

中华博士 园地

这是本刊特为海内外正在就读和学成立业的博士、博士后青年学者们开辟的一片科普园地。深学浅著是一门德识、慧学、素质修养的学问。你们的新知识、新调研、新观察、新目光、新展望,能够用尽可能深入浅出、通俗流畅的语言,汇报给祖国人民、家乡父老子弟乡亲们吗?中华博士园地,乃耕耘忠孝之地,科教兴国、民族昌盛之地。要用慈母听得懂的语言,写出你们的心声!

中图法分类号: TP391.9 文章编号: 1006-8961(2001)01-0096-06

虚拟现实中基于图形与图象的混合建模技术

李自力

(华中理工大学电子与信息工程系, 武汉 430074)

0 引言

虚拟现实技术的特征可用 3 个 I, 即 Immersion (沉浸感, 也称浸入感、临场感)、Interaction (交互性)、Imagination (想象力)^[1~3] 来描述。其中, 沉浸感能使用户感受到真切地进入到虚拟空间之中, 用户将感觉不到身体所处的外部环境, 而“融合”到虚拟世界中去^[4]; 交互性则能使用户实时地控制虚拟空间中虚拟物体的行为, 从而使用户感觉到自己是虚拟空间的主体, 用户还可通过三维交互设备直接控制虚拟世界中的对象; 而想象力则是人对虚拟空间

的创造能力^[5]。在虚拟现实技术中, 首先要解决的问题是虚拟场景建模, 即虚拟世界的构造问题, 而且虚拟三维空间建模的好坏是产生沉浸感和真实感的先决条件。场景太简单, 会使用户觉得虚假, 而复杂逼真的场景又势必会增加交互的难度, 并影响实时性。当前世界范围内围绕虚拟场景建模问题的解决方式主要有以下两种, 其一是基于计算机图形学的三维几何模型建模和绘制 (Geometry-Based Modeling and Rendering——GBMR), 又称为基于图形的建模和绘制 (Graphics-Based Modeling and Rendering), 但这种虚拟场景建模方法对硬件的计算能力和图形加速性能都有很高的要求, 一般是用于基于高性能图形工作站的系统 (因 SGI 图形工作站在 3D 图形的产生、处理、加速及显示方面的优势, 故用于基于 SGI 图形工作站的 VR 系统居多); 另一种建模方式是近几年发展起来的基于图象的建模和绘制 (Image-Based Modeling and Rendering——IBMR) 技术, 它是用待建三维虚拟空间的有限幅图象样本, 在一定的图象处理算法和视

李自力 1965 年生, 讲师, 现为该系博士研究生。主要研究方向为计算机图形、虚拟现实与仿真及科学计算可视化。

觉计算算法的基础上,来直接构造三维场景^[6]。这两种建模方法各有优缺点,其中,基于计算机图形学的几何模型建模的优点是,便于用户与虚拟场景中虚拟对象的交互,以及对虚拟对象的深度信息进行直接获取,但由于几何模型三维场景的真实感是建立在对几何物体表面材质的光照模型基础上的,其阴影和纹理要在基于某种光照模型的计算下,通过硬件绘制(Hardware rendering),并配以图形加速(Graphics accelerating)性能才能显示出来,这在场景模型比较复杂的情况下,将会因计算量较大,而使用户与虚拟场景无法实时交互,用户对场景中虚拟对象的操作也无法得到实时的反馈,明显的时延会使用户在生理和心理上感到难受,甚至引起某种疾病,即使目前最快的基于对称多处理(MIPS)和高速图形引擎的高性能图形工作站也无法对超过1 000万个以上三角面的几何场景进行纹理和阴影的实时绘制(Realtime Rendering)和加速显示,这将使场景的复杂度受到限制,从而也使在对复杂场景进行虚拟和仿真方面的应用(如虚拟战场和虚拟巡航制导等)难以实现;而基于图象的三维场景建模是在对场景已有图象集合处理的基础上生成的,其处理方法常用的有图象透视变换、图象拼合、图象变形、图象合成与裁剪等,它与几何模型场景的真实感图形生成算法相比,其计算量较小,也不受场景复杂度的限制,且对硬件的要求也不及几何建模那样高,还可以在微机上实现,但由于场景中的虚拟物体是图象中的二维对象,因而用户很难,甚至不能与这些二维对象进行交互。根据基于图象的虚拟环境生成的研究,其与计算机图形学中重构场景的根本区别在于:它不依赖于几何模型,而是利用事先获取的一组图象,来对环境进行编码,并通过这些图象适当地组合来生成位于不同视点的新视图,最终实现环境的完全漫游。这种方法的最大优点在于生成的环境是这组图象所反映的客观真实场景,因此特别适合于基于真实自然场景的仿真研究,如作战方案的决策模拟与战术仿真、飞行器(如巡航导弹)制导的人工干预、机场调度优化等应用场合的三维虚拟环境的建立。通常构造虚拟环境的图象集合往往来自于对真实环境的多视点柱面摄影图或多路轨迹视频摄像的采样,或由CAD模型场景生成的具有强烈真实感的人工图象序列。如今国内已有多家单位(包括清华大学计算机科学与技术系、国防科技大学计算机学院、浙江大学CAD&CG国家重点开放实验室、中科院

