

科学技术之眼——计算机图形学*

李 华 张寒松

(中国科学院计算技术研究所 CAD 开放实验室, 北京 100080)

关键词 计算机图形学 科学计算可视化 虚拟现实技术 并行图形学

计算机图形学这一伴随着人类的最卓越的发明之一——计算机而发展起来的新学科, 从其诞生的时候起, 就被赋予了特殊的使命. 一般认为, 计算机图形学是研究怎样用数字计算机生成、处理和显示图形的学科, 与计算几何、图象处理和模式识别等学科有密切的联系而侧重于将数据和几何模型变成图象. 图形的表示方法包括从简单的线条图到具有复杂的色彩和纹理等表面及空间特征的真实感图形等, 在科学研究、工程设计的许多方面均可找到它的应用. 计算机图形学的研究领域非常广泛, 包括几何和自然景象模型的建立、彩色真实感图形的生成、交互技术、人机界面、图形系统标准等. 它的主要应用范围包括计算机辅助设计与制造、作战指挥和军事训练、计算机动画与艺术以及地形地貌和自然资源图等.

计算机图形学前沿的研究课题包括科学计算的可视化、虚拟现实技术、基于物理规律的几何造型、自然景象的模拟、计算机动画以及利用并行处理技术提高真实感图形的显示处理速度等. 本文仅就研究前沿的几个侧面做一叙述.

1 前景诱人的科学计算可视化

1994 年, 一场壮观的天文现象吸引了人们的注意: 苏梅克-列维 9 号彗星与木星相碰撞. 在不到 1 周的时间内, 先后共有 21 块碎片以时速达 20 多万公里的速度冲击木星, 引起了这颗太阳系最大行星的外观发生了自 1610 年人类首次使用望远镜观测它以来从未有过的大幅度改变. 这一罕见的自然现象为人们提供了绝好的观察和认识自然的机会, 科学家们期待着对观测结果的分析将导致一系列有趣的发现. 然而, 据有关专家估计, 此次全球范围的观测所获得的大量的数据的处理至少需要数年以至长达 10 年的时间才能完成.

类似的例子不胜枚举. 在科学技术飞速发展的今天, 人们通过各种手段采集、获取大量数据的能力已大幅度提高, 而数据处理或解释的能力远远落后. 来自航天飞机、卫星等的遥感、遥测, 气象, 地震预报, 石油, 地质, 探矿, 高能物理, 医学成像, 对自然、社会现象的计算机模拟, 大规模科学与工程计算等均产生了浩瀚的数据. 对这些数据的处理耗费了人们大量的时间和精力, 占用了大量的资源, 已成为人类面临的一个巨大的挑战; 另一方面, 作为自然或社会的人, 如果从信息处理的角度观察, 经由视觉系统处理的信息量达 80% 以

* 中国科学院科技政策局资助项目

上. 科学已证明, 人脑对于图形信息的把握能力, 包括获取信息的速度和容量均远胜于对抽象的文字符号的处理. 然而, 自文艺复兴导致近代科学技术的发端以来, 由于种种原因使人类基于直觉的判断力受到抑制. 有人认为, 现在已经到了要充分发掘上述潜力, 以解决我们所面临的困境的时候了.

自从 1987 年 2 月美国国家科学基金会 (NSF) 的一个研究报告提出科学计算的可视化 (visualization in scientific computing) 问题以来, 可视化技术正成为研究中的热点^[1,2].

可视化或称视觉化, 它的基本含义是将来自测量或科学计算中产生的大量非直观的、抽象的或者不可见的的数据, 借助计算机图形学和图象处理等技术, 用几何图形和色彩、纹理、透明度、对比度及动画技术等手段, 以图形图象信息的形式, 直观、形象地表达出来, 并进行交互处理. 这一技术正成为科学发现和工程设计以及决策的强有力的工具. 它涉及到计算机图形学、图象处理、计算机辅助设计和图形交互技术等相对独立的学科领域. 专家预测, 可视化技术所具有的潜力有可能与计算机网络与通信技术等相结合使人类通讯的方式发生革命性变革, 具有重大的经济效益和社会效益.

