

# 分布式图形处理的研究与发展\*

潘志庚 石教英

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室 杭州 310027)

**摘要** 分布式图形就是在分布式系统上研究计算机图形的生成,是分布式系统与计算机图形学结合的产物.本文结合作者的研究工作对分布式图形中的研究内容(并行处理模型、支撑环境、分布式图形算法、分布式图形语言和图形库等)进行了概述;讨论了分布式图形在动画制作、科学计算可视化、多媒体和虚拟环境中的应用,在此基础上对分布式图形的发展进行了展望.

**关键词** 分布式图形,多媒体,虚拟环境,分布式图形语言,限时计算.

## 1. 分布式图形的产生

解决复杂图形应用问题(如光线跟踪、体数据绘制、三维动画、导航系统)的一种行之有效方法是把问题划分为可以并发执行的若干子任务,并使它们并行执行.由于网络技术、图形压缩技术、绘制技术的发展,高速网和高性能工作站的出现,特别是网络分布式窗口系统的产生,使得很多以前只能用并行机才能得到满意解的问题,现在可以用一个连网的计算机系统来解决.<sup>[1]</sup>

计算机用于图形处理经历了以下几个阶段<sup>[2]</sup>:(1)批命令方式图形处理(1960~1970s);(2)主架机上的交互式图形(通过终端)(1970~1980s);(3)在个人机或工作站上的交互式图形(1980s);(4)基于计算机系统网络模型 Client-Server 的图形应用(1990s).

分布式图形和 CAD 系统研究最早开始于 1981 年,由于受当时的条件限制(硬设备价格、网络传输速度等),研究成果较少.随着硬设备价格的降低、高速网以及网络编程环境的出现、人们对计算机图形生成的实时性、交互性要求的增加,为了满足动画和实时性的需求,人们在计算机网上开展了很多图形、图象处理方面的研究工作.<sup>[3~10]</sup>

由于分布式系统能够提供更多的存储空间、更强的计算能力和资源共享,因而得到了广泛应用.在 1989 年的 SIGGRAPH 会议上有一个专题讨论会,正式提出分布式图形(Distributed Graphics)这一术语<sup>[11]</sup>,之后即形成了独立的研究方向.分布式图形就是在分布式系统上研究计算机图形的生成和显示,是计算机图形学和分布式系统的有机结合.

## 2. 研究意义

\* 本文研究得到国家自然科学基金和浙江省自然科学基金资助.作者潘志庚,1965 年生,副研究员,主要研究领域为分布式图形,虚拟环境,多媒体.石教英,1937 年生,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机图形,CAD,科学计算可视化,虚拟环境和多媒体.

本文通讯联系人:潘志庚,杭州 310027,浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室

本文 1995-11-27 收到修改稿

在图形加速研究中,用并行机(如Cray,Aliant或银河机)对一般的用户来说代价太大,另外由于这类并行机往往以分时方式工作,对某些交互性要求和响应要求较强的图形应用,则不适于在这类并行机上运行.一种解决办法是用1台工作站与并行机相连,大量的计算由并行机来完成,而交互操作和图形显示则在工作站上进行.

另外一种提高图形生成速度的方法是使用专用图形硬件,Los Alamos国家实验室的Dick Philips<sup>[11]</sup>认为对大多数图形应用而言,专用硬件是合适的,对交互式图形的实用化起了很大的促进作用,但是专用图形硬件并不能解决所有的问题,对于研究专用绘制技术和大规模仿真型的应用而言,专用图形硬件的效果则不明显.

在计算机网(典型情况如工作站网)上进行图形和CAD系统的加速研究,优点在于:(1)充分利用网上空闲的计算能力;(2)不增加额外的硬件开销;(3)图形设备、信息的共享.

### 3. 分布式图形处理系统的分类

在分布式系统上进行图形应用的编程有4个主要原因:①降低单个图形计算操作的时间;②增加可靠性和可用性;③使系统的某些部分可提供专用功能(如打印服务器、图形服务器);④应用本身具有分布特征.根据上述4种要求,从而产生4种不同类型的分布式图形系统:(1)并行、高性能图形应用系统;(2)容错性图形应用系统;(3)提供专用服务的图形应用系统;(4)具有地理分布特性的图形应用系统.