计算技术研究所、西安交通大学人工智能与机器人研究所、哈尔滨工业大学计算机科学与技术系、北京航空航天大学工业大学等)均开展了对虚拟现实技术特别是基于图象的三维虚拟环境建模的研究,并取得了一批可喜的成果^[7~16]。

笔者的研究工作着眼于基于图形与图象的混合建模技术。虽然这种基于图形与图象的混合建模技术可以集基于计算机图形学的三维几何模型建模、绘制与基于图象的建模、绘制的优点于一体,但是其实现也带来很多技术上的困难和人机交互的难度^[17,18]。

1 混合建模的困难和关键技术问题

虚拟环境(Virtual Environment)是一种逼真的视、听、触、味、嗅等多种感/知觉一体化的计算机生成环境,用户可以借助必要的传感设备以自然的方式与虚拟环境中的物体进行交互及相互影响,从而获得等同亲临真实环境的感受和体验。目前已有的传感设备包括可以产生立体视觉的头盔显示器(HMD)、能跟踪用户位置和转动方向的跟踪器(电磁式或超声波式)、能产生力觉或触觉反馈的数据手套(Data glove)和数据服(Data suit),但如今人与虚拟场景的交互行为及感/知觉的仿真程度仍受传感设备和传感器技术发展水平的限制,因而还存在一些问题,比如对虚拟温度场的热觉反馈与传感技术就尚未解决。

虚拟现实混合建模中,用户可以用户化身(User avatar)这个特殊的虚拟实体对象的形式进入虚拟场景,也即用户与虚拟场景的交互是通过用户化身与场景中其它虚拟实体对象间的数据交换来完成的。在基于图象的建模和绘制中,可以图象的插补、变形、拼合等方法来构造一个尽可能符合视觉要求的纯虚场景,且这个纯虚场景是仅有视觉效果的虚拟环境,由于纯虚场景中的虚拟物体是二维图象中的纯虚对象,因此对用户来说,真是可望而不可及,这样,虽然用户化身不能与之交互,但人们仍可凭借双目立体视觉技术和头盔显示器来获取用户化身相对于图象中纯虚对象的深度信息。由于用户希望与之产生交互作用的场景对象必须是几何模型实体,因此需要进行混合建模。另外,为了满足视觉真实性,几何模型实体必须被赋予表面纹理与材质属性,并且要求在虚拟场景中的虚拟光源照射下使对

