

基于机电跟踪的三维虚拟演播室系统

鲁 敏¹, 郁文贤¹, 鲍虎军², 匡纲要¹

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江杭州 310027)

摘 要: 虚拟演播室是虚拟现实技术在电视制作领域中的一项崭新应用. 针对基于机电跟踪的三维虚拟演播室系统, 重点讨论了摄像机机电跟踪、摄像机校准和初始定位、虚拟背景生成, 以及系统同步和合成等关键技术及其实现方法.

关键词: 虚拟演播室; 机电跟踪; 摄像机校准; 摄像机定位; 色键; 同步; 虚拟现实

中图分类号: TN94 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-2035-05

3D Virtual Studio System Based on Electromechanical Tracking

LU Min¹, YU Wen-xian¹, BAO Hu-jun², KUANG Gang-yao¹

(1. School of Electrical Science and Engineering, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China;

2. State Key Lab of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: Virtual studio is a new application of virtual reality in TV program production. In this paper, we discuss the key techniques of camera electromechanical tracking, camera calibration and alignment, virtual scene rendering, system synchronization and composition in Virtual Studio based on electromechanical tracking.

Key words: virtual studio; electromechanical tracking; camera calibration; camera alignment; chromakey; synchronization; virtual reality

1 引言

虚拟演播室(Virtual Studio)是虚拟现实技术在电视制作领域中的一项崭新应用,是视频技术与计算机技术相结合的产物,它可以广泛应用于制作新闻、访谈、教育、专题报道、电视广告、音乐电视、天气预报等节目.虚拟演播室^[2,5~7]是在传统色键抠像技术的基础上,克服其背景不能移动,令节目的真实性和运动效果难以体现的局限性,充分应用了计算机三维图形和虚拟现实技术而产生的.它可以自动跟踪摄像机的位置、高度、摇移、俯仰以及镜头的聚焦和变焦等参数变化,计算机根据这些参数的变化,实时地改变虚拟三维场景,使虚拟背景的变化与摄像机的运动保持同步和一致,因此保证了前景和背景的正确透视关系,前景中的主持人看起来完全沉浸于计算机所产生的虚拟三维场景中,具有逼真的电视演播室效果.

目前,国外虚拟演播室系统主要的代表产品包括:GMD公司的3DK系统,以色列ORAD公司的Cyber set系统,美国ACCOM公司的Elset系统,以色列RF-SET公司的Larus系统,美国Evansand Sutherland公司的Mindset系统,以及NHK公司的Synthersion系统等.它们共有的特性是基于专业图形工作站开发,生成的三维图形图像的质量高、速度快;摄像机参数的获取多采用机电跟踪和光电跟踪相结合的方法,摄像机运

动自由.国内虚拟演播室研制开始于2000年左右,产品以基于PC机为主流,由早期的二维系统发展为以真三维系统为代表,摄像机跟踪系统以基于机电跟踪为主.

一般,虚拟演播室系统由摄像机、参数跟踪器、切换台、视频信号延时器、图形工作站、色键合成器等部分组成(如图1).系统由摄像机拍摄的前景图像,经过视频延时器,图形工作站根据所获得的摄像机运动参数,控制虚拟背景产生相应的变换,生成背景图像.前景图像与背景图像同时输入色键合成器,合成输出到切换台播出.

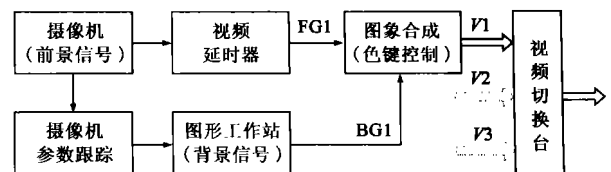


图 1 虚拟演播室系统框图

目前,虚拟演播室对摄像机参数进行跟踪主要有机电跟踪(Electromechanical Tracking)和光学跟踪(Optical Tracking)两种方式.光学跟踪方式通过对运动画面的每帧图像进行精确计算,获得摄像机的运动参数.实际应用中,采用蓝箱背景上的特殊浅蓝色网格图案,系统对网格进行定位追踪,通过对每一帧图像中的网格点进行计算获取摄像机参数.光学跟踪的