## 1 分布式图形的研究概况

分布式图形处理作为一个新的研究方向,一方面分布式图形处理系统是一种特定的分布式系统,另一方面分布式图形系统在本质上又是一种图形系统,以图形的高速生成成为主要目标.它有自己的特性,如计算量大,有交互性要求,通信量大(有时需在网上进行图象数据的传输)等,因此既不能把它作为一般的分布式系统,也不能把它作为简单的图形系统,有必要把分布式系统与计算机图形学结合起来进行研究.

### 1.1 图形处理系统中的并行性

#### (1) 并行粒度

为了满足人们对图形生成速度的要求,可采用多种方法或结构,无论哪种结构都或多或少地利用了图形生成过程中的内在并行性.如果要有效地进行并行计算,那么相应的算法中必须有同一计算的多次重复,或者算法中的不同任务可以在很少协调的情况下完成,而绝大多数计算机图形任务能满足这一要求.

对图形生成任务而言,可以用粒度来衡量,细粒度的任务可以是绘制单个象素,而粗粒度的任务可以是完成一图象块的绘制工作或产生一给定物体(对象)的所有象素.图形计算任务可由下面一个或多个项目组成:象素或象素组;顶点或控制点;多边形;面片;对象或子对象;帧或子图象.

#### (2) 图象空间并行/对象空间并行

图象空间并行是用得最普遍的,优点是进程之间的通信量最小,缺点是图形相关性丢失,并且某处理器所完成的计算有可能多于其它处理器,从而降低整个程序的速度,对象空间并行对于那些只需很少通信就可完成的任务是比较合适的.

在把图形算法分布到多个处理器上运行时,经常会带来一些额外的计算,例如,当使用

图象空间并行时,每个处理器通常需要对图象按它所赋的子区域边界进行裁剪.另外,许多图形算法通过充分利用相关性来提高效率,但是,当把图形算法并行化或分布化时这种相关性将会减少.

### 1.2 分布并行处理模型

在进行分布式计算时,必须有支持任务分布处理(或远程执行)的计算模型.常用的分布处理模型有 Client-Server 模型、Master-Slave 模型、Supervisor-Worker-Collector<sup>[10]</sup>模型.

Client-Server 模型是一种使用很广的计算模型,已成为很多分布式系统的基础.著名的网络分布式窗口系统 X 和 NeWS<sup>[12]</sup>都基于这种模型.它类似于一般的过程调用,所以比较直观,易于为程序员或用户接受,特别适合于构造提供多种特殊服务的分布式图形系统.

Master-Slave 模型中,由 Master 负责任务的分配,而 Slave 完成子任务的计算工作.该模型中有 2 种类型的进程,单个的 Master 中维持有全局数据结构并负责任务的划分和分配,而 Slave 完成子任务的计算工作,并把结果返回给 Master,在必要时 Slave 之间还可以进行通讯.与 Client-Server 模型相比,该模型具有更大的灵活性;除了支持任务级并行系统的实现外,还支持算法级并行系统的实现<sup>[13]</sup>;坚定性好,容易使负载均衡.

为了解决通讯量大可能会带来的瓶颈问题(Master 既要负责任务划分和分布,又要负责结果收集),我们对上面的 Master-Slave 模型进行扩充,形成了 Supervisor-Worker-Collector 模型<sup>[1]</sup>,Collector 用于收集计算结果.该模型除了继承了 Master-Slave 模型的所有优点外,还使得任务分配和结果收集分开,进一步提高了计算速度.

### 1.3 分布式图形处理支撑环境

X 和 NeWS 把窗口系统推向异种机组成的网络,使得一个应用程序的计算工作和图形显示工作可在不同的机器上完成,例如可以把复杂计算任务用网上的主机完成,而图形显示在用户所用的工作站上,从而加快图形生成的速度.X 和 NeWS 的出现大大方便了分布式图形应用系统的开发.PEX<sup>[14]</sup>是对 X 进行扩充而得,它支持 PHIGS+ 的绝大部分功能,从而使 X 窗口系统具有三维图形支持.Gary Bishop 等人开发了基于 Sun 工作站和 TACC-1 加速器的多机可视化环境.<sup>[15]</sup>

浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室开发的分布式图形处理支撑环境 DGPSE<sup>[10]</sup>支持多种计算模型,主要功能包括:分布处理功能和图形处理功能.另外,它还提供空闲机自动查找和一定的调试设施.基于 DGPSE 的应用包括一组分布式图形算法<sup>[8,16]</sup>和一个分布式体素造型系统 D-TORUS.<sup>[13]</sup>

上述这些环境都是面向图形处理的,它们提供或强或弱的图形功能.除此而外,使用一些通用的并行程序设计环境(如 PVM<sup>[17]</sup>)进行分布式图形应用软件或算法的设计也是一种简单可行的方法.事实上,我们已对 PVM 的结构进行了详细分析,用 PVM 实现了分布式并行光线跟踪算法,当场景中物体较多时,加速比接近线性.进一步的研究工作包括为 PVM 增加一个并行图形库.

通用并行程序设计环境要求设计分布式图形应用的用户对分布式程序设计和计算机图形学都要有较深入的了解.另外,当要传送的图形或图象数据很大时,底层通信机制可能会出现效率比较低.

### 1.4 分布式图形算法

为了追求高度真实感的人工合成画面,研究人员提出了一系列光照明模型和绘制方法.复杂的图形生成方法需要更加快速的计算能力,然而,现有的计算机系统不能提供如此快速的运算能力,这时就必须设计并行或分布式图形绘制算法.下面以光线跟踪和辐射度绘制为例进行介绍.

### (1) 分布式光线跟踪算法<sup>[18~20]</sup>

光线跟踪算法可以产生高质量的图形,但是它所需的计算量也很大.在并行机或计算机网络上研究并行光线跟踪算法一直是热门课题. Provim 系统<sup>[19]</sup>是台湾清华大学计算机学院开发的一个分布式光线跟踪系统,该系统使用 PVM 实现,运行于由 Sun Sparc, RS-6000 和 DEC 工作站组成的网上.

### (2) 分布式辐射度绘制算法<sup>[7,16,21]</sup>

辐射度算法是另一种生成真实感图形的方法,因为该算法的计算量大,自从该算法诞生以来,人们一直在研究加速辐射度方法生成图形的速度.一种重要方法是利用并行性,把图象生成任务进行划分,由多个处理机共同完成,从而达到加速目的. Daniel R. Baum 在 9 台 HP 835 相连的工作站网上进行辐射度算法研究,使得复杂图形生成达到实时效果.<sup>[7]</sup>德国 FhG-IGD 的 Jose Encarnacao 等人在由超级计算机和工作站组成的网络上实现了分布式辐射度绘制算法.<sup>[21]</sup>

### (3) 任务划分和分布方法

在分布式图形算法的设计和实现过程中,一个关键问题是任务的划分和分布方法.<sup>[1]</sup>在使用图象空间并行的系统中,一种简单的任务划分方法是把图象空间划分为若干个小块,我们把这种划分称为是规整划分. Scott Whitman<sup>[22]</sup>提出一种非规整划分方法,即根据场景复杂程度,把图象空间分为多个大小不同的块,小的块包含的场景密,而大的块包含的场景疏.这种划分方法易于使不同的处理机承担近乎相同的工作量, Provim 系统使用的就是这种方法,其中的任务块可以是  $32 \times 32$ 、 $16 \times 6$  或  $8 \times 8$ .

任务分布分为静态和动态 2 种.静态分布有一定的盲目性,而动态分布的效率.事实上,很多并行分布式图形算法都是使用动态分布策略.我们把动态分布策略分为 3 类<sup>[1]</sup>:自然负载平衡法、成组任务发送法和混合调度法.文献[20]中介绍的分布式并行光线跟踪算法使用的任务分布方式为自然负载平衡法;而文献[16]中介绍的分布式辐射度方法则使用成组任务发送法和混合调度法,取得了较好的效果.

## 1.5 分布式图形库

为了方便用户开发分布式图形应用,并把分布式程序设计、任务划分、负载平衡等细节隐藏起来,可使用分布式图形库.<sup>[23~25]</sup>SGI 工作站上的分布式图形库 DGL<sup>[23]</sup>是具有代表性的一个,在连网的 SGI 工作站上,运行于用户机上的图形程序可以调用位于其它机器上的图形库函数,例如在本地机上完成计算,远程机上完成显示,或者相反.若利用多台图形服务器,则可以满足一些特殊应用的要求(如超高分辨率显示、不同视图等).

