机图形学在过去30年里所走过的历程。60年代和70年代的矢量图形(Vector graphics)的特点是,物体的描述、变换和显示都是建立在图形基元之上,使用的是矢量化显示和绘图设备。物体在计算机中的表示形式是一系列图形基元,如点、线和多边形。对物体的修改、平移、旋转和缩放等操作,是以对组成物体的基元实施相应

* 本文工作得到国家自然科学基金资助

收稿日期:1998-09-09;收到修改稿日期:1998-12-14

变换的方式而得以实现的。一组图形基元存放在显示列表(Display-list)中,对显示列表中的图形基元不断地重绘就起到了屏幕刷新的目的,使物体保留在显示屏上。所以,矢量图形是基于对象的。矢量图形的主要优点是,对物体的变换操作直截了当,而且矢量显示没有走样问题。但是,矢量图形只适合绘制线框图,而绘制图形基元的内部浓淡(如填充多边形)则是十分困难的。

光栅图形是在70年代后期逐渐发展起来的。它使用一个叫做帧缓存(Frame-buffer)的二维阵列,阵列上的每一个点都唯一地对应屏幕上的一个像素。屏幕刷新是由视频控制器单独控制,它以一定频率把帧缓存中的内容重复显示到屏幕上。物体显示是基于点的方式,即把那些属于物体的像素点进行着色,物体是以离散点阵的形式出现在屏幕上。矢量图形和光栅图形的不同显示实现方式如图1所示。而矢量

图形和光栅图形的属性对照列于表1中。

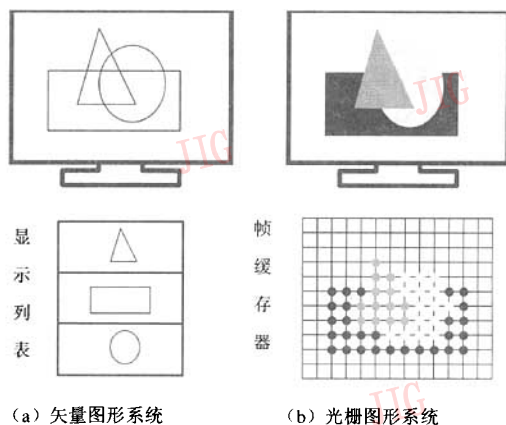


图1 矢量与光栅图形系统

表1 矢量图形和光栅图形的属性对照

编号	属性	矢量图形	光栅图形
1	物体显示与屏幕刷新	物体显示嵌入屏幕刷新过程	扫描变换独立于屏幕刷新过程
2	显示效率	对形体的复杂度十分敏感	对形体的复杂度不敏感
3	存储量需求	变化的,依赖于景物的复杂度	很大,但恒定不变
4	屏幕显示的走样现象	没有走样	会产生走样
5	几何变换	连续的,变换作用于几何定义的形体	离散的,变换作用于区域内的所有像素
6	集合运算和块操作	困难,需要解析计算	容易
7	显示区域内部的能力	没有,仅能显示边界	有,浓淡或纹理
8	与数字图象相容性	不相容	完全相容
9	定量测量	精确,但是计算复杂	计算简单,但是近似值

2 面图形学与体图形学

矢量图形基于对象的方法被推广到三维图形学中来,并构成了面图形学的基础。在三维面图形学中,同样要将物体保存在一个显示列表中。所不同的是,这个列表中的图形基元不再是点、线、多边形边框等二维图元素,取而代之的是三维空间中物体的面(平面或曲面)。对列表中物体的任何改动或者是调整视点,都要重新生成显示图象。

面图形学在屏幕显示上仍采用光栅显示技术,而在物体的描述、操作变换乃至显示图象生成等方面则采用基于对象的方法,即物体是以它的表面作为对它的表示、操作和显示的核心。为面图形学而设计的专门硬件能够完成多边形和三次曲面的坐标变换和显示功能,这类硬件一般称为几何机^[2](Geometry engine),它一般是指那些具有上述图形处理功能的计算机或者硬件板。在过去的十多年中,面