优势在于摄像机不需要传感器,可以灵活运动,不受云台、轨道等的限制;由于它是根据摄像机拍摄的图案进行识别定位,所以不需要对摄像机进行校准和多机位摄像机锁定(初始定位)。但这种方式同时存在一定的局限:要对每帧图像进行大数据量的分析和计算,一般需要专用硬件支持,并加大了整个系统的视频延时量;存在每帧图像最少网格点数的限制,使得摄像机的运动范围受到一定的限制,当摄像机散焦或拍摄图像信息量过少时,系统无法正常工作;所获得的摄像机运动参数精度较低;蓝色背景中的浅蓝色标识网格影响色键系统精确抠像合成。

机电传感器技术是利用安装在摄像机镜头和云台上的运动参数编码器,获取摄像机的横摇、俯仰、变焦、聚焦、平移等参数,这种方式精度高,处理速度快,很好的弥补了光学跟踪方式的上述不足,是目前虚拟演播室系统通常采用的方式。但同时机电跟踪方式也引入了系统机电误差,摄像机镜头校准和初始定位困难等问题。本文针对基于机电跟踪的三维虚拟演播室系统,重点讨论了摄像机机电跟踪、镜头校准和初始定位、虚拟背景生成,以及系统同步和合成等关键技术。

2 机电跟踪

一般演播室中基于云台的摄像机的运动自由度^[1]包括:

(1) 摄像机机头的运动。即摄像机机头的横摇(Pan)、俯仰(Tilt),以及镜头的变焦(Zoom)和聚焦(Focus)等运动。

(2) 摄像机机位变化。即摄像机云台的升降(Elevation)、移动(Translation)和旋转(Rotation)。机电跟踪方式是通过在摄像机镜头和云台上加装精确的运动参数编码器,获取摄像机的位置信息和运动参数。镜头编码器通过与镜头上的变焦环和聚焦环的齿轮相互咬合,当变焦或聚焦环发生变化时,编码器能够检测出其变化;云台编码器能测出摄像机摇移、俯仰以及平移的细微角度和位置变化。机电跟踪系统设计方案一般为:跟踪器由传感器、前端采集器及固定支架壳体组成。传感器选用高精度的光电码盘,将摄像机的物理位移和转动量转换成电信号,码盘送出脉冲信号经过数据采集(采样间隔为20ms,与系统场同步信号同步)、数据预处理(编码、解码、数据打包),经过RS485电平转换,通过计算机串口送入图形生成计算机中进行参数预滤波和校准(如图2)。其中,传感器安装在摄像机镜头和云台的运动结构部位,负责感知摄像机焦距、空间位置和方向的变化,并将其转化为电信号;前端采集器通常安装在摄像机支架上,其作用是完成对传感器信号的采集、数据编码、数据打包和同步,同时与图形工作站通讯。

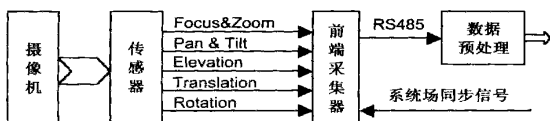


图2 机电传感系统结构图

实际应用系统中,机电跟踪方式可以获得极高精度。以摄像机横摇为例^[9],分析可知,若要传感器的精度达到一个像素,传感器应分辨出的最小视角 θ 应为 0.006° 。而实际系统

中,传感器分辨率一般达到 0.001° ,因此,机电跟踪技术实际可分辨到图像1/6像素的细微运动变化,跟踪非常灵敏,很好的满足了虚拟演播室系统的要求。

由于采用机电传感跟踪方式,云台的细微不稳定和齿轮咬合的松紧度等都会给系统带来参数误差,造成前景和背景的运动不一致。考虑系统的普遍性,假设系统为非平稳随机过程,问题可以归结为对非平稳随机过程的矢量信号波形的滤波问题^[4]。为此,我们引入卡尔曼滤波,对采集的摄像机运动参数进行参数滤波。

卡尔曼滤波法是对所研究系统的信号模型与观测模型及其参量的统计特性予以确定的规定和符合实际的描述,在此基础上按线性最小均方准则进行滤波。摄像机参数跟踪系统信号模型及观测模型定义为下面的状态方程:

信号模型为:

$$\begin{aligned} s(k+1) &= \Phi(k+1, k) s(k) + \Gamma(k) u(k) \\ y(k) &= C(k) s(k) \end{aligned} \quad (1)$$

观测模型为:

$$x(k) = y(k) + n(k) \quad (2)$$

其中,信号 $s(k)$ 及动态噪声 $u(k)$ 为同维数的列矢量;由 k 到 $k+1$ 时刻的状态转移矩阵 $\Phi(k+1, k)$ 及系数矩阵 $\Gamma(k)$ 为相应的方阵;观测数据 $x(k)$ 、信号 $y(k)$ 及测量噪声 $n(k)$ 为同维数的列矢量;系数矩阵 $C(k)$ 为相应的矩阵。 $u(k)$ 和 $n(k)$ 都假定是均值为零的白噪声序列,且两者互不相关,即:

$$E[u(k)] = 0, E[n(k)] = 0, E[u(k)n^T(j)] = 0 \quad (3)$$

但是它们的方差都与时间相关,分别为:

$$Var[u(k)] = E[u(k)u^T(j)] = V_u(k) \delta_{ij} \quad (4)$$

$$Var[n(k)] = E[n(k)n^T(j)] = V_n(k) \delta_{ij}$$

对实际虚拟演播室系统的参数滤波,我们考虑系统状态矢量由摄像机位置矢量和速度矢量构成:

$$\begin{aligned} s(k) &= (cam_k, \dot{cam}_k)^T \\ \Phi(k+1, k) &= \begin{bmatrix} I & \Delta t \\ 0 & I \end{bmatrix} \\ C(k) &= [I \quad 0] \end{aligned} \quad (5)$$

上述的卡尔曼滤波过程只适用于摄像机的平稳运动,对于速度和方向的突然变化往往将带来卡尔曼滤波的发散问题,因而实际应用中采用自适应滤波的方法。根据测量数据实时对滤波器的发散状况进行估计,在此基础上调整噪声的方差矩阵或其它控制发散的参数,减小实际的估计误差,使滤波总是在正常状态下进行。

3 摄像机校准和定位

摄像机的校准和定位是基于机电跟踪的虚拟演播室系统中三维重建的关键一步,目的是要获取摄像机及镜头的光学与几何特性(称为内部参数),同时也用来估计摄像机相对于某个特定参照系的三维坐标及方向(称为外部参数,在定位中讨论)。具体的,虚拟演播室系统中摄像机校准的目的是获得变焦透镜组的焦距随镜头变焦和聚焦码盘刻度变化的非线性关系曲面,并相应的获得虚拟场景中虚拟摄像机的视角与真实摄像机变焦和聚焦变化的非线性关系曲面。虚拟摄像机定

位的目的是为了获取真实摄像机的初始空间位置和方向信息, 保证单机位时虚拟和真实摄像机的透视匹配, 进而保证多机位时不同摄像机之间的位置和视野的相对一致性。

针对不同的摄像机模型, 经典的校准算法主要有: 线性算法(DLT), 非线性算法, 两步算法(Tsai)。线性算法的优点是模型简单, 求解速度快, 缺点是不能确定摄像机的畸变因子等参数。非线性算法则可以求解摄像机的所有内部参数和外部参数, 精度高, 但是求解复杂。而 Tsai 提出的两步算法首先利用线性模型求解出焦距及外部参数, 将它们作为初始估计值, 再利用非线性优化算法估计出有效焦距及畸变因子, 尺度因子等参数, 是一个易于实现且精度能满足要求的算法。

3.1 摄像机校准算法研究

虚拟演播室系统摄像机校准的目的是要获取摄像机及镜头的光学与几何特性(称为内部参数), 同时也用来估计摄像机相对于某个特定参照系的三维坐标及方向(称为外部参数, 在初始定位中讨论)。具体的, 虚拟演播室系统中摄像机校准的目的是获得变焦透镜组的焦距及镜头畸变等参数随镜头变焦和聚焦码盘刻度变化的非线性关系曲面, 并相应地获得虚拟场景中虚拟摄像机的视角与真实摄像机变焦和聚焦变化的非线性关系曲面。校准涉及到前端的校准点图像识别和校准算法的实现两个问题。我们在图像识别技术的基础上, 根据 Tsai 两步校准算法^[3]实现了单视共面下的 CCD 摄像机的校准^[8], 获得了较为满意的摄像机内部参数及焦距变化曲线(如图 3)。