在文献[24]中,Ohio 州立大学的研究人员在由 200 台 Sun SLC 工作站组成的网上实现了基于 Socket 的、具有容错性的分布式图形库系统(DGLS),供用户实现分布式绘制程序调用. DGPSL<sup>[25]</sup>是本文作者在工作站网上实现的一个分布式图形库,它由 2 部分组成,即分布式串行库(类似于 DGL)和分布式并行库.该库能自动查找空闲处理机,进行并行图形绘制

操作.与 DGL 相比,它具有更高的并行性,DGL 并不支持算法级并行;与 DGLS 相比,DGP-SL 具有更大的灵活性,没有太多的限制,用户象调用传统图形库那样调用其中的并行图形绘制函数,原有的程序仅作很小的修改即可在分布式系统上运行.

### 1.6 分布式图形语言

支持分布式应用系统开发主要有 2 种方式,①基于分布式操作系统(或分布式处理支撑库),使用顺序语言编程,前面介绍的 DGPSE 就属于这一类.②是分布式语言.第 2 种方法就是使用包含所有用于表达分布式程序的结构的语言.这种方法主要有 2 大优点:

- (1)使应用程序员不必考虑操作系统和硬件结构联结情况;
- (2)使用更高级的、更抽象的分布式系统模型,应用程序员易于编程.

分布式程序设计语言的种类很多,然而专门用于支持图形应用开发的分布式语言却不多见.浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室在这方面进行了开创性研究,设计并实现了分布式图形程序设计语言 DGLa<sup>[26]</sup>,用于支持分布式环境下的图形程序设计.

## 2 分布式图形的应用研究

分布式图形处理技术已获得广泛的应用,应用的领域包括动画制作、科学计算可视化、多媒体、虚拟环境等,本节将就这些典型的应用领域作较为详细的介绍.

### 2.1 动画制作

用计算机进行动画或电影制作是一个极费时的操作,因为所有的动画图象帧都要用高质量和较高的分辨率生成.根据动画的复杂性不同,一段计算机动画往往需要几天、几个星期,甚至几个月.所以很早就有研究人员利用计算机网络来在多个计算机上同时生成不同的动画图象.其中著名的系统有 UCLA, BRL, XPRender, NetDESIRE, VESA 等.<sup>[27~29]</sup>

UCLA 系统使用 Locus 操作系统,运行于 10 台 VAX 机器上. BRL 是美国 ABRL 实验室开发的一个系统,能充分利用多台主架机和超级巨型机上的空闲计算资源.整个动画制作工作被划分为若干子任务(这里的子任务单位是一个帧中的一小部分,如 3 根扫描线),把子任务送给工作机完成.该系统有一个集中控制器用于协调各个工作站的制作. NetDESIRE 是在德国 FhG-IGD 开发的一个具有容错性的动画制作环境,该系统运行于一组工作站上,当网上有部分工作站出错后,系统仍能继续运行.<sup>[27]</sup>

上述这些系统中的大多数只支持任务级并行,而不是算法级并行,尽管它们简化了任务的划分和调度,但未能充分利用底层分布式系统的功能.为克服这个缺点,文献[28]中使用 Supervisor-Worker-Collector 模型,提出基于对象空间划分的分布式动画绘制系统的设计方法,从而充分利用了分布式系统的并行性.

### 2.2 科学计算可视化(VISC)

由于有较强交互性和图形功能的工作站并不提供足够强的计算能力,而有很强计算能力的超级计算机却不能把可视结果呈现在用户面前,解决这个问题的有效方法是进行分布式计算.<sup>[30,31]</sup>文献[30]中把可视化硬件平台划分为 4 类:(1)超级计算机-图形终端模式;(2)工作站模式;(3)工作站网络模式;(4)超级计算机-工作站网络模式.其中,后 2 种分布式硬件平台用得比较多,常把这 2 种模式上的科学计算可视化称为是分布式科学计算可视化(DViSC). DViSC 的研究又可分为环境、系统和算法等 3 个主要方面.