象实体产生阴影.若进一步要求几何模型实体在运动学、动力学等方面也满足客观物理规律,则几何模型实体还必须被赋以相应的物理特征属性,这一点在科学计算可视化(Scientific visualization)及仿真中是至关重要的.广义地讲,虚拟现实的建模不仅仅是用户6(或7)自由度漫游的虚拟三维视觉空间模型的建立,还应包括场景虚拟对象的多种物理特性表达与实现模型的建立,但这将依赖于传感技术研究和面向对象软件开发技术的进步.在虚拟场景的混合建模中,虚拟实体对象(即几何模型)与纯粹虚对象(即二维图象中的物体对象)之间在虚拟世界坐标系中的坐标位置、摆设方向,以及虚拟实体对象几何模型,在虚拟光源照射下所产生的实体亮度、阴影强度及方向与纯粹虚对象的亮度、阴影强度及方向上的准确匹配是首先要解决的问题,这也是混合建模的难度所在.习惯上,人们将经摄像采集和 IBMR 技术把现实世界的真实三维环境(现实物体对象的集合)转变为计算机中的虚拟世界三维环境的过程,称为实物虚化,而将经过 GBMR 技术把人们头脑中的主观意义上的概念对象转变为计算机虚拟世界中可感知和可操作对象的过程称为虚物实化.这种实物虚化和虚物实化是虚拟场景混合建模中具有不同目的的矛盾而又统一两个方面,前者注重虚拟场景的视觉真实性;而后者则注重虚拟场景交互行为的仿真和可实现性.另外,虚拟实体对象与纯粹虚对象在位置关系、光照与阴影关系、相互作用物理规律仿真等方面的精确匹配称为虚实无缝连接.诚然,用 IBMR 技术构造的虚拟环境与对应的真实环境相比,虽然在视觉上会存在一定的差异(这种差异来自拟合图象与该点真实成像的畸变和光源的非准确匹配),但是只要这种差异不给用户造成明显的视觉不适性,而能限定在一定的允许范围内,就可以认为该 IBMR 虚拟环境建模是成功和实用的,但这种虚实无缝连接对虚拟现实混合建模的算法提出了很高的要求,因为虚拟现实技术中注重交互行为(第二个 I),而交互行为又要求满足实时性.该实时性包括如下两个方面:其一是当用户对虚拟场景中的虚拟实体对象进行某种操作后,该虚拟实体对象的状态数据就能立即通过传感器反馈给用户;二是当用户的位置和视角发生改变(即6或7自由度变换)时,机器能立即调用数据库中的数据和算法来实时生成新的视点图象(或图象对——对双目立体视觉而言),并显示给用户.

2 解决途径与展望

从国内外研究的进展情况来看,虚拟现实技术的研究会朝着分布式与网络化、基于几何模型与基于图象的混合建模、多维信息交互技术中的实物虚化与虚物实化以及虚拟物体物理特性的实现、面向代理(Agent-orient)、人工智能与感知理论等几个方向发展,而虚实无缝连接及其实现的实时性则要求高效率的面向对象编程(OOP)和实现算法,下面就其涉及的几个方面作一个简述.

2.1 混合建模中几何实体对象与 IBMR 虚拟环境的空间关系与透视匹配

对虚拟场景的描述和6(或7)自由度交互行为是在一个虚拟的三维坐标空间之上进行的,这个虚拟的三维坐标空间称为虚拟世界坐标系.人们在虚拟场景中获得的视觉测量是以虚拟世界坐标系的尺度为度量单位的,由传感器输入的对现实世界中位置和方向的变换,也会被转变为虚拟世界坐标系的数据,再交给计算机处理.对于一个理想的虚拟现实系统,则可认为虚拟世界坐标系与现实世界坐标系的坐标原点和坐标轴方向都是重合的;而对于用 IBMR 方法建立的虚拟环境,用户从中可以得到的信息却是根据立体视觉深度信息提取的用户化身位置而相对于现实世界坐标系的反推计算值,由于传感器的定标及拟合图象与该点真实成象均存在差异,且用户化身位置的坐标反推计算值可能会与现实世界坐标值相差一个尺度比例因子或相差一个平移量,因此,当用户化身在虚拟世界坐标系的坐标值与由 IBMR 虚拟环境反推的现实世界坐标值存在较明显的差异时,就会使用户凭借视觉经验和生活常识感觉到几何实体对象与环境图象对象在透视关系上的不匹配.这个问题的解决办法是使用预先设定的特征控制点来进行校正,即将由实际测量所得的预设特征控制点的现实世界坐标系的坐标值与根据双目立体视觉计算反求出来的同一特征控制点的象点虚拟世界坐标系坐标值进行比较,以判断引起误差的因素,并给出修正值.该算法的数学基础是基于摄影测量学中的双象解析摄影测量技术的空间前方交会原理.