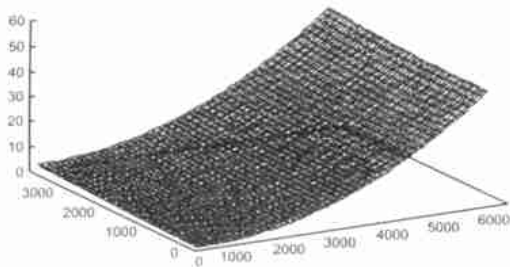


图 3 摄像机水平视角与聚焦及变焦变换关系

Tsai 两步算法的校准过程是在已知图像中心和为一组校准点的计算机图像坐标的前提下, 求解超定线性方程组得到摄像机的旋转矩阵 R 和平移分量 (T_x, T_y) , 然后求焦距 f 与平移分量 T_z 的近似解; 以上一步结果作为初始值, 利用非线性优化计算有效焦距 f , 镜头畸变系数 k_1 , 及平移分量 T_z 。

在需要校准的参数中, 由于投影中心与图像中心的偏移的影响较小, 以及由 CCD 传感器与采集卡扫描频率不一致引起的尺度因子 s_x 在单视共面校准实验中也可以忽略。因此, 我们在虚拟演播室系统的摄像机校准中, 不考虑投影中心的偏移量和尺度因子。

基于机电跟踪的虚拟演播室系统摄像机校准算法流程如下:

- (1) 校准采用单视共面点, 摄像机在特定位置拍摄标准校准板灰度图像, 计算机通过采集卡输入图像;
- (2) 分别提取图像的水平边缘及垂直边缘, 由最小二乘法拟合横向直线和纵向直线, 根据直线求交得到直线的交叉

点即为方格交点, 提取校准点(方格交叉点)的图像坐标, 并与三维坐标对应;

(3) 利用匹配的校准点二维图像坐标与三维世界坐标, 求解线性方程组得到 T_x, T_y, R 和 f, T_z 的近似解;

(4) 根据上面的解, 用 Levenberg-Marquardt 进行非线性优化得到 f, k_1, T_z 的精确解;

(5) 在短焦距处, 误差相对较大, 这将影响到三维重建。注意到 f 与 T_z 的偏离方向是一致的, 所以校准得到的 f/T_z 或 T_z/f 的值相对于校准得到的焦距值与实际的深度值之比要精确。因此我们对 f/T_z 进行了特定的处理^[8], 最后得到较为精确的焦距值。

3.2 虚拟摄像机定位

摄像机定标中, 如果忽略摄像机镜头的非线性畸变并且把透视变换矩阵中的元素作为未知数, 给定一组三维控制点和对应的图像点, 就可以利用线性方法求解透视变换矩阵中的各个元素^[4]。这一类定标方法的优点是不需利用最优化方法来求解摄像机的参数。从而运算速度快, 能够实现摄像机参数的实时计算。我们将线性模型摄像机定标方法应用于实际的虚拟演播室系统摄像机初始定位, 提出了基于主动配准的摄像机初始定位算法。

线性模型摄像机定标过程是根据标定参照物中标定点的坐标系和图像坐标系的对应关系, 当已知标定个数大于 6 时, 用最小二乘法可求出变换矩阵; 再通过特定的矩阵分解, 可求出相应的所有摄像机内外参数。

实际应用中, 基于线性模型的摄像机定标存在以下不足^[10]:

- (1) 没有考虑变量间的约束关系, 当数据存在误差时, 误差在各参数间的分配没有按它们之间的约束关系考虑, 因此, 用上述 M 矩阵分解的内外参数存在较大的误差;
- (2) 利用参照物的已知标定点来求解 M 矩阵, 必须在图像中用图像处理的方法提取这些标定点, 在图像含有噪声的情况下, 图像边缘提取和直线求交时会引入较大的误差;
- (3) 摄像机线性模型不能准确地描述摄像机的成像几何关系, 尤其在使用广角镜头时, 在远离图像中心处会有较大的非线性畸变, 定标过程中不考虑摄像机镜头的非线性畸变, 定标精度受到影响。

