

# 空间动态场景的建模与仿真<sup>①</sup>

马 莉, 王恂钧

(中国电子科技集团公司 第二十八研究所, 南京 210007)

**摘 要:** 空间环境可视化仿真体系对于管理、分析、展现空间物体工作方式至关重要。结合计算机图形学, 天文学, 数学, 运动学等知识, 建立了一个以地球为中心的空间环境仿真平台, 在此基础上开发出卫星在轨运行实时仿真系统。对仿真系统的设计及实现进行了详细地描述, 并论述了系统的主要功能和框架、场景的几何建模和动态建模、卫星覆盖范围建模、通讯特殊效果实现、分布式显示等关键技术。实践结果表明, 仿真及显示效果形象逼真, 并满足实时性要求。

**关键词:** 虚拟空间场景; 空间场景建模; 视景仿真; Vega; 卫星仿真

## Modeling and Simulation of Space Scene

MA Li, WANG Xun-Jun

(28th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** The visual simulation architecture of space scene is very important in managing, analyzing and displaying the space objects. With the knowledge of computer graphics, astronomy, mathematics, and kinematics etc. A platform of space scene, which mainly focuses the earth, is developed. In addition, a visual simulation system of satellite motion in orbit based on the platform is also developed. This paper describes the design and the implementation of the platform and the visual simulation system. Some key technologies are involved, such as overlay area modeling, geometry modeling and kinematics modeling, communication special effect modeling and distributed displaying. The simulation results show that the visual effect is vivid and realistic, and can meet the requirement of real time visual system.

**Keywords:** virtual space scene; space scene modeling; visual scene simulation; Vega; satellite simulation

由于空间环境的特殊性以及航天活动本身所具有的高投入、高风险、高消费比等特点, 人们不可能实时的观察到航天器在空间中的运行状态, 空间环境可视化仿真体系的研制是降低其风险和成本进行研究的有效途径之一<sup>[1]</sup>。目前, 国内外都有一些专用的空间环境建模仿真软件, 例如美国 Analytical Graphics 公司的 STK (Satellite Tool Kit) 卫星工具包软件, 可以实现包括空间环境的卫星在轨实时仿真。然而它重点在于卫星轨道和姿态分析、系统设计、制造和发射等功能, 软件本身可扩展性差, 在空间场景建模与仿真方面的应用还不能普及, 并不能灵活满足各种仿真建模的需求, 而且价格非常昂贵。

虚拟现实 (VR) 技术已日渐走向成熟, 并广泛应用于遥感、虚拟战场仿真、航天任务规划等领域。有鉴于此, 我们以较成熟的视景仿真平台为基础, 综合运用计算机图形学、地理学、天文学、运动学等学科领域的知识, 建立了空间环境仿真系统框架及空间环境仿真平台, 实现了对空间资源监控、空间任务规划、科学指挥决策等业务进行综合分析并通过可视化手段正确展现。

### 1 仿真系统总体架构

设计空间动态场景仿真系统的主要目的是实时生成以地球为基础的空间三维视景仿真环境, 并在此基

<sup>①</sup> 收稿时间:2010-08-11;收到修改稿时间:2010-10-22

础上实现卫星在轨运行的空间动态景象，以三维动态的方式展现了卫星，地球，星空等空间物体运行状态及时间、空间关系，并以多种观察方式多视点，多角度观察目标，漫游整个空间，使用户更加直观，动态地了解卫星等空间目标的运行情况，正确预定飞行方案，进行目标监控、管理、分析等工作。

从功能角度划分，仿真系统主要有五大功能模块：数据管理模块、以地空间环境建模模块、应用建模模块、实时场景驱动模块和三维显示输出模块。根据这五大功能，构建出系统总框架图，如图 1 所示。

