

95 (4)
1-4

科学计算可视化
科学方法

科学计算可视化现状及发展趋势*)

童劲松

蔡青

TP301.6

(西北工业大学 CAD/CAM 研究中心 西安 710072)

摘 要 This paper surveys seven main issues and related key techniques in ViSC around its achievements, problems and future directions. It points out that theoretical model is ViSC's foundation, while modeling and rendering method is its kernel; perceptability, its aim; parallelism, its need; hardware, its tool; and standardization, its tendency. The author thinks that volume visualization, supported by volume modeling and volume rendering, is current ViSC's trend

关键词 Visualization in Scientific Computing (ViSC), Model, Modeling, Rendering, Perceptability, Parallelism, Hardware, Standardization

随着计算技术的飞速发展以及超级计算机、医学扫描系统、地质勘测仪器的广泛应用,人们面临着分析解释由这些设备产生的大规模数据集的艰巨任务。为此,美国科学基金会(NSF)于1986年专门召开了一次研讨会,会上提出了科学计算可视化(Visualization in Scientific Computing,简称 ViSC);第二年形成了正式的 ViSC 报告^[1],一门崭新的交叉学科诞生了。

该报告认为,可视化是一种计算方法,它把数字符号转换成几何图像,使科学家能够观察其模拟和计算过程,并进行交互控制。科学计算可视化提供了一种发现不可见信息的方法,丰富了科学发现的过程,给予人们深刻而意想不到的洞察力,使科学家们的研究方式发生了根本变化;可视化包括图像理解与图像合成,它既是解释输入到计算机的图象数据的手段,又是由复杂多维数据集产生图象的工具。可视化由以下学科支持:计算机图形学、图象处理、计算机视觉、计算机辅助设计、信号处理、用户界面。

可视化的目的在于以视觉方法为已有的科学研究领域提供新的科学灵感,收到事半功倍的效果。

目前,ViSC 技术已在计算流体力学(CFD)、医学、地球物理学、气象学、分子结构学等许多领域内得到了广泛的应用。以下分七个方面讨论科学计算可视化取得的进展及其发展方向。

一、理论模型

为了概括可视化过程,对其核心部分进行抽象,需要给出准确、完整、合理的可视化理论模型。众多的可视化应用系统采用“可视化流水线(Visualization pipeline)”^[2]作为理论模型,如图1所示。

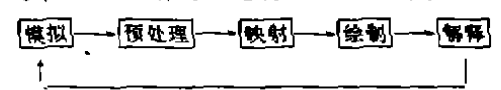


图1 “可视化流水线”模型

该模型将整个可视化过程划分为模拟、预处理、映射、绘制、解释五个步骤,数据经由这一流水线依次被处理加工,直至成为能够为科学家所理解的视觉信息。其中,模拟部分是对物理现实的数学模拟,它将自然现象的变化通过复杂的多维数据反映出来;预处理和映射两部分通常合并在一起,是整个“流水线”的关键,大体积的计算数据经过这个步骤,被映射成有一定含义的几何数据,即,用一定的几何空间关系表示计算数据集;绘制部分通过形状、颜色、明暗处理、动画等手段,将隐藏在大数据集中的有用信息呈现给科学家们。

“可视化流水线”模型适宜分布操作和并行处理。系统设计人员可以很方便地将“流水线”上的每一个处理步骤分配给一个指定的机器或处理器;同

*)国家自然科学基金资助。童劲松 博士生,主要研究方向为CAGD、专家系统和科学计算可视化。蔡青 教授,博士生导师,主要研究方向为CAGD、专家系统和CAD/CAM。

时,由于“流水线”不是命令驱动,每个步骤不由命令控制,而是数据驱动的,处于输入数据、层次边界及其它局部条件控制之下,因此可通过数据集的划分实现基于时间的并行算法。著名的 AVS、apE 等可视化应用软件都采用了这一模型。

然而,“可视化流水线”模型还很不完善。首先,该模型过于笼统,无法详尽地描述现有可视化系统;其次,灵活性较差,一旦“流水线”中的数据发生变化,则“流水线”即行中断,这时必须返回到初始状态重新启动。这种“流水线”形式的数据处理方法严重影响了交互效率,特别是大体积数据集的交互处理,从而不利于用户对可视化过程的跟踪和驾驭。另外,现有的“可视化流水线”都是专用的,一种“流水线”只处理某一个应用领域中的数据,缺乏通用性。