针对上述不足, 基于主动配准的定位算法利用蓝箱背板上的共面标定参照点(其空间位置通过测量为已知), 将摄像机的图像中心(忽略摄像机镜头光心偏移量)与标定主动配准, 克服摄像机的非线性畸变的影响, 根据所获取的摄像机云台传感器参数和摄像机线性模型, 得到摄像机的初始空间位置和方向参数(外部参数)。

具体实现流程如下:

Step1 摄像机初始位置固定后, 将摄像机图像中心点对准蓝箱背板上的第一个标定点(一般, 摄像机镜头提供光心参考点), 记录当前摄像机横摇和俯仰传感器初始刻度。注意: 因为传感器码盘刻度一般是相对值, 这一刻度不能反映摄像机的当前方向参数。

Step2 转动摄像机对准下一个标定点, 记录当前摄像机

横摇和俯仰传感器刻度,与第一步获取的传感器初始刻度求差值,即为摄像机相对于第一标定点的水平和垂直旋转角。

Step3 重复第二步,获取下一组摄像机水平和垂直旋转角。

Step4 根据多组旋转角,求解摄像机的位置参数和对应第一个标定点的方向参数。

实验和实际数据表明该算法通过将摄像机光学中心人为对准标定点的方... 避免了对摄像机畸变特性及内部参数的影响,并在算法过程中使用独立参数变量,避免矩阵分解过程的参数互约束关系,可以精确获取真实摄像机的初始位置和方向参数,保证单机位的匹配和多机位的虚拟摄像机间视野对齐,从而保证了虚拟场景和真实场景的运动协调一致。

4 虚拟背景生成

虚拟背景的实时生成是整个虚拟演播室系统的核心。虚拟背景可分成 2D 背景、2.5D 背景(预先生成的三维背景)和 3D 场景。其中,前面两种方式都采用预先拍摄或渲染的图像作为虚拟背景,通过图像的透视变换模拟摄像机的俯仰、平摇和变焦等运动。但实际操作中,由于图像的内容和分辨率固定,必然限制摄像机的运动和变焦范围,一般只适合摄像机为固定机位的小范围运动和变焦的情况。而 3D 虚拟场景方式,虚拟背景是计算机根据当前真实摄像机方位和焦距实时生成(每秒 50 帧,与系统场频信号同步),场景透视效果逼真,摄像机可以自由运动和变焦,是虚拟演播室系统发展的必然方向。本文主要讨论 3D 背景生成方式。

虚拟场景的建模和高质量图像的实时生成和显示,需要用到三维建模、纹理、光照、功能高质量的三维场景快速渲染等计算机三维图形技术。如图 4 所示:

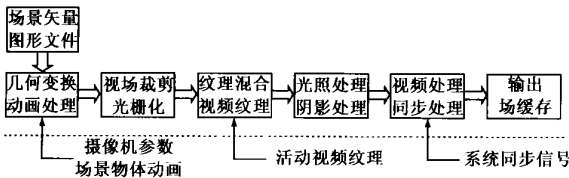


图 4 3D 虚拟演播室虚拟场景生成流程

在 3D 虚拟演播室系统的场景生成流程中,场景矢量图形文件首先根据所获取的当前摄像机参数和场景物体动画参数对这些顶点数据进行最基本的几何变化,如坐标变换、平移缩放等;接下来,经过视场裁剪、三角面片设置和光栅化,得到经填充后的三角面片信息;之后,进行场景中多纹理的混合处理,并在这个阶段,调整活动视频窗的纹理内容;再其后就是对场景的光照和阴影进行处理。经过以上流程,就完成了对整个虚拟场景的渲染过程,可以输出一幅完整的计算机图形了。最后,对这幅计算机图形进行视频处理,主要包括系统同步信号的处理,最后输出符合电视标准的视频信号至场缓冲区。

另外,一般在三维场景实时渲染中模型采用细节层次模型(LOD 技术),简化场景,在不损失图像细节和逼真度的前提下,降低场景模型复杂度。细节层次的选择标准是视点距几何体的距离,系统根据该距离选择不同的 LOD 层次,当该距离