用图形或者图象作为媒介或载体表示信息的方法历史久远. 可视化作为高新技术的确定有着深刻的技术背景. 首先是计算机的处理速度和内存容量的大幅度提高, 包含有超级计算机、图象计算机、图形工作站的网络功能的增强, 使过去耗时费力的冗长计算得以在短时间内完成. 其次, 相关学科, 如计算机图形学、计算机辅助设计、图象处理、软件工程、交互技术、人机工程学及认知心理学等的进展, 使得对复杂图形图象的处理成为可能. 再次, 由于技术的进步, 使人类获取数据的能力大大增加, 如前所述, 对大量的、堆积如山的数据的及时的判读、理解、抽取信息等日显重要, 借助图形图象的信息表达、存储和传递面临着巨大的挑战.

可视化技术的目标之一是提供一种形象、直观地把握大量抽象的、非直观的或者不可见的的数据的能力. 数据场的可视化是其重要应用之一. 一般地可将带有某种物理意义 (如速度、湿度、压力等) 的数据的空间分布看作空间数据场. 它可以是静态的或动态的标量场或向量场. 它可分布于单介质或多介质的二维、三维或更高维的自由空间, 也可以是受限于某一几何约束 (如机翼表面的压力场). 数据的来源可以是某个真实的物理过程 (如声音强度分布等) 的数字模拟, 也可以是借助其他手段 (如医学的 CT、核磁 MRI 成像等) 的实地测量. 它所涉及的学科及应用范围很广, 涉及的显示技术相当复杂, 是国际上近年来的研究热点.

这一高新技术在某种程度上几乎可应用于每一个科学技术领域. 根据有关文献, 可列举的例子包括地图学、统计特征研究、遥感、考古学数据分析、物理化学和药品设计、生物化学、材料研究、医学、古建筑修复、气象学、地学、海洋学、石油工程、计算流体力学、非线性系统动力学、混沌学、可视化软件工程等等. 当前的研究课题集中于流体力学模拟、石油、地质、气象、地震、无损探测以及医学成像的三维显示等具体应用方面.

例如, 将 CT 扫描、核磁共振等二维平面图象变换成三维立体图象, 提供直观的三维信息以供诊断和手术决策的软件已达到临床应用的水平; 称为体绘制 (volume rendering) 的高级显示技术已用于大型水库大坝设计的有限元分析的数据处理.

目前由计算机图形学和气象专家组成的研究小组正尝试将可视化技术进一步用于日常的天气预报。其主要目的是将气象卫星对我国及其周边地区遥感得到的、每天近万兆字节的数据进行计算与分析,把结果提供给气象预报员作为天气预报的重要依据。同时,也可直接用来为农业、渔业、牧业、水利、环保、民航、地震等部门服务。这一技术的依据是,从气象卫星得到的二维原始云图,一般只是包含有云层的温度信息的灰度值。在气象专家的帮助下,利用经验公式,可将其在一定范围内变换成云层的高度,借助计算机图形学技术即可使遥感得到的资料以三维显示的方式呈现在观众面前,使人们能更深刻地了解天气系统的发生和发展过程。

此外,我国航天技术的飞速发展,提供了利用可视化手段及时捕捉地震前兆的多种信息的可能性。可视化技术将在地震预报的科学领域大有用场。相应的跨学科的合作研究项目正在酝酿之中。

如上所述,可视化技术有着巨大的发展和应用潜力,以及潜在的可观的经济效益和社会效益,可能会促进其他相关学科的发展和技术的进步。为此,急需开展多方面的、多层次的以及多学科的合作研究,以期在其发展上占有一席之地。国内各专业领域对可视化技术日益增加的兴趣和不断加强的合作,预示着这一新兴技术在我国发展和应用的良好前景。

2 引人入胜的虚拟现实技术

虚拟现实(virtual reality)技术可能是最能引起一般公众兴趣的计算机技术,因为它与人类的感性经验密切相关,并具有改造和渗入人类社会生活各个方面的潜力¹⁾。读者也许对下述情景并不陌生:

一架飞机停在跑道上,飞行员按照塔台指令点火、加速滑行,周围景物不断向后退去,……“达到起飞速度!”“起飞!”飞行员猛拉操纵杆,飞机昂首向上冲去。但因用力过猛,飞机先是陡然摇摆着向上提升,然后由于迎角过大导致失速又摇摆着下坠,瞬间摔在跑道旁边的绿地上,只听轰然一声巨响,火光冲天……一起机毁人亡的悲剧性事件。

然而读者不必担心,上述只是在飞行模拟器中发生的一幕。飞行模拟器是用于在地面上训练飞行员的装置。一个地面上的飞机座舱,在计算机的控制下,通过电子和机械手段,使人在飞行模拟器中看到的和感觉到的就象在真实的飞行中一样,可以尝试作任何感兴趣的项目的飞行,犯错误的飞行员还有改正错误的机会。用飞行模拟器进行训练,以其成本低,安全性好和周期短,已成为初级飞行训练的必要手段。当今的飞行模拟器已发展成为综合了多种高技术的复杂而昂贵的装置。从技术演进的角度看,似乎可以说早期飞行模拟器的成功实践孕育了我们现在称之为虚拟现实这一技术概念的雏形。

今天,到过位于美国加州迪斯尼乐园的人,会对称为 Spaceshuttle 的展示厅留下深刻的印象。在那里,观众被邀请参加一次惊险的“宇宙旅行”。随着机器人宇航员的指令,“飞船”发射并逐渐加速,直至以光速或超光速飞行。在“飞船”座位上身系安全带的乘客可以听到发射时的轰鸣声,感受到发射时的振动,通过巨大的视窗可以看到浩瀚的宇宙空间,感

1) Special Issue on Virtual Reality, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol 1, 1994

觉到“飞船”加速减速时惯性力导致的超重、失重效应，并且不时为“飞船”可能与遨游在宇宙当中的众多的小行星或宇宙碎片相撞而心惊胆战，唏嘘声一片。在听觉、视觉和触觉等的综合刺激下，观众已完全进入了角色，仿佛真的穿行在宇宙当中而全然忘却了自身的存在。造成这种强烈的逼真效果的有效手段就是虚拟现实技术。

这一技术的基本涵义是利用计算机在其内部构造一个“人造”的世界，并借助计算机图形学等技术手段，与这一世界发生相互作用。在一个典型的虚拟现实环境中，操作者通过一种头盔式显示装置看到一个虚拟的、虚构的空间，并可以转动头部以观察该空间的不同部分，在该空间行走，直接抓取物体或通过手势及声音发出指令等等各种与人在真实的三维空间的举动相类似的行为。虚拟现实技术的一个起源是远程操作（teleoperation），即在人无法到达或有危险的地方使用机器人，而人则在一个（由机器人的感知装置提供的）与机器人所在环境相同的虚拟环境中控制机器人进行操作。

本质上说，虚拟现实并不是一门全新的技术，而是多种已有科学技术的综合和扩展。这些技术包括计算机图形学、机器人学、人机工程学、机械学、控制理论、认知科学等等。因为现有的技术不能满足虚拟现实的研究与应用的需要，虚拟现实也推动了这些学科的发展。虚拟现实是计算机科学中发展变化最快的领域之一。

目前，头盔式显示是虚拟现实环境的关键部分，它使操作者与现实世界隔离并呈现给操作者一个虚拟世界。为了使操作者有“身临其境”的感觉，显示装置必须以每秒 24 帧左右的速度向操作者提供连续图象。因此，在复杂场景下，高速绘制图形的能力（主要是图形硬件）是必需的。目前真正满足需要的硬件（如飞行模拟器所使用的设备）都是专用的，仍十分昂贵。图形，特别是具有真实感的图形生成速度是虚拟现实走向进一步实用化的关键所在。在软件算法、人机交互技术方面的研究，也迫在眉睫。

