

# 高精度连续图像数字处理(数字电影)系统

The Continuous Image Digital Processing System with High Precision

毛希平 温冬婵 董春雷 陈曦

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

**Abstract** A total solution for Continuous Image Digital Processing System with High Precision (Digital Film System) has been introduced in this paper. The detailed information, such as the architecture, the work flow and even the construction of every part of the system, has been discussed. At last, a practical system has been given.

**Keywords** Digital film, Image processing, Cluster, Continuous frame, Rendering

八十年代末,由于数字压缩技术和计算机技术的飞速发展,高精度连续图像数字处理技术逐步应用于电影制作中。它融合了计算机、计算机网络、图像处理、数字压缩、CCD 影像转换、光盘存储等现代最先进技术,内容涉及高精度输入输出、超大数据量处理及传输、海量数据存储、计算机图像处理、艺术创作等诸多方面<sup>[1,2]</sup>。

## 1 数字电影系统的主要技术难点

1) **超大容量数据管理技术** 普通 35 毫米电影胶片要做到数字化处理前后图像不失真,效果衔接良好,其扫描分辨率应达到 4096(水平)×3112(垂直)像素/帧,为保证胶片影像丰富色彩的高保真还原,红、绿、蓝三色各以 14bit 线性取样,再依据胶片的感光特性转换成 10bit 的密度值。可以计算出,单帧数据量为 48MB,按每秒播放 30 帧计,每秒的数据量约为 1GB,40 分钟连续图像的数据量为 2400GB。因此,即使是在计算技术空前发展的今天,数字电影的信息量也远超过一般多媒体图像处理的水平。

2) **大规模并行处理技术** 数据处理能力是数字电影系统性能的主要标志之一,无论是单帧图像的交互处理还是连续帧的自动生成,都需要大量的计算。在标准配置的 O2 工作站上生成一帧图像(4K×4K)约需要 1~1.5 个小时,一个 5 秒钟的特技镜头在单台工作站上要连续运算 220 多个小时,所以通常配备一台或几台大型服务器专门用于连续帧的生成。由于大型服务器价格昂贵和机群(cluster)技术

的发展,采用高性能工作站机群系统替代服务器解决大规模并行处理问题已成为一种趋势。

3) **高深度、灰度及彩色分辨率** 胶片的感光特性与中间处理过程中计算机屏幕的显色特性有很大差别。一般 PC 机监视器最多可以显示 8bit(R)×8bit(G)×8bit(B)种颜色(真彩模式),并且 R、G、B 实际每种颜色只使用了 6 位;而数字电影系统的色彩共有 10bit(R)×10bit(G)×10bit(B)种层次。为使监视器能忠实地还原胶片的色彩,需要掌握数字影像灰度及色彩摹演技术、计算机系统与胶片扫描仪及记录仪之间数字影像最佳格式及不同格式之间的转换、灰度色度校正、彩色胶片的色彩还原技术等<sup>[3]</sup>。

4) **独特的艺术创新及其实现** 数字电影并不单纯是计算机技术,它同时还包含了大量的艺术创作,而且只有与传统电影工艺巧妙结合才能达到理想的效果。为此,必须开发功能全面的应用软件,最大限度地满足各种创意效果的要求。

## 2 数字电影系统的组成

目前世界上数字电影系统多达数十种,它们在技术配置及性能上有很大差别,但从功能上讲都由三部分构成:透射式胶片扫描输入系统、数据存储及处理系统(计算处理系统)和胶片记录输出系统,其工作过程如图 1 所示。

### 2.1 透射式胶片扫描输入系统

记录在电影胶片上的影像是光学模拟信号,该系统是将胶片图像转换为数字信号,其关键设备是

毛希平 博士后,主要研究方向为图像处理、图像重建。温冬婵 教授,主要研究方向为并行计算、机群系统。

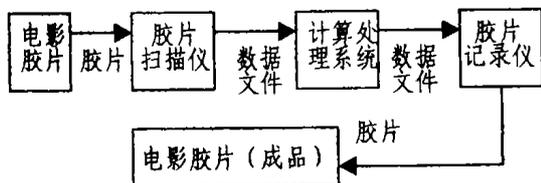


图1 数字电影的处理过程

胶片扫描仪。由于后期处理的需要,扫描仪要将胶片图像转换为 $4096 \times 3112$ 像素/帧,RGB分辨率要达到30bit/帧,因此扫描仪的质量十分重要,目前国际上的数字电影系统基本采用Kodak公司生产的Cineon系列胶片扫描仪。