大于某一特定值时,系统转入下一细节层次。场景模型中对于需要 LOD 简化的结点,应用 LOD 生成器,生成新的 LOD 结点或扩展原 LOD 层次。LOD 结点中,内部各层次用 Group 结点分隔,Group 的 children 域包含调用 LOD 算法产生的各层信息。若处理中有面片(以 IndexedFaceSet 结点表示)退化成轮廓线条,则以 IndexedLineSet 结点表示,并与退化的面片(仍旧为 IndexedFaceSet 结点)共属于同一 Group 的 children 域。

5 同步与合成

当进行实时合成图像时,前景信号的每一帧必须与背景信号的对应帧合成。为了保证前景和背景的运动一致,系统必须在前景摄像机的输出增加延时器,以保证前景运动和背景运动之间的时间相关。产生这种延时的原因主要来自两个方面:处理摄像机传感器来的原始数据时(包括参数滤波和校准)造成的延时;背景图形绘制产生的延时。虚拟演播室系统时序^[1]如图 5,基于机电跟踪的虚拟演播室系统其整体延时一般为 3~5 帧。

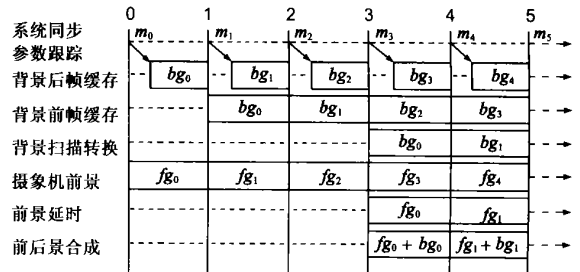


图 5 虚拟演播室系统时序

三维虚拟演播室系统的前景和背景合成一般采用深度合成技术。这一种技术需要考虑两路键信号的深度信息,合成后的图像才能呈现正确的透视遮挡关系。虚拟三维背景图像的各像数带有深度信息,前景物体和人物与摄像机存在距离信息,只有获取了这两部分的信息的前提下,才能确定前景和背景的位置遮挡关系。在实时图形渲染中,图形工作站使用深度缓存区来贮存像素的深度值;而一般在没有深度探测的前景拍摄中,采用人为的估计值,估计摄像机与景物之间的距离,通过这个距离,判断背景图像中物体相对前景景物的前后关系,生成深度外键信号,通过色键合成器合成输出。

演员的表演都在蓝箱中进行,但是由于实际场地的限制,蓝箱的天花板可能较低或对于宽角度拍摄来说太窄,当摄像机进行推拉摇移等运动时,拍摄的图像中会有蓝箱以外的景物,图像输入到视频合成系统与虚拟场景抠像合成时,这些景物也会出现在输出的视频中,达不到我们所需要的演员与虚拟场景中融合的效果。因此在实际使用虚拟演播室时必须使用无限蓝箱(Unlimited Blue Box)功能。它实际上是遮挡关系的一种,即将图像中超出蓝箱的区域遮住。可以通过如下方法实现:首先,对实际蓝箱进行建模,并建立统一的世界坐标系,并在摄像机保持水平垂直时初始化参数跟踪设备。然后根据得到虚拟摄像机的参数,实时生成前景垃圾键信号(Garbage Key),即在 alpha 缓存中产生一个水平带。将这个水平带输入

到视频合成系统,与前景、背景一起合成时,遮住不需要的区域。

如上所述,在三维虚拟演播室系统中,键信号一般包括三类:

(1) 前景键信号,为前景中去除蓝色背景产生的键信号

Key_F ;

(2) 背景键信号,为背景具有遮挡关系的物体产生的键信号

Key_B ;

(3) 垃圾键信号,为系统无限蓝箱功能产生的键信号

Key_G 。

最终的键信号是三者的合成,合成关系如图 6。图中, A-前景视频 $Video_F$; B-前景键信号 Key_F ; C-垃圾键信号 Key_G ; D-背景视频 $Video_B$; E-背景键信号 Key_B ; F-前景键信号和垃圾键信号合成后的键信号 Key_{F+G} ; G-合成视频 $Video_O$; H-最终合成键信号 Key_{F+G+B} 。