(1)环境 由于 ViSC 要处理大量的数据,对计算资源和存储器资源要求较高,因此很多可视化环境都是基于连网的计算机系统,典型的例子有 apE.<sup>[5]</sup>apE 是 Ohio 州立大学超级计算机中心研制的分布式可视化环境,运行于一包含 Convex, Cray X-MP/24 和多台工作站的网络上. apE 的 2 个主要特征是:①数据流模型;②分布计算. apE 环境能恰如其分地利用各种计算资源,局域网中的每台机器都各尽其用,从而减轻超级计算机的工作负荷(在传统的批处理方式下,超级计算机往往超负荷工作). 利用 apE 已构筑了多种分布式可视化系统.

(2)系统 DVISC 系统的一个例子是美国 Wisconsin 大学空间科学与工程中心开发的分布式多维数据可视化系统 VIS-5D.<sup>[31]</sup>分布式 VIS-5D 系统运行于连网的 GS-2000 工作站和超级计算机上,用户使用它可交互式观察和处理的最大数据集为  $10^{10}$  个网格点,从而解决了大数据量的可视化问题.

(3)算法 可视化系统中用到有一些算法(如体绘制、等值面构造等)都是很费时的,原因之一要处理的数据量大. 要达到实时处理,常使用分布式并行处理.<sup>[8,9,32~34]</sup>体绘制是一种需要大量计算的可视化任务,目前的单处理机图形工作站远远不能达到这个要求. 解决这个问题一个方法是在多个工作站上进行体绘制(把工作站网用作并行机),从而加快绘制速度. 除了速度以外,还有一个存储量的问题(内存、磁盘空间),对于交互式的体绘制而言,不仅需要保存要被观察的数据集,而且要保存象表面法向量、属性图之类的信息. 我们在 Sun Sparc 工作站网上实现了并行体绘制算法.<sup>[8]</sup>

### 2.3 多媒体

分布处理能力和多媒体信息处理能力是新型信息处理系统不可缺少的 2 个重要特性,因此应把这 2 个领域的研究结合起来进行. 从实用方面讲,分布处理有效地解决了多媒体系统的 2 个难点(存储量大、要求计算速度快),因此分布式环境下的多媒体系统将可以达到实用化程度. 分布式多媒体系统是分布式图形的典型应用,种类包括多媒体电子邮件、视频会议系统、分布式协作 CAD 系统、远程计算机辅助教学系统等. 在分布式协作 CAD 系统中,多个设计者通过网络进行协作,共同设计,从而大大提高设计的效率.

多媒体系统建立在分布式系统上的主要原因,是多媒体技术本身的特性所奠定的,它强调信息共享,而上面提到的动画制作以及科学计算可视化建立在分布式环境之上的主要原因是计算能力共享,充分利用分布式系统的并行计算能力.

### 2.4 虚拟环境(VE)

虚拟环境<sup>[35]</sup>对实时性、交互性有更高的要求,其中很多计算工作只有超级并行机(如 Pixel-Plane)才能胜任,然而这类机器对一般的研究人员并不可用,如何在现有的条件下充分利用连网的图形工作站来进行虚拟现实方面的工作是值得研究的课题.

在 VE 中,一个典型问题是在头盔式显示器的左眼显示区和右眼显示区同时显示 2 幅从不同视点观察得到的图象,可以用 2 台或多台工作站同时来生成. 另外对于 Walk-through 类的应用,可根据操作员行走的方向推断出下一步及以后的行走方向,使用保存的场景信息在多个工作站上计算出多幅场景图,随着操作员的移动,选择适当的场景到头盔显示器中进行显示.

虚拟环境建立在分布式系统之上有 2 方面的原因:一方面,虚拟环境是一种实时图形系

统,需要强有力的计算能力,可由分布式环境提供;另一方面,虚拟环境的一个典型应用是游戏,而多人游戏必然要求相应的软件系统能运行在计算机网络上.文献[36]对网络虚拟环境的有关技术进行了较详细的讨论.典型的分布式虚拟系统有 VR-DECK<sup>[37]</sup>和 DIVE 等.<sup>[38]</sup>

### 3 分布式图形技术的发展展望

分布式图形随着高速网的实用化和人们对绘制高质量图形以及快速生成图形要求越来越高,将会得到人们的重视. SIGGRAPH 和 SIGCOM 2 个组织自 1990 年开始,每年联合举行一次关于图形和网络的讨论会<sup>[39]</sup>;在 1991 年 7 月的 SIGGRAPH 会议上,也对“Computer Graphics in the Network Environment”进行了专题讨论;而在国际分布式系统大会上,把“分布式多媒体系统”作为主要内容.分布式图形将会在以下几个方面得到发展:

- (1)使用面向对象方法开发分布式图形系统;
- (2)限时计算和限时图形绘制技术<sup>[40]</sup>;
- (3)分布式图形的标准化;
- (4)分布式图形算法和系统的性能分析和评价;
- (5)构造分布式图形应用的高层机制的研究.