2.2 混合建模中几何实体对象与 IBMR 虚拟环境的亮度及阴影的光照匹配

虚拟现实中的几何实体对象与以 IBMR 方法

建立的虚拟环境图象对象,在视觉上准确匹配的要求是在亮度、阴影的强度与方向上的一致.换句话说,虚拟世界坐标系中的几何实体对象需预先被赋以某种材质属性,这种材质属性是通过计算机图形学中的几何图形表面纹理映射和光学特性(包括反射和折射两方面)来实现的,由于几何实体对象在受虚拟光源的照射后,即在周围物体的表面,沿虚拟光源光线的投射方向产生阴影区域,且其阴影区域的大小和形状取决于光源相对于物体的方向和物体之间的相对方位,以及物体表面的几何形状;而阴影的强度(即阴影区域的暗度或灰度)则取决于虚拟光源的辐射强度、环境光强度、几何实体对象表面光学特性等多个因素,因此,需要先从 IBMR 建立的虚拟环境图象中,以图象分析的方法来提取光源信息,其中,包括环境光的色彩与强度、有向光源(点光源和平行光源)的色彩、强度以及位置或方向等.这种光束的色彩(也称色度、色调, Hue)本质上是由所含可见光谱中各波长成分的相对比例决定,在计算机图形学和图象处理中,由于显示器显示彩色的原理是基于红、绿、蓝三色荧光粉发光强度的叠加,因而虚拟光源的色彩也可用一定量化级别下所含红、绿、蓝三组分的比例来模拟;而光束的强度则用单位时间内流过垂直于光传播方向单位面积的能量来决定,而且这种光束的强度在空间的不同位置会随着介质(如空气、水等)的散射和吸收或光束的扩散(对球面波而言)而变化,同时光束的色彩在传播中也可能因介质的色散而改变.这里环境光是指有向光源在受到物体表面的漫反射后,所形成的为观察者所感受到的一种各向同性的光信息.计算机图形学中光束的强度是用一定量化级别下所含红、绿、蓝三组分的强度的叠加来模拟的.这样在对虚拟环境图象中的对象有一定先验性知识(如知道所示物体的物性参数)的条件下,即可以人工参与的图象分析方法来提取光源的位置(或方向)、色彩及强度信息,并转换成图形学中虚拟光源参数的数据结构,再赋值给混合建模的虚拟场景中的虚拟光源对象,这样就能使虚拟场景中几何实体对象与虚拟环境图象中的对象在受光强度和方向上一致,而达到视觉上的无缝(或准无缝)连接.这里有一个比较困难的问题就是,几何实体对象的阴影要实时地投射到虚拟环境的图象上,而阴影的形状和强度要由虚拟环境图象对象的三维结构来决定,但在 IBMR 建模的虚拟环境中,由于无法实时得到虚拟环境图象对象的三维结构,

因此也无法用光线投影求交的办法来求取几何实体对象在虚拟环境图象对象上的准确阴影.虽然在计算机视觉中,有可能根据运动分析或深度信息来提取并重建虚拟环境图象对象的三维结构,但要把它作成混合建模中实时生成几何实体对象阴影的算法还做不到,而正是因为要避免复杂场景几何模型的大计算量,以满足实时性要求,才采用混合建模方法的.一个权宜之计就是用一个赋以阴影材质(即除生成的阴影区域外,其余部分完全是透明的特殊材质)的简单几何体(比如将一个简单平面置于虚拟世界坐标系中虚拟环境图象对象的位置上,以得到几何实体对象,再用经虚拟光源的光线投影求交计算出的阴影来代替投影到虚拟环境图象对象上所形成的精确阴影,但这将要求显示卡具有硬件支持阿尔法通道(α channel)及加速显示的能力.