设键信号为灰度图像,图像取值范围 $Key \in [0, 1.0]$, 有:

$$Key_{F+G} = Key_F \times Key_G$$

$$Key_{F+G+B} = Key_{F+G} \times (1.0 - Key_B)$$

$$Video_O = Video_F \times Key_{F+G+B} + Video_B \times (1.0 - Key_{F+G+B})$$

(6)

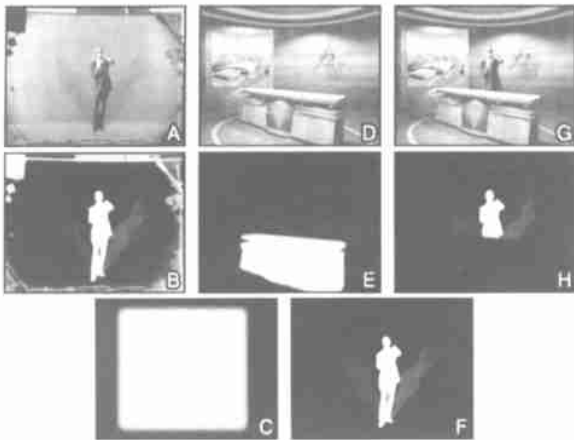


图 6 虚拟演播室系统色键合成信号关系

6 结束语

虚拟演播室技术的发展随着数字视频技术、计算机图形技术及其它参数跟踪技术的不断提高,其系统结构也在实践中不断完善,同时也出现了一些能实现特殊功能的类型,如:异地虚拟演播、虚拟主持人、虚拟广告及适应高清晰电视制式的 HDTV 虚拟演播室。可以预见,在广播电视业数字化的进程

中,虚拟演播室技术将引起电视演播室节目制作方式的一次大的变革。

参考文献:

- [1] Simon Gibbs, et al. Virtual studio: An overview [J]. IEEE Multimedia, 1998, January-March: 18- 35.
- [2] L Blondé, et al. A virtual studio for live broadcasting: The mona lisa project [J]. IEEE Multimedia, 1996, 3(2): 18- 29.
- [3] R Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE J. Robotics and Automation, 1987, RA-3(4): 323- 344.
- [4] P W Birkirchén, et al. Integrating graphics into video image-based camera tracking and filtering [A]. Proc. 3rd Eurographics Workshop on Virtual Environments [C]. Berlin: Springer Computer Science, 1996. 74- 84.
- [5] 奇越,等. 虚拟演播室: 结构及关键技术 [J]. 中国图象图形学报, 2000, 5A(6): 457- 460.
- [6] 李旋宗. 虚拟演播室技术的发展及应用 [J]. 广播与电视技术, 1997, (7): 34- 38.
- [7] 朱勇. 虚拟演播室系统及其关键技术 [J]. 江苏广播电视大学学报, 2001, 12(6): 53- 55.
- [8] 宋海娜,等. 虚拟环境中的彩色 CCD 摄像机校准 [J]. 计算机工程与应用, 2002, (6): 254- 256.
- [9] 罗映辉. 虚拟演播室几种摄像机定位技术的比较分析 [J]. 广播与电视技术, 2002, (5): 88- 92.
- [10] 马颂德,等. 计算机视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 1998. 52- 70.

作者简介:



鲁 敏 男, 1977 年 8 月出生于江西弋阳, 1997 年毕业于国防科技大学电子科学与工程学院, 获学士学位, 现为国防科技大学电子科学与工程学院提前攻博博士研究生, 主要从事虚拟现实、计算机图形学、计算机视觉等方面研究工作。

郁文贤 男, 1964 年 10 月出生于上海, 博士, 教授, 博士生导师, 国家 863 专家, 主要从事雷达目标识别、神经网络、信息融合以及遥感应用等方面研究工作, 在国内外学术刊物上发表近百篇学术论文。

鲍虎军 男, 1966 年 2 月出生于浙江温州, 博士, 研究员, 博士生导师, 国家 863 专家, 研究方向包括: 真实感图形绘制技术、数学几何处理技术、网络图形图像处理技术、虚拟现实及和谐人机环境等。