扫描转换的主要手段有阴极射线管(CRT)、激光飞点扫描(LFS)、电荷耦合器件(CCD)三种,其中CCD技术应用最为广泛,CCD扫描仪具有扫描速度快、图像噪声小、色彩稳定等优点<sup>[1]</sup>。

胶片扫描仪的配套设备有高速数字网络、图像监视工作站、数据磁带设备、CD-ROM等。

## 2.2 数据存储及处理系统(计算处理系统)

计算处理系统集中了数字电影处理的全部技术及技巧,是整个系统中最核心、最复杂、技术含量最高的部分。它所使用的硬件和软件是各系统中最多的,承担着数字电影全部的处理工作。因此,计算处理系统质量的高低、功能的强弱直接影响到整个数字电影处理过程的成败。

计算处理系统主要由图像处理工作站、高速宽带网络、大规模磁(光)盘阵列等设备组成,它们的具体功能在后面详述。

## 2.3 胶片记录输出系统

将高清晰度数字图像还原为透射式电影胶片是数字电影制作中的重要环节,要保证数字影像的复制胶片与实拍胶片衔接一致,保证清晰度、颗粒度、影调、色彩、模量传递函数MTF和逼真度不变,使观众得到真实的视觉感受。

数字图像在计算机中经过合成、着色、动画设计、特技制作等处理之后,最终的载体仍然是胶片。该系统负责将计算机处理过的数字电影结果重新转化为光信号,记录到胶片上。目前的胶片记录仪从工作原理上分有激光记录和阴极射线管记录两种方式,它们有各自不同的特点<sup>[1]</sup>。

## 3 计算处理系统结构概述

如上所述,计算处理系统是整个数字电影系统的核心部分,数字电影处理的前期剪辑、素材管理、任务分配,中期处理中的三维模型生成、画面修饰、特技效果制作,后期处理中的模型合成、特技效果合

成、后期剪辑都要在这一系统上完成。

计算处理系统中用得最多的设备是各型工作站。视功能和任务的不同,中、高档工作站主要用于美工工作台和导演台,低档工作站用于磁盘阵列和磁带机的管理。图2给出了计算处理系统的结构示意图。

### 3.1 美工工作台

在计算处理系统中,美工工作台配置的工作站数目最多,功能也最复杂。它不仅供各美工人员独立操作使用,而且还要通过网络连接成并行机群进行诸如模型生成等超大计算量的处理工作,这对工作站的性能提出了较高的要求。一般采用较高系统配置的工作站,一方面可以加快美工的前台工作,另一方面还可以提高整个机群系统的效率。

### 3.2 导演台

导演台是数字电影系统中最为关键的设备之一,是整个处理系统的枢纽部分。它由特技导演或特技总监操作,负责以下几项主要工作:

(1)将影片导演的最初创意在计算机系统上得以表现,并将其分解为各个子任务,分配给各美工工作台进行详细制作。

(2)监视各美工工作台的工作进展及产品效果,使之与导演的创作意图保持一致。在这一过程中,特技导演不断地通过网络同美工人员进行数据和创作意图的交流,指导美工对自己的工作对象进行修改。

(3)利用导演台强大的硬件优势,将美工在工作台上制作的效果在2K分辨率下进行修改和润色,使之达到最终产品所需的质量。

导演台对图形和图像的实时性要求极高,通常需要实时地看到修改后的连续效果,同时要同美工工作台进行频繁的交互,数据量极大。这就要求工作平台的计算处理速度极高,图像分辨率在2000线左右,并且配有一个大容量的硬盘来存放图像文件。

### 3.3 工作站机群

在数字电影中,称美工工作台上处理的单帧数据图像文件为关键帧(Key-Frame)。主要的特技效果、三维模型都要首先制作成关键帧,当关键帧的效果审查通过后,利用计算机运算自动获得同一镜头的其他帧图像,这一工作通常称为渲染(Rendering)。由于数字电影的图像文件数据量巨大,渲染的计算量是极其惊人的,目前国际上常用的办法是利用一台或多台多CPU的服务器专门从事这一工作。