图形学和与之相匹配的硬件系统风靡于三维图形领域,成为一个时尚。图2是面图形学的基本框架。

面图形学在许多方面与矢量图形存在惊人的相似。二者都使用显示列表保存组成对象的几何元素。面图形学实现物体显示的处理管道是,首先将这些几何元素从物体坐标系变换到视向坐标系,再从视向坐标系变换到屏幕坐标系,最后对它们进行扫描变换(光栅化过程),并将结果写入帧缓存器,产生最终的离散显示图象。对物体、视点位置或光照环境的任何改动,都需要重新启动一次这个显示管道(如图2所示)。面图形学仅可以描述和显示三维物体表面,不能呈现物体内部结构信息。这就和矢量图形只能显示区域的边缘而不能有效地显示区域内部的缺陷极其相似。

体图形学研究体素化物体的合成、操作和显示等问题。与光栅图形相对应,体图形学使用一种称之为体缓存^[2](Volume buffer)的介质,存放三维物体的离散表示。这个介质既可以是实际的物理器,也

可以是软件模拟的。但从原理上讲,这两者并没有什么区别,只是在执行效率上不同而已。体缓存可以看成是一种“三维光栅”,它的每一个小单位立方体就是一个体元素,简称体素。三维光栅中体素的概念恰恰源于二维光栅的象素,是在三维空间中的一种推广。每个体素有一个或多个值,这些值可以表示(全部或部分地)占有该体素的物体的某种可检测到的属性,例如颜色、密度、阻光度、反射系数、速度、对该体素的占有率等。

体图形学仍然使用帧缓存和光栅显示系统进行

显示,而把体缓存当作描述物体的媒介。体素化是体图形学的第一个过程,体素化产生在3个正交方向上排列整齐的体素阵列,所有体素都是大小相等的立方体,体素中记录了占有它的物体的某种属性值。当完成了体素化过程之后,形成的体素阵列将作为后续显示和变换过程的数据集(Datasets),并存储在体缓存之中。体图形学的这种工作方式使得体素化独立于显示过程。图3是体图形学的基本框架。

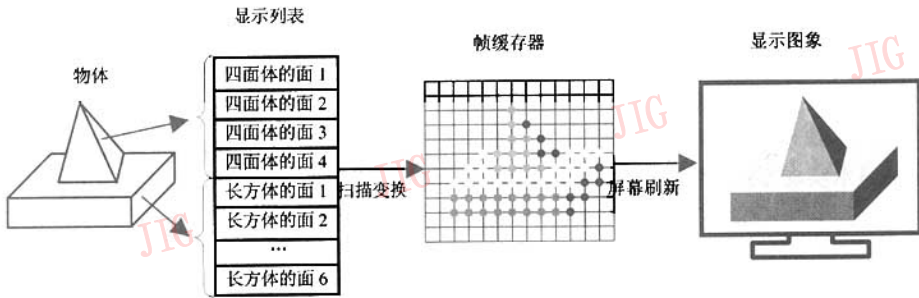


图2 面图形学的基本框架

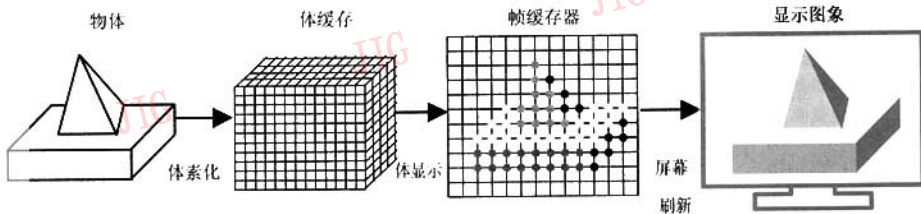


图3 体图形学的基本框架

由于体素化过程与操作、显示过程相互独立,再由于体素阵列表达形式的统一性,使体图形学不仅具有面图形学所具有的一些优点,象显示算法与视点无关,还具有面图形学所不具备的一些特性。下面,让我们对体图形学的优缺点进行全面分析和总结。首先,归纳一下体图形学的优点^[5,6,9]:

(1) 对景物的复杂度不敏感。不管景物中物体个数有多少,也不管三维物体的形状如何复杂和不规则,经过体素化过程都将以一种相同的形式存储在体缓存中。原物体的几何复杂度对显示算法的执行效率几乎没有影响,因为显示算法的输入都是体素的一个三维阵列。只有体素化过程的效率与景物的复杂度有关。如果景物不变,只需对其进行一次体素化,而显示过程与体素化过程是分离的。

(2) 对纹理不敏感。在面图形学中,在显示的最后阶段才开始进行纹理映射,纹理映射的时间复杂度与物体的几何复杂度有关。如果使用三维纹理图象构造物体表面的纹理,其时间复杂度仍然很高。这是由于在面图形学中,每一次显示都需要进行纹理计算。在体图形学中却不是这种情况,纹理映射和实体纹理化都在体素化过程中一次性完成,在每个体素上计算出的纹理值(颜色)保存在那个体素中,供以后的显示算法使用。

(3) 与视点无关。尽管这不是体图形学独有的特性,但是体图形学中的“与视点无关”与面图形学中的“与视点无关”的内涵不同。在面图形学中,对于视点的每一个变动,都需要对景物进行一次扫描转换来产生显示图象,这里的“与视点无关”是指显

示算法是不随视点而变的。在体图形学中,不仅景物在体素化过程中一次性固定下来,一些与视点无关的属性(颜色、纹理、透明度、法向量、反走样信息等)也可以一次性计算出来并记录在体素中,而不需要在每次显示中重复计算。

(4) 采样的和模拟的数据集。体图形学不仅可以利用体素化间接地接受和处理几何定义的形体,同时它特别擅长处理三维采样或模拟的数据集(一般需要对输入的原始体数据进行再采样,产生大小一致的立方体体素阵列),例如 CT 和磁共振设备产生的体数据,计算流体力学生成的体数据。这些体数据包含着物体的内部信息,可以表示无形的对象。因此,体图形学比面图形学适应面更广、包含的信息更全面。此外,它具有将体数据和几何描述融合起来的能力。

(5) 内部结构的显示^[5]。这是体图形学的一个最为突出的特点。广义上讲,现实世界中的物体都是实体,即使一个皮球也不是空的,因为它内部充满了气体。体缓存中的体素就含有物体内部和外部的信息,体图形学通过对这些信息的加工、变换和显示,再现物体内部原本看不到的结构。

(6) 集合运算和块操作。由于体素阵列的离散性和规则性,使得体图形学可以方便地对由体素组成的某个连通域(块)进行修改、移动、复制等操作。构造实体几何(CSG)中的并、交、差等集合运算可以由原来的三维操作降低为一维体素级操作,从而避免了面图形学中并、交、差运算中复杂的物体求交问题。

任何事物都有正反两个方面,离散体素阵列的景物表示形式除了具有上述优点之外,同时离散化也带来一些问题。下面,我们总结归纳体图形学的一些缺陷^[3,7]:

(1) 离散数据格式带来的问题。物体表示精度依赖于离散数据的分辨率,关于物体的定量测量(如,求物体的体积、表面积)只能近似估计。分辨率越高,体素越小,表示精度就越高,但是所占存储量就越大。再一个问题是,对物体的操作和变换很不方便,特别是要求操作和变换不产生退化现象,就需要更多的计算。解决这些问题的一个办法是对原数据集进行密集采样,把原体素分解成更小的子体素,另一个办法就是滤波。

(2) 缺少几何信息。每个体素只含有那个占有它的物体的一个局部信息,而不含有任何几何信息,因此不能准确地计算浓淡显示中的法向量,只能近似估计。

(3) 存储和处理。体缓存一般占非常大的空间。例如,一个 $512 \times 512 \times 512$ 的体缓存含有超过 10^8 个体素。如果每个体素占一个字节,那么就需要 128M 存储空间。如今,存储器硬件发展水平完全可以满足这么大的存储需求,因此存储并不是一个主要问题,而如何快速地处理体缓存中大规模的离散数据,实现实时的显示则确实是一个棘手的问题。与面图形学中几何机相对应,人们也设计了能够处理体缓存的硬件系统——体机^[2,4](Volume engine),它具有体素化、存储、操作和显示等功能。从结构上看,体机的设计远比几何机简单,因为它所要处理的基本元素是大小形状相同而且排列规整的体素。