2.3 混合建模中几何实体对象与 IBMR 虚拟环境中对象的融合与动态掩模技术

混合建模中,用户化身很难,甚至无法与以 IBMR 方法建立的虚拟环境图象对象进行交互,但无缝连接的仿真要求又需要几何实体对象与虚拟环境图象对象融合为一体,而且至少在视觉上如此.在头盔显示器中,当用双目立体视觉来观察混合建模的虚拟场景时,虽然可以通过虚拟环境图象对象的深度信息,而能感知到虚拟环境图象对象之间的空间间隔或空隙,但是如何将几何实体对象穿插到这样的空间空隙中去呢?在实际应用中,往往需要这样做,例如在作战虚拟中,要执行将我方的坦克隐蔽到丛林后面与山地之间的空地,或将我方战斗机驾驶到两座山之间的山凹隐蔽区域里的操作,其解决办法是对环境图象样本集合,先使用图象透视变换、图象拼合、图象变形、图象合成与裁剪等图象处理方法来建立虚拟环境图象,然后,再对虚拟环境图象采用基于对象(也称基于内容)的分割和编码,并对所编码的对象给以命名或标记,这样在虚拟世界坐标系中,几何实体对象就可以被置于带有深度坐标信息的虚拟环境图象编码对象之间,这个深度坐标信息是相对于用户坐标系(即观察坐标系,其原点位于用户化身双目之间的中点处, Z 轴正向则为用户化身观察场景的虚拟摄像机投影方向)而言的.由于面对用户的交互操作行为,其软件包具有实时解码,并具有图象合成计算的功能,因此,在用户看来,虚拟环境图象对象在用户坐标系中,是沿 z 轴方向按一定的前后次序排列的,随着站点位置和观察方向的改

变,虚拟环境图象对象将沿 z 轴方向的前后排列次序会发生变化.用户则可借助于传感器输入的数据,以用户化身与几何实体对象之间数据交换的方法来完成对几何实体对象的操作,这样用户就可以将几何实体对象置于虚拟环境图象对象之间,从而使几何实体对象与虚拟环境图象对象在视觉上达到融为一体.这里把对虚拟环境图象采用基于对象(也称基于内容)分割和编码技术,并通过命名或标记来对几何实体对象进行融入和遮挡的方法称为动态掩模技术.

3 应用前景举例

虚拟现实技术不仅仅能极大地改善人机界面的交互方式——人机之间多维信息通信,而且具有非常广阔的应用前景,也会对信息时代人类社会的生产、生活方式带来极大的影响和改观.应用虚拟现实技术将会使工业产品从设计、制造加工到销售的方式,以及人际交往、通信、教育、娱乐等方面比起目前的方式来说,产生大相径庭的变化.以下的几个方面只不过是虚拟现实技术应用前景的几个典型例子.

(1) 军事对抗仿真与虚拟战场

在军事对抗仿真或战场模拟这样复杂场景的虚拟现实应用中,采用混合建模技术来建立虚拟场景是十分合适的,因为现代战争往往是陆海空同时进行的立体战争,对现代战场的虚拟涉及大量的地形地貌、野外丛林、江河湖海等自然场景,而且军事对抗仿真的虚拟过程往往是在网络上运行的,显然纯粹的基于图形的几何模型场景建模是不行的,另外由于庞大的数据量和计算量也使数据的传输、更新和显示不能实时进行,因此场景的视觉逼真性达不到要求;而基于虚拟场景混合建模和网络运行条件下的军事对抗仿真,是将生成虚拟作战环境的图象数据集合置于若干个工作站主机(Host)的本地数据库中,并将作战用的武器、设备采用几何实体建模,也存储于本地数据库中,不过双方都不具有操纵对方设备几何实体模型的权限.且由于对敌我双方作战交互过程的结果判断、输赢仲裁、数据包发送等算法的执行均由服务器(Server)上的Agent程序来完成,而作战结果的实时显示则由各工作站主机的Client程序在接收到由服务器的Agent程序发送过来的控制数据包后才执行完成.因此,网络上传输的数据主要是各工作站主机与服务器之间通信的控制

数据包和双方各自不同主机结点之间的协同需求通信数据包,因而网络传输数据量小,这样就避免了数据拥塞,从而为满足实时性要求提供了可靠保障.其军事对抗仿真方案示意图如图1所示.