### 4 结束语

本文对分布式图形处理的产生、发展、研究概况和应用进行了较为全面的讨论,并对分布式图形处理技术的发展进行了展望.

目前,我们正在进行的工作包括分布式环境下限时图形绘制技术、分布式科学计算可视化、分布式虚拟环境构筑平台和分布式协作 CAD 等.把限时计算、分布式处理和面向对象的程序设计方法结合起来进行研究,是我们进一步的研究目标,相信不久即可取得令人满意的结果.在此基础上,构造新一代分布式图形应用系统,进而促进分布式图形学的发展.

**致谢** 在本课题研究过程中,浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室彭群生教授、中科院软件所吴恩华研究员和德国 FhG-IGD 图形学研究所 Dr. Fan Dai 为作者提供了资料.另外,文中涉及到的有关我们自己取得的分布式图形研究成果是多人合作的结果,参加相关工作的有徐丹、劳志强、张爱东、郑文庭、许渺等,在此一并表示感谢.

### 参考文献

- 1 潘志庚. 分布式图形处理的理论与应用研究[博士论文]. 浙江大学, 1993.
- 2 Boniwell S. A network solution for graphics application. In: Computer Graphics 87, on Line Publications, 1987. 73~81.
- 3 Nichol B G. An object-oriented interface for network-based image processing. In: Magenat-Thalmann N ed., Proceedings of CG International 88, 1988.
- 4 Sulonen Reijo *et al.* PIPEMATIC: a distributed system for the design of geometry tight piping structure. EURO-GRAPHICS'83, 1983. 233~264.
- 5 Anderson H Stephen. Distributed supercomputer graphics using Unix tools. In: Proceedings of the USENIX Workshop on Unix and Supercomputer, 1988. 25~32.