另一个方面，虚拟现实是人与计算机人机交互技术发展的必然。人与计算机之间的通信机制人机界面从借助纸带、卡片发展到字符终端再到今天的图形用户界面（GUI），目的就是让使用者以尽可能直观、直接而自然的方式进行操作，使数据，即计算机内部的世界，尽可能直观地呈现在操作者面前。人使用计算机，就是通过人机界面观察和操纵屏幕背后的世界。随着虚拟现实技术的出现，使人机界面从二维扩展为三维，人能够直接“走进”问题空间，人机界面也将随之走向淡化、透明，它尽管必然存在，但操作者已不再明确地感觉到它。人们依靠这一技术，在人造的环境中充当“上帝”的角色。

虚拟现实技术具有广泛的潜在应用领域。早期的应用主要限于飞行器、汽等的模拟驾驶训练等方面。已有系统用于其他方面的教育、训练及大众娱乐，如医学教育、滑雪等。其他如在建筑设计上，用于方案论证阶段在建筑物内部的考核比较；在由航天器提供数据所生成的星球表面进行考察；在抽象的数据空间的可视化漫游等。虚拟现实技术已经导致了巨大的经济效益，其进一步的发展，可能改变人类的教育、职业训练以及社会生活的众多方面。

除了高质量的图形图象处理手段之外，如何提供反映真实的物理世界规律的反馈信息是众多应用的关键所在。例如，为扫描隧道显微镜（STM）设计的应用虚拟现实技术的人机界面可为化学或材料科学家提供纳米级的操作，以控制对诸如硅等表面的修改。而将原子之

间的作用力反馈为适合于人类操作的机械力,涉及到一系列的因素.一般地,虚拟世界与真实世界的对应,正引起人们的极大的兴趣.由于人类的认识和经验一直基于我们置身于其中的现实空间,一个未知的有待探索的世界已经呈现在我们的面前.

3 并行处理时代的图形学

并行计算机是当代计算机硬件的发展方向之一.并行机的思路在于不是花很大代价去提高单个处理器的运算速度(尽管这是必要的),而是使多个处理器集合在一起并使之同时工作,从而达到整体的高速度.因此,并行机相对于传统的超级计算机提供了性能价格比更高的计算资源.对并行机来说,关键在于其所运行的程序、算法是否可以很好地利用各个处理器同时工作^{1),2)}.

从理论上说,现代计算机可分为单指令单数据流(SISD)、单指令多数据流(SIMD)、多指令单数据流(MISD)和多指令多数据流(MIMD)4种. SISD计算机就是通常的串行计算机. MISD类型的计算机目前还不存在. MIMD和SIMD计算机都是并行机.前者包括Thinking Machines的CM-5, Intel的Paragon, Kendall Square Research的KSR-2, Cray的T3D等;后面一种类型的机器比较少,如MasPar的MP-2.另外,工作站集群(workstation cluster,即联网的工作站)从概念上讲相当于一个分布式内存的MIMD并行机.从存储器角度讲,并行机可分为共享存储器 and 分布式存储器两类.前者是各处理器使用同一块内存,而后者则是各处理器具有独立的局部存储器.现有的PVM(parallel virtual machine)等软件包就是在联网的工作站上构造一个虚拟的并行机环境,使分布式程序的开发完全是网络透明的.由于工作站集群大量存在,这类软件包的出现将大大推动并行算法的研究和普及.

如上所述的科学计算可视化和虚拟现实等技术均要求快速的图形处理与显示.并行处理时代的图形学或者并行图形学的研究主要集中在对MIMD并行机的应用上.图形学算法的并行化就是要使传统的图形学算法在并行计算机上的实现充分发挥并行机的能力.与一般并行计算所关心的问题类似,并行计算机图形学主要研究:

(1) 数据分配问题.即如何在分布式内存的并行机中使数据分布在各处理器上,以最大限度地减小处理器之间通讯的开销和避免信道拥塞.当然,如果各处理器的局部内存都足够大,可以容下整个计算所需的数据,这个问题就不存在了;另外,对于共享内存的并行机这个问题也是不存在的.

(2) 任务分配问题.即如何使每个处理器尽可能满负荷地并行工作.换言之,即如何使计算负载均衡地分布在各处理器上,避免一些处理器计算不完而另一些处理器却处于空闲等待状态等情况.