我国的数字电影制作处于刚刚起步的阶段,无论从资金到技术都与国外有很大差距。一个适合我国国情的系统解决方案是,采用工作站机群代替价

格昂贵的大型服务器进行渲染工作,这是因为:①目前流行商用软件中采用的渲染算法都具有较好的分布性,适于机群系统处理。②关键帧的处理与渲染工

作在时间上不冲突。③连续帧的生成采用“脚本+关键帧”的算法,数据之间相关性少。④机群的工作效率与服务器接近。⑤有相关的软件支持。

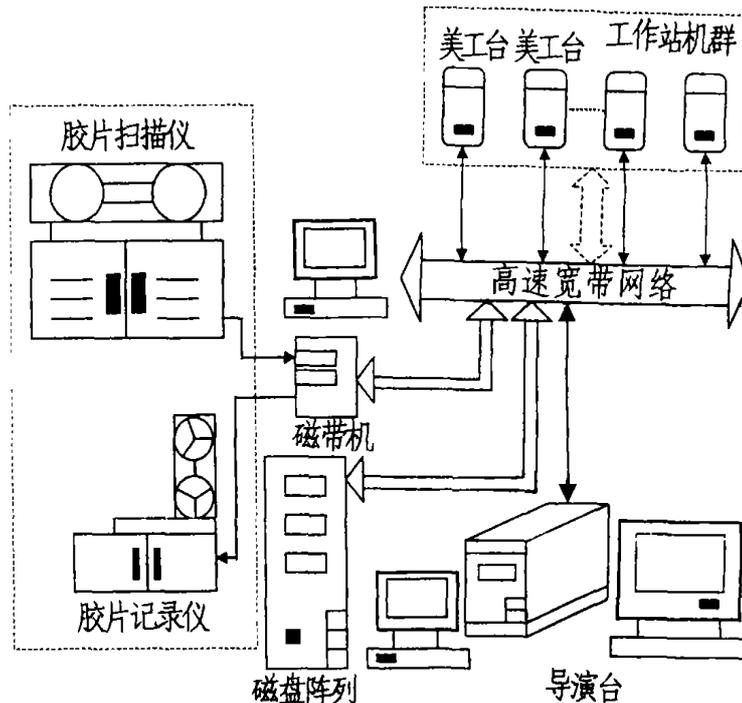


图2 计算处理系统结构示意图

### 3.4 网络及其它外设

(1)网络。它是计算处理系统中连接各个工作单元、实现各单元间通信及数据传输的主要手段,对网络的要求主要是速度和数据安全性。由于处理系统中机器数量多、分工细,因此各机器之间、机器与磁盘阵列之间的通信十分频繁,数据传输量巨大,网络速度的快慢直接影响工作进展。

(2)大规模磁盘阵列及磁带机。大规模磁盘阵列(DiskArray 或 DiskRaid)主要用来存储数字电影制作期间的所有帧图像,并通过网络传送到各个处理单元;在最后的连续帧生成阶段,也需要大量的磁盘空间存储中间结果。因此,对磁盘阵列的容量、速度、可扩展性要求较高。

磁带用来保存胶片扫描后的原始数据及许多暂时不用的资源,还可在不同地点之间传递数据。整个数字电影系统需要两台磁带机,分别置于输入输出系统处和计算处理系统处,它们各需要一台低档工作站来管理。

## 4 数字电影处理工作流程

不同的制作需求使得数字电影系统具有不同的复杂性,一般来说,以实拍景物加入三维特技效果的

制作最为复杂,它基本上包括了数字电影处理的各个环节,图3以此为例说明了数字电影的具体工作流程。

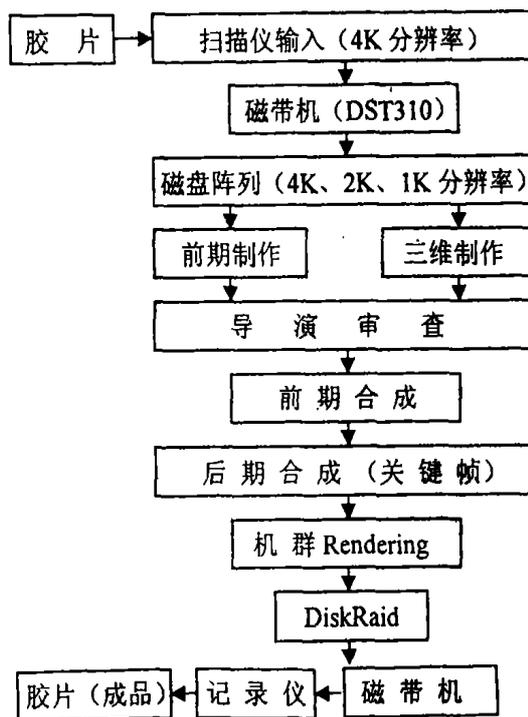


图3 数字电影处理工作流程

1) **数据文件生成** 这一过程是电影处理的第一个环节,主要工作有:①扫描清单的前期准备。②负片的前期准备。③胶片扫描仪的清洁及稳定。④将负片固定在扫描仪中,制作扫描清单。⑤配置好磁带机及预扫。⑥正式扫描及校验。