针对现在不断涌现的可视化应用领域、种类繁多的数据类别以及用户与可视化系统交互过程中千变万化的数据集,具有推理机制且能自动判断、分类和处理各领域数据集以达到最佳视觉效果智能型可视化模型,是今后模型理论发展的方向。

还有不少学者提出,随着今后可视化系统的发展,需要对可视化模型进行细化,应对整个可视化过程中的每个关键步骤以及用户、设备等外部条件,建立独立于应用的抽象模型,如数据模型、用户模型、设备模型、时间模型等^[3]。

二、造型方法

造型是科学计算可视化的重要课题之一。现在的可视化系统或是采用传统的曲面造型方法,然后进行表面明暗处理;或是将三维扫描仪器获取的规则三维图像数据,直接采用体元绘制方法加以显示;而对于基于体元(Voxel)的造型方法——体造型(Volume modeling)研究甚少。

体造型方法是一种以体元为单位,表示三维物体、场景及其内部结构的造型方法,有时称体元化(Voxelization)问题。这一方法迄今有许多问题亟待解决,如:离散体元的造型和修改、特征的表达,离散体元与曲面的统一,等等。

近年来出现的多分辨率造型(Multiresolution Modeling)方法^[1],为体造型开拓了一条新途径。Muraki 采用信号处理中的正交子波变换(Orthogonal wavelet transform),对体元数据进行滤波,得到了物体的层次多分辨率形式的子波表示。文[4]中,Mura-

ki 将一系列 115 片 MR(核磁共振)图像进行子波变换重构,得到了不同分辨率的 MRI 表示函数及图像。

多分辨率造型法,由于可根据需要对局部数据舍弃或保留,因此有利于显示操作中的 Zoom、几何处理初值求解、数据压缩以及层次表示。如何表示散乱数据并推广到多维笛卡尔坐标网格,是这一方法需要解决的难点。

三、绘制方法

在科学计算可视化这一领域内,目前没有哪个方向的发展象体元绘制(Volume rendering)的发展那样引人注目的了。

在许多科学应用领域,存在着大量呈三维空间分布的三维数据阵——体数据(Volume data),如医学中 CT、MR 等三维扫描系统产生的由一系列层面图像组成的三维体数据,计算机模拟应力或流场产生的有限元体数据集等。以往绘制这些数据的做法皆基于曲面绘制(Surface rendering),常有两种:层面绘制^[5]和等值面绘制^[6-8],这两种方法都无法清楚完整地显示整个体的内部情况。

自 Reeves^[9]引入光粒子系统以来,Sabella^[10]的自发光粒子模型和 Krüger^[11]的修正传输理论模型均直接将标量体数据场映射于一个密度场,通过模拟虚拟光粒子穿过该密度场时的发光特性反映数据场的内部结构。光粒子与场数据值以及一些事先指定的特征(等值面等)发生作用,通过光强度 I 的变化将内部信息显示于屏幕上。

根据 Krüger 的修正传输理论模型

$$(\vec{s} \cdot \nabla)I(\vec{x}, \vec{s}) = -\sigma_a(\vec{x})I(\vec{x}, \vec{s}) + q(\vec{x}) + \sigma_s(\vec{x}) \int d\vec{s}' p(\vec{x}, \vec{s}' \rightarrow \vec{s}) I(\vec{x}, \vec{s}') \quad (1)$$

其中, $I(\vec{x}, \vec{s})$ 是光强度函数, $\vec{x}, \vec{s}$ 分别是坐标向量和光传播方向向量, $\sigma_a(\vec{x}) = \sigma_t(\vec{x}) + \sigma_s(\vec{x})$ 是与密度相关的消光系数, σ_a, σ_s 分别为吸收系数和散射系数, $q(\vec{x})$ 是体内部光源(点、面或体型); $p(\vec{x}, \vec{s}' \rightarrow \vec{s})$ 是散射相位函数(光由 $\vec{s}'$ 向 $\vec{s}$ 方向散射)。这一修正方程的解可由弗雷德霍姆第二积分方程给出。若忽略其散射项并取其一阶近似,则得到目前广为采用的迭代型体元绘制方程:

$$I(s + \Delta s) = (1 - \alpha_s) [I(s) + q(s) \Delta s] \quad (2)$$

其中, 蔽光度 $\alpha_s = 1 - e^{-\int_0^{\Delta s} \sigma_s(s') ds'}$

这与 Sabella 在文[10]中的 DE 模型是一致的。

体元绘制具有很多优点:不依赖于视点,对场景和物体的复杂度不敏感,因而易于表示大体积的采样数据或模拟数据;可以清楚地显示内部结构,对某些“热点”信息作强化处理;适于 CSG 表示或层次多分辨率表示;易于实现并行算法。有科学家甚至认为^[12],正如光栅图形在七十年代曾代替了矢量图形一样,基于体元绘制的体图形学(Volume graphics)将代替现在的三维曲面图形方法。

四、感知性

可视化不仅仅是模拟计算,也不仅仅是图形显示,它在本质上是一个将大量无序的信息转换成可被人脑感知的信息的复杂过程。因此,如何将蕴含在大量数据中的有用信息以用户易于接受和感知的形式充分地展现出来,即可视化系统的感知性,是这个系统成败的关键。

人对外部世界的反映分两种:感觉和知觉,前者是人脑对直接作用于感觉器官的客观事物个别属性的反映,如视觉、听觉、触觉等;后者是人脑对直接作用于感觉器官的客观事物和主观状况的整体反映,往往与人的知识、经验、特点和兴趣有关。知觉是感觉的深化,感觉是知觉的一部分,心理学上通常将这两者合在一起,统称感知觉。

现在一些可视化系统的感知性很差,不能满足用户的可视化要求,其原因就在于对用户所处应用领域内的专业知识了解不够,对用户的感知觉考虑不当,从而使可视化系统提供的信息无法正确地为用户感知与理解。

围绕以上问题,人们正在进行以下两方面的探索:

1. 在心理学、生理学和解剖学的基础上,对人的感知觉进行系统研究,建立可靠的感知觉模型,同时结合虚拟现实、多媒体等技术,开发具有有效感知性的可视化用户界面。这方面成功的例子有 Bryson 和 Levit 的虚拟风洞^[13],采用头戴型立体液晶显示器以及数据手套,给人一种置身于三维流场的错觉。

2. 可视化系统的自动生成及可视化系统的开发环境和工具。其中,与学科无关的可视化开发环境是前期目标,AVS (Application Visualization System)^[14] 和 apE (animation production Environment)^[15] 为用户提供了一个初步的可视化开

发环境,用户可按不同要求把系统模块与应用模块连接起来,以适应不同的应用环境。Palmer 开发了一种基于 C 的解释型语言 Polbq^[16],用以描述分子结构可视化系统中的数据类型、控制结构、运算符以及内部函数等。Beshers 和 Feiner 的 AutoVisual 系统^[17],基于规则建立了一个 n 个视图的虚拟环境以分析多变量函数的特征,用户只需定义可视化任务(给出欲分析的函数),而不必考虑如何实现等具体问题。这些系统距离“能够利用感知觉以及应用领域的专家知识,自动进行可视化系统的开发”这一目标,还相距甚远。

五、并行性

在 ViSC 系统中,由于经常需要对大体积数据集进行实时计算、修改与显示,因此要求系统具有并行性。最近的研究多集中于支持绘制的体系结构和并行算法^[17]。

体系结构在这方面的进展主要在以下方面:

1. 对于图形工作站,根据图形生成特点,改进图形子系统的设计结构,采用更多的并行处理;
2. 根据某些并行算法的特点,结合已有的并行结构,制成专门的目的处理机;
3. 研制通用的及可用于图形处理的通用处理机。

图形并行算法的研究主要集中于:

1. 多边形绘制。有关多边形的扫描转换、区域填充、明暗处理等方面已提出不少并行算法;
2. 光线跟踪。绘制高质量图形比较成功的全局光照模型是光线跟踪,其固有特征使之既有可能又有必要采用并行处理以提高效率;
3. 体元绘制。针对规则体数据集以及特定的处理机,已出现了许多耗费较少的特定算法,但对于散乱数据的并行处理尚有待解决。