(3) 如何提高加速比.加速比即单处理机计算时间和并行计算时间之比,它是衡量并行计算效率的常用标志.加速比的提高是通过数据分配和任务分配算法的改进来实现的.

传统的图形学中的经典算法的并行化已成为并行图形学中活跃的研究领域.例如:

1) Special Issue on Scientific Computing, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol 1, 1994

2) Special Issue on Parallel Rendering, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol 1, 1994

(1) 并行的光线追踪算法. 光线追踪 (ray tracing) 是真实感图形显示中最重要最基本的技术之一. 它模拟光的传播、反射等的规律, 计算一个场景中各个光源和物体间相互作用对显示屏幕上像素的视觉参数即最终显示结果的贡献. 它的主要问题在于计算量太大: 穿过观察点与感兴趣的视区内的像素相交的任一条光线, 在衰减到可以忽略不计之前可能与大量景物求交点, 导致图形的生成非常缓慢. 但是, 由于每个像素的计算是独立的, 光线追踪方法可以比较容易地并行化, 成为最早在并行机上实现的图形学算法之一. 最简单的做法就是将图象平面分割成等大小的子区域, 然后把子区域的计算交给不同的处理器并行进行, 并汇总成最终结果. 对于分布式内存的并行机, 这一简单方案要求各处理器都拥有整个景物数据的副本. 但如果数据超过处理器局部内存的大小, 则只能将数据分布在各处理器内存中, 并利用处理器间的通讯机制完成数据的传输.

(2) 并行的等值面抽取. 在科学计算可视化等的技术中, 等值面抽取是提取信息的有效手段. 最常用的方法是 Marching Cubes 算法, 该算法对数据网格上的单元依某一设定值的遍历导致等值面的产生. 由于对每个单元的处理是相互独立的, 所以可很好地并行化. 一般是将体数据 (volume data) 分割成若干块, 分配给各处理器分别抽取等值面, 然后将结果汇总. 需要注意的是, 对依靠单元间相关性的 Marching Cubes 改进算法 (如 anti-ambiguity), 计算将在数据子集的边界上出现问题. 但这并不难用使数据块有所重叠的方法加以解决.

(3) 并行的体绘制 (volume rendering). 体绘制过程就是体数据的各单元对图象的贡献的顺序叠加过程. 因此自然可以想到将体数据分成几块分别进行绘制, 然后对结果进行顺序叠加. 这正是并行的体绘制算法的一般思路. 进行并行的体绘制时, 必须注意对数据的采样应该对整个数据体是均匀的, 而不是仅仅在各块内部是均匀的, 否则块边界上就会出现可见的伪面. 另外, 近期的研究表明, 在一个处理器上对各结果图象进行叠加的时间消耗对更高的交互性要求来说是不可忽略的, 所以叠加过程也必须并行化.

上述并行算法的研究仅仅是这一新的研究方向的开始. 网络与并行环境为计算机图形学的发展开拓了全新的视野, 完全基于并行机制的算法或过程的研究激励着人们新的探索.

综上所述, 今天的计算机图形学作为新兴的高技术之一已形成特有的框架, 它已不仅仅是单一的学术分支, 而是一个具有广泛应用范围和影响的、在信息科学相关学科中发展最为迅速的领域之一. 作为科学研究、工程设计与计算或者一般地作为概念表达的一种基本工具或手段, 计算机图形学被称为科学技术之眼毫不过分. 它日益受到全球科学界和工业界的重视, 从理论研究成果到实际工业产品的周期在缩短. 对其基本技术的掌握已成为衡量一国信息处理能力的标志之一. 高性能的图形图象的支持环境已成为科学研究的必要条件. 现代计算机图形学的发展同其他相关技术一起, 已使模拟或仿真作为与理论证明和科学实验相并列的科学研究的三大基本手段.

参 考 文 献

- 1 Foley J, van Dam A, Feiner S K *et al*. Computer Graphics—Principles and Practice. USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1990
- 2 McCormick B H, DeFanti T A, Brown M D eds. Visualization in Scientific Computing. ACM Siggraph Computer Graphics, Vol 21, 1987