2) **前期制作** 是对扫描的结果文件进行一般性的图像处理,其内容包括:①按时序排列扫描文件。②对扫描文件进行去噪声、去划痕处理。③对扫描图像进行稳定性处理,调整画面的位置及尺寸。④参照参考帧进行调光、调色、调焦。

3) **三维模型及特技效果制作** 三维模型的制作是一个交互性很强的工作,美工通过应用软件在工作站上生成三维模型如房屋、家具、车辆等(图4),并与导演不断地交换意见,对模型进行修改。这一过程完毕之后,影片进入后期制作阶段。

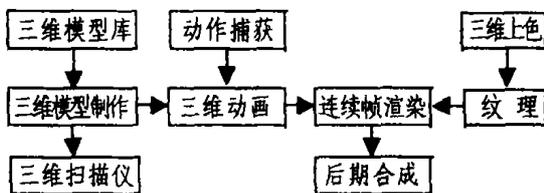


图4 三维特技效果制作示意图

4) **后期制作及合成** 是数字电影处理中最为复杂、耗时最长的工作之一。导演及美工要将计算机制作的三维模型与影片实拍场景很好地结合在一起,达到“天衣无缝”的效果;还要对影片实拍效果进行处理,提高画面质量。

这一阶段的主要工作有:①将三维模型改变尺寸,将其放置在实拍景物的相应位置上。②根据实拍景物的光线、位置、质感等特点,为三维模型加上影子、风吹等效果。③根据实拍时镜头的运动轨迹,对三维模型进行相应的角度、运动变换。④根据三维模型的运动方式,对其运动轨迹上的景物作相应变换,如凹陷、火焰、阴影等。⑤将结果画面进行后期合成,如光线矫正、色度矫正、加帧减帧、图像锐化、画面稳定、加胶片粒度等,以提高画面质量。⑥将最后结果作为关键帧保存。

5) **连续帧生成** 这里需要说明的是:为保证连续帧生成结果的一致性,在所有进行渲染工作的结点上都应使用相同的软件。此外,要对机群系统进行相应的管理,使其高效率地运行。

6) **胶片输出** 最后的成品记录到磁带上,由胶片记录仪输出为胶片。胶片记录仪的工作条件和工

作流程与胶片扫描仪大致相同,这里不再详述。

## 5 一个数字电影系统实例

SGI公司在数字电影处理技术领域一直保持领先地位,能够提供从硬件环境到应用软件的全套产品。他们生产的图形工作站以其功能强、速度快、并行处理能力强等优势被国际上大多数的数字电影系统所采用,开发的数字电影制作软件在众多同类产品中也较为优秀的。

1) **硬件平台** 如图2所示,我们采用20台配置较高的O2作为美工工作台,同时组成一个机群系统以代替大型服务器;一台超级图形工作站Onyx2(4CPU,桌边型)作为导演台;两台低档工作站Indigo2用于磁带机和磁盘阵列的管理。采用高速宽带ATM网络连接各工作单元,加上相应的输入、输出设备,一个完整的数字电影系统就建立起来了。

2) **系统软件与应用软件** 各工作台的系统软件配置如下:

- O2美工工作台:操作系统 IRIS6.3 XFS+NFS;网络 TCP/IP Windows networking ONC with NFS3.0;运行库 OpenGL、OpenGL image extensions、Image Vision Library、Digital media Library。

- Onyx2导演台:操作系统 IRIS6.4 XFS;网络 TCP/IP Windows networking;运行库 OpenGL++、3D Modeling Library。

各工作台的应用软件配置如下:所有的O2及Onyx2都安装Composer4.0(后期合成);10台O2及Onyx2安装PowerAnimator7.5(三维动画制作);2台O2安装Studio Paint 3D(模型上色)。

在研制初期,假设不需要太高质量的特技效果,每台O2处理单帧图像的时间在1.5小时左右。按如上的配置,我们的系统能够达到年加工能力不少于1200GB(相当于20分钟35毫米电影胶片的信息量)的水平。今后随着电影制作要求的不断提高,O2工作站的数目可逐步扩展为40台、60台。

### 参考文献

- 1 杨步亭,陆达. 国家重点科技项目(攻关)计划《数字电影系统及应用研究》可行性论证报告. 1997
- 2 Kenneth R C. Digital image processing. Englewood Cliffs, N. J. : Prentice Hall, c1996
- 3 Throup D. Film in the Digital Age. Quantel Ltd, 1996