虽然体图形学诞生还不足十年时间,但却在许多方面都展示了其独特的优越性,具有旺盛的生命力。我们现在还不能说,体图形学将全面代替面图形学,因为这还要看体图形学将来的发展,看是否能找到解决它目前所存在的问题的方法和途径。表 2 列出了面图形学与体图形学各种属性的对比情况。

表 2 面图形学和体图形学的属性对照

编号	属性	面图形学	体图形学
1	显示效率	对景物的复杂度十分敏感	对景物的复杂度不敏感
2	存储量需求	变化的,依赖与景物的复杂度	很大,但恒定不变
3	物空间的走样现象	没有走样	存在走样
4	几何变换	连续的,变换作用于几何定义的形体	离散的,变换作用于体缓存中的所有象素
5	扫描变换和显示	象素化嵌入到扫描转换中	体素化与显示过程无关
6	集合运算和块操作	困难,需要解析计算	容易
7	显示物体内部的能力	没有,仅能显示表面	有,能显示物体表面和内部
8	支持体数据和几何数据融合	不相容	完全相容
9	定量测量	精确,但是计算复杂	计算简单,但是近似值
10	视点无关	视点变化时需要重新显示	一次性计算与视点无关的信息

3 结束语

体图形学是计算机图形学领域中新崛起的一个重要分支。它在诸多方面均展示出优于传统面图形的种种特性,因此倍受人们的重视。尽管体图形学目前还存在许多问题,象离散问题、存储需求大、处理时间长、缺少几何信息等,但是这些问题都会随着硬件水平的提高和体视化技术的发展逐步得到解决。体图形学之所以受到计算机图形学界的高度重视,其魅力就在于它从概念到原理、方法和实现机制完全不同于传统面图形学,为计算机图形学注入了新的活力,拓宽了计算机图形学的应用范围。

参考文献

1 Kaufman A (ed). *Scientific Visualization: Advances and Challenges*.



管伟光 副教授,1995年在中科院自动化所获得模式识别与智能控制专业博士学位,现在在加拿大 Laval 大学做博士后。主要研究方向为体视化、图形学、图像处理与计算机视觉。

- IEEE Computer Society Press, 1994.
- 2 Kaufman A (Ed). *Rendering. Visualization. and Rasterization Hardware*. Springer-Verlag. 1993.
 - 3 M Grave. Y, Le Lous, Hewitt W T (Eds). *Visualization in Scientific Computing*. EUROGRAPHICS'91, 1991.
 - 4 McCormick B M, et al. *Visualization in Scientific Computing*. Report of the NSF Advisory Panel on Graphics Image Processing and Workstations, 1987.
 - 5 Kaufman A. *3D Volume Visualization*. *Advances in Computer Graphics* 4. Springer-Verlag. 1991.
 - 6 Elvins T T. A Survey of Algorithms for Volume Visualization. *Computer Graphics*, 1992, 26(3).
 - 7 Barillot C. *Surface and Volume Rendering Techniques to Display 3-D Data*. *IEEE Eng in Medicine and Biology March*, 1993.
 - 8 管伟光. 体数据可视化及其在医学中的应用:[学位论文]. 北京:中国科学院自动化研究所, 1995.
 - 9 管伟光. 体视化技术及其应用. 北京:电子工业出版社, 1998.

解林 哈尔滨医科大学第一附属医院计算机室工程师。主要研究方向为医学图象处理和计算机远程会诊系统。

马颂德 研究员,博士生导师,获得法国国家博士学位。在中科院自动化所主持计算机视觉、认知科学、模式识别等方面的研究。

Volume Graphics

Guan Weiguang

(Department of Computer Science, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)

Xie Lin

(The First Affiliated Hospital of Harbin Medicine University, Harbin 150000)

Ma Songde

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Building its own unique concept, principle, and methodology on traditional surface graphics and imaging techniques, volume graphics becomes an important branch of computer graphics. The paper makes a comparison between surface graphics and volume graphics, surveys the history, current status, and development trends of the state-of-art.

Keywords Volume graphics, Volume visualization, Voxelization, Discrete ray tracing