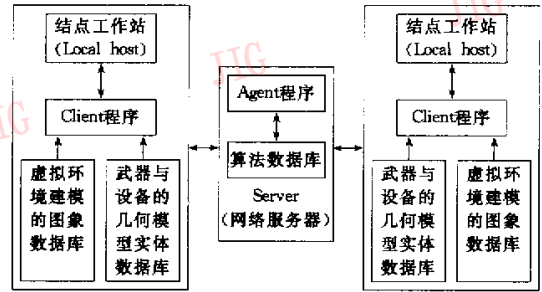


图1 基于混合建模和网络运行的军事对抗仿真方案示意图

(2) 机器人远程控制及遥操作

虚拟现实技术在工业生产方面的一个重要应用就是对工业机器人的远程控制(Remote Control)或称遥操作(Remote operation).由于工业机器人在某些场合,特别是人们不适合去的危险场地(如海底水下打捞工作或有毒生产环境),或者远程的无人化加工、生产基地等地方均能帮助人类高效率地完成许多任务,因而在这些领域已得到广泛应用.在这种场合,操作用户可通过传感器设备进入虚拟场景,其中,虚拟环境建模的图象样本集合就是通过对机器人工作场所进行摄像采样,然后将传感器信号转变成用户化身的操作数据,该操作数据经网络传输给远程机器人后,再转变为机器人的操作信息以控制机器人的行为,机器人则通过随身携带的摄像头摄取当前工作环境的视景图象再通过网络发送给操作用户,以辅助操作用户判别机器人“看”到的物体,并校正和精确定位机器人对现实场景物体的操作,在这种应用中,机器人成了用户化身的等价物.

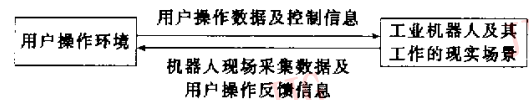


图2 机器人远程控制及遥操作示意图

(3) 人员培训与教育

在培训和教育中,与传统教育方式相比,虚拟现实技术将会使受教育人员更能发挥主观能动性,更能提高学习质量及效率.因为传统教育方式是使学员先接收理论知识的培训,再配合实践学习过程,以增长学员的实际经验,而目前的多媒体教学也只是使学员借助于计算机以多种信息通道(文字、图象、

视频、音频、动画)被动地接受知识。相比之下,虚拟现实教育与它们的本质区别却在于学员在受教育过程中是主动的操作者,其自身的能动性得到最佳的发挥。尤其在大型而复杂的设备操作培训中,虚拟现实教育方式既能加快学员的学习进度,又能避免因误操作而造成实物设备的损坏和对学员可能造成的安全事故(如飞机驾驶培训、汽车驾驶培训等)。

(4) 远程医疗与会诊

网络技术和虚拟现实技术的发展会使偏远地区的人们能够享受到城市先进医疗单位专家的会诊和治疗。当根据病人的断层扫描(CT)或三维超声波成像等建立起的病人疾病部位三维仿真模型(包括人体外表和内脏器官的模型)数据,通过网络传送给异地的专家后,专家即可通过对虚拟场景中的病人三维仿真模型进行虚拟会诊或治疗操作,然后将操作数据实时传送给病人现场的医疗设备再作用于病人。当然,专家对病人的虚拟会诊或治疗的过程必须在当地医护人员的协助下才能完成。这在某些方面有些类似于遥操作,但不尽相同。