- 6 Crow F C. A more flexible image generation environment. *Computer Graphics*, 1982, 16(3):9~18.
- 7 Baum Daniel R *et al.* Real time radiosity through parallel processing and hardware acceleration. *Computer Graphics*, 1990, 24(2).
- 8 潘志庚, 钱喜武, 石教英. 分布式并行体绘制算法的设计和实现. *小型微型计算机系统*, 1994, 14(5).
- 9 Zhang Hansong, Li Hua, Liu Shengquan. Parallel volume visualization. In: *Proceedings of International Workshop on VR and ViSC*, Hangzhou, 1995.
- 10 石教英, 潘志庚, 何志均. 分布式图形处理环境 DGPSE. *软件学报*, 1994, 5(11):1~5.
- 11 Dick Philips. Distributed graphics: where to draw the line? In: *SIGGRAPH'89 Panel Proceedings*, 1989.
- 12 Sun Microsystems. *Open Windows User's Guide*. 1989.
- 13 潘志庚, 石教英. 分布式体素造型系统 D-TORUS. *工程图学学报*, 1994, (1):48~53.
- 14 Randi J Rost *et al.* PEX; a network-transparent 3D graphics system. *IEEE Computer Graphics & Application*, 1989, 9(4):14~26.
- 15 Gray Bishop *et al.* A visualization programming environment for multicomputer. *IEEE Computer Graphics & Application*, 1990, 10(7):50~58.
- 16 张爱东, 石教英, 何志均. 分布式辐射度绘制算法的设计. *全国第7届图象图形学学术会议论文集*, 郑州, 1994.
- 17 Cap C H, Strumpen V. Efficient parallel computing in distributed workstation environment. *Parallel Computing*, 1993, 19:1221~1234.
- 18 Didier Badouel, Kadi Bouatock, Thierry Priol. Distributed data and control for ray tracing in parallel. *IEEE Computer Graphics & Application*, 1994, 14(4):69~77.
- 19 Wang Chung-Ming, Tseng Chien-Wei *et al.* The development of a parallel ray tracing system in distributed workstation environments. *Proceedings of Pacific Graphics'94*, World Scientific, 1994.
- 20 许渺. 基于图象空间并行的分布式光线跟踪算法的研究[硕士论文]. 浙江大学计算机系, 1993.
- 21 Encarnacao Jose, Koberle George, Zhang Ning. Distributed supercomputing to achieve real-time representation and manipulation of complex scenes. *Computers in Industry*, 1989, 14:23~33.
- 22 Scott Whitman. Parallel algorithm and architecture for 3D image generation. In: *SIGGRAPH'90 Course Notes*, 1990.
- 23 SGI. *4D Sight Series Users Guide*. 1991.
- 24 Frank Adelstein, Golden Richard III *et al.* A distributed graphics library system. *Software-Practice and Experience*, 1994, 24(4):361~379.
- 25 Shi Jiaoying, Pan Zhigeng, Zheng Wenting. DGPSL; a distributed graphics library. *CADDM*, 1994, 4(2):50~58.
- 26 Pan Zhigeng, Shi Jiaoying, Hu Binfeng. DGLa; a distributed graphics language. *Journal of Computer Science and Technology*, 1994, 10(2):97~106.
- 27 Jose Mario, De Martino, Rolf Kohling. Production rendering on a local area network. *Computers & Graphics*, 1992, 16(3):317~324.
- 28 Ma Huadong, Liu Shengquan. The structure and algorithm of a distributed animation renderer. In: *Proceedings of Pacific Graphics'94/CADDM'94*, Beijing, China, 1994.
- 29 Leister W *et al.* Occursus cam NoVo—computer animation by ray tracing in a network. In: *Proceedings of CGI'88*, Springer-Verlag, 1988.
- 30 石教英, 蔡文立, 潘志庚等. 分布式科学计算可视化. *自然科学进展*, 1994, 4(6):685~692.
- 31 Terstrip Jeffrey A, Catlett Charles E. Distributed scientific visualization on high performance networks. In: *SIGGRAPH'92 Course Notes*, 1992.
- 32 Ma Kwan-Liu, Painter James S. Parallel volume visualization on workstations. *Computers & Graphics*, 1993, 17(1):31~37.
- 33 Neumann Ulrich. Communication costs for parallel volume rendering algorithms. *IEEE Computer Graphics & Ap-*

- plication, 1994, **14**(4), 49~58.
- 34 Ellsiepen Peter. Parallel isosurfacing in large unstructured datasets. In: Gobel M. ed., *Visualization in Scientific Computing*, Springer-Verlag, 1995.
- 35 石教英. 虚拟现实技术. 全国第1届虚拟环境研讨会论文, 杭州, 1994.
- 36 Wang Qunjie. *Networked virtual reality*[Master Thesis]. University of Alberta, 1994.
- 37 Codella Christopher F, Jalili Reza *et al.* A toolkit for developing multi-user distributed virtual environments. In: *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium'93*, 1993. 401~407.
- 38 Carlsson Christer, Hagsand Olof. DIVE—a multi-user virtual reality system. In: *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium'93*, 1993. 394~400.
- 39 Proms Ralph *et al.* Report from the joint SIGGRAPH/SIGCOMM workshop on graphics and networking. *Computer Graphics*, 1991, **25**(5), 260~263.
- 40 Dam Andries Van *et al.* Graphics software architecture for the future. *Computer Graphics*, 1992, **26**(2), 291~293.

## STATE OF THE ART OF DISTRIBUTED GRAPHICS PROCESSING

Pan Zhigeng Shi Jiaoying

(State Key Laboratory of CAD & CG Zhejiang University Hangzhou 310027)

**Abstract** Distributed graphics is the study on graphics processing in distributed environments, which is the product of integration of computer graphics and distributed system. Based the authors' research works, they give a brief overview of researching areas of distributed graphics. Then they discuss on the applications of distributed graphics in animation, ViSC, multimedia and virtual environment. Finally they have a forward look at the development of distributed graphics.

**Key words** Distributed graphics, multimedia, virtual environment, distributed graphics language, time-critical computing.