六、硬件设备

正如图形工作站上现有的专为曲面绘制开发的图形加速器以及其它特制硬件一样,人们正在开发针对体元绘制的图形加速器和专用硬件,以提高工作站的可视化水平,但至今未有正式的产品出现。

在显示器件方面,投入大量精力和财力开发的直接体显示设备(DVDD)^[18],是一种完全不同于现有二维光栅显示器的真三维显示器,目前已有计算

机全息图、变焦镜以及德克萨斯公司的 OmniView 等几种。尽管 DVDD 尚处于实验室阶段,需要进一步提高分辨率、增加显示色彩并降低成本,但有朝一日这些设备实现了商品化后,它们会彻底改变我们观察图形的方式。

七、标准化

ViSC 是一门新兴学科,许多方面尚不成熟,特别是在标准化方面,尚有许多工作要做:

1. 专用术语的标准化。只有统一了科学计算可视化领域中的专业名称和术语,给出准确的定义,研究人员之间的相互交流才能成为可能。另外精确的定义也有利于可视化模型、算法和数据的统一表示。

2. 测试标准化。科学界需要一个统一的测试标准,以分析比较不同的可视化算法和系统的效率,这里有一个感知觉的度量问题。由于可视化算法和系统的效率是和人的感知觉息息相关的,如何度量感知觉这一心理学上的问题,既是建立测试标准的基础,也是其难点所在。

其它还有数据标准、设备标准等等,也需要加以统一。

八、结论

科学计算可视化是一门方兴未艾的学科,其中,理论模型是可视化系统的基础,造型方法及绘制方法是可视化系统的核心,感知性是可视化系统实现的目标,并行性是可视化系统的需要,硬件设备是其实现的手段,而标准化则是可视化发展的必然趋势。

当今,科学计算可视化的主流是以体造型和体元绘制为基础的体可视化,ViSC 正朝着这一方向迅猛发展。国外在这一领域已取得了长足的进步,而国内才刚刚起步。我们应立足于现有条件,从理论模型、造型及绘制方法、并行算法等基础理论与算法的研究着手,避“硬”就“软”,发挥优势,力争在科学计算可视化领域中占据一定位置。

主要参考文献

- [1] McCormick B. H. et al. eds., Visualization in Scientific Computing, Computer Graphics, 21 (6), 1987, Special Issue
- [2] Dyer D. S., A Dataflow Toolkit for Visualiza-

tion, IEEE CG&A, 10(4), 1990

- [3] Robertson P. K. et al., Research Issues in the Foundations of Visualization, IEEE CG&A, 14 (2), 1994
- [4] Muraki S., Volume Data and Wavelet Transforms, IEEE CG&A, 13(4), 1993
- [5] Blinn J. et al., Texture and Reflection in Computer Generated Images, CACM, 19(5), 1976
- [6] Farrell E., Color Display and Interactive Interpretation of Three-Dimensional Data, IBM J. Res. Develop. 27(4), 1983
- [7] Frieder G., Back-to-front Display of Voxel-based Objects, IEEE CG&A, 5(1), 1985
- [8] Lorensen W., et al., Marching Cube, A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, Computer Graphics, 21(4), 1987
- [9] Reeves W., Particle Systems—a Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects, Computer Graphics, 17(3), 1983
- [10] Sabella P., A Rendering Algorithm for Visualizing 3D Scalar Fields, Computer Graphics, 22(4), 1988
- [11] Krüger W., The Application of Transport Theory to Visualization of 3D Scalar Data Fields, Computers in Physics, 5(4), 1991
- [12] Kaufman A. E. et al., Volume Graphics, Computer, 26(7), 1993
- [13] Bryson S. et al., The Virtual Wind Tunnel, IEEE CG&A, 12(4), 1992
- [14] Upson C. et al., The Application Visualization System, IEEE CG&A, 9(4), 1989
- [15] Palmer T. C., A Language for Molecular Visualization, IEEE CG&A, 12(3), 1992
- [16] Beshers C. et al., Auto Visual, Rule-base Design of Interactive Multivariate Visualization, IEEE CG&A, 13(4), 1993
- [17] 贺瑞容、吴恩华,物理场图形生成的多处理机并行算法的研究和实现,计算机学报, 16(1), 1992 年
- [18] Chito T. E. et al., Direct Volume Display Devices, IEEE CG&A, 13(4), 1993