(5) 影视娱乐与数字角色

虚拟现实技术用于影视艺术和娱乐行业,将会把业内人员许多奇妙的幻想和梦想变为现实,例如可将已故电影名星或历史伟人以数字角色(Digital Character)的方式重新请回舞台,并实现与当今世界的影视名星的合作,共同演出令观众惊叹的新影片。在前几年,要用三维动画(3D Animation)和数字角色来惟妙惟肖地模拟人的动作和表情还是一件很困难的事情,因为模拟人物的外观造型和动作的协调性、表情的逼真性诸方面都不尽人意,而近年来随着像 Maya 这种支持角色动画的三维专业图形与动画软件的问世,其外观造型和质感逼近真人已不是难事,反向运动(Inverse kinematics)、关节级链(Joint hierarchy)、蒙皮技术(Skinning)以及动力学仿真建模(Dynamical simulation modeling)等技术的发展,更使动作的协调性、表情的逼真性向真人动作及表情的方向迈进,并取得了巨大的进步,但总的说来,用纯粹的三维动画制作角色电影仍然是一件十分麻烦,甚至是困难的事情,而让替身演员借助于传感器(如数据服)去驱动虚拟空间的数字角色来完成表演任务,将会大大地减少动画师的工作量,进而提高电影制作的效率和缩短发行周期。至于说娱乐,人们可以在基于单机或基于网络的虚拟现实系统中找到诸如探险、考古、追寻史前文明、探索未来世界

等的刺激和乐趣。

4 结束语

综上所述,虚拟现实技术正在或即将改变我们生活的许多方面,但由于硬件处理能力和软件技术两方面的原因,基于纯粹几何模型的复杂场景的建模仍是令人望洋兴叹的事情,而基于图形与图象的混合建模技术将获得人们的青睐。随着无缝连接技术若干基本问题的解决,基于图形与图象混合建模的虚拟现实系统将会在人类社会文明建设的历史长河中起到不可磨灭的作用。

参考文献

- 汪成为. 灵境技术与人机和谐仿真环境. 计算机研究与发展, 1997, 34(1): 1~12.
- 汪成为, 高文, 王行仁. 灵境(虚拟现实)技术的理论、实现及应用. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- Kalawsky P S. The science of reactual reality and virtual environments. New yovk: Addison-Wesely, 1993.
- Mel Slater, Martin Usoh. Simulating peripheral vision in immersive virtual environments. Comput. & Graphics, 1993, 17(6): 643~653.
- Stephen R Ellis. What are virtual environments. IEEE Computer Graphics & Applications, 1994, 14(1).
- Chen S E. QuickTime VR-an image-based approach to virtual environment navigation. computer Graphics, Annual conference, ACM SIGGR APH. 1995: 29~38.
- 李洪举, 吴恩华. 基于图象的室内虚拟环境的研究. 计算机学报, 1999, 22(5): 529~534.
- 张茂军, 钟力, 孙立峰等. HVS: 一种基于实景图象的虚拟现实系统. 小型微型计算机系统, 1999, 20(7): 490~495.
- 周东翔, 蔡宣平, 孙茂印. 基于图象的绘制技术. 计算机工程与科学, 1999, 21(4): 59~63.
- 孙立峰, 钟力, 李云浩等. 虚拟实景空间的实时漫游. 中国图象图形学报, 1999, 4A(6): 507~513.
- 朱志刚, 徐光祐, 林学 等. 由现场图象序列建立自然环境三维全景模型. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(S1): 20~28.
- 徐丹, 鲍歌, 石教英. 基于复值小波分解的图象拼合. 软件学报, 1998, 9(9): 656~660.
- 鲍虎军, 陈莉, 王章野等. 非线性视域插值. 软件学报, 1998, 9(9): 690~695.
- 蔡茂国, 杨淑雯, 张登国. 柱面全景图象的实现技术. 深圳大学学报(理工版), 1998, 15(3): 39~42.
- 朱志刚, 徐光祐, 林学 . 由抖动图象序列建立自然环境三维真实感全景模型. 中国图象图形学报, 1998, 3(9): 713~720.
- 李维, 黄小虎, 郑南宁. 基于环境光场和漫反射光场的动态场景绘制. 中国图象图形学报, 1998, 3(10): 818~822.
- Debevec Paul E, Jaylar Camillo J, Malik Jitendra. Modeling and rendering architecture from photograpgs: A hybrid geometry-and-image-based approach. In: Computer Graphics (SIGGRAPH 96), New york, 1996: 11~20.
- 章海涛, 林海, 潘志庚. 基于几何和图象的建筑物建模方法的实现. 小型微型计算机系统, 1998, 19(8): 56~62.