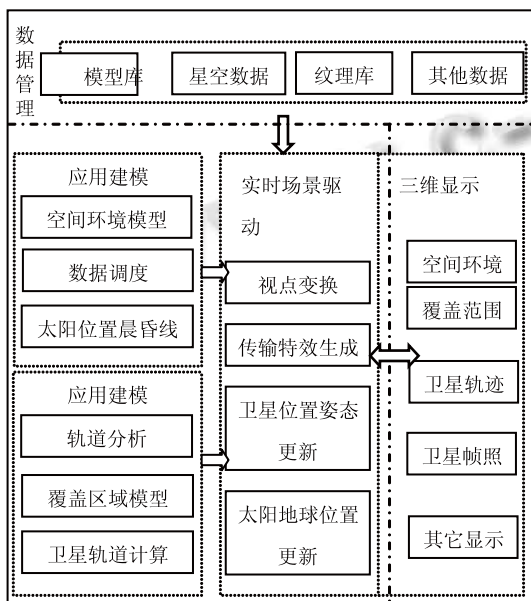


图 1 系统框架图

数据管理模块主要对各种数据（包括三维模型数据，影像数据，星空数据等）进行管理，以便于实现场景实时调度。实时场景驱动模块主要实现场景的驱动，有场景同步、视点变换、卫星位置更新，特效生成等。空间环境建模模块、应用建模模块和三维显示模块是本文陈述的重点，在下文将分别详细介绍。

## 2 仿真系统建模

### 2.1 实体静态建模

鉴于卫星，地面站等三维实体模型的复杂性，用 OpenGL 直接绘制比较困难，我们利用商用三维建模软件（如 Multigen-Creator, 3DMax）建立三维模型，结

合第三方软件转换导出为软件可用格式。一般情况下，转换后的模型因三角形面个数较多而不能直接在场景中使用，需要对模型进行简化。常用方式有面的编辑裁剪，采用 LOD 细节技术等，根据离视点的远近采用不同精度的模型，在不影响场景视觉效果的前提下，通过逐次简化景物的表面细节来减少场景的几何复杂性，提高场景运行效率。

### 2.2 数字地球动态建模

三维地球在诸多可视化领域中扮演着重要的角色，也是衡量一个大型可视化系统总体水平的重要因素<sup>[2]</sup>。本系统以 WGS84 地球模型为标准构建地球，采用 WGS-84 地球固连坐标系，及 J2000 协议天球坐标系<sup>[3]</sup>。且根据当前系统仿真时间，系统能实时计算出格林尼治真恒星时，模拟地球自转。三维地球的可视化建模工作主要分为两个部分：生成地球三维模型和进行地球纹理贴图。

#### 1) 纹理数据

纹理数据采用的是全球卫星照片影像数据，分为多个分辨率级别，一个低分辨率的数据块对应四个更高级分辨率块，以“金字塔”形式进行存储管理。分块情况如表 1 所示。

表 1 纹理分块

级	行数	列数	每块经纬度范围	总数
0	5	10	36×36	50
1	10	20	18×18	200
2	20	40	9×9	800
3	40	80	4.5×4.5	3200

纹理数据动态查询是按级，按块的方式进行。如果所用的纹理数量级不大，一般则存储在本地磁盘即可。如果是海量级数据，因查询时效率就无法满足实时性要求，需要建立数据库来管理影像数据和实现有效查询。为了克服动态加载纹理时，从硬盘读取数据速度的瓶颈问题，也可以建立多线程。绘制地球时将需要的纹理数据先载入内存(如果是存储在本地磁盘的少量数据，也可以在程序初始化时一次性将其载入内存)，这样虽然提高了访问速度，但却是以耗费系统资源为代价的。

#### 2) 数字地球建模

动态构建地球时，根据纹理数据划分的特征，将地球按经纬度方向进行分块，构成基本块(即 0 级块)。

在此基础上,以四叉树结构来组织多分辨率分块的管理,即以一分四的方式逐级递增。每个 0 级基本块构建一棵四叉树,树上节点为一个分辨率块。在场景循环中,根据当前视点位置遍历树,遍历结束后,所有叶子节点即为待显示的块。对这些块进行三角网格剖分,经坐标投影转换后进行绘制且计算该块所属的级别和块号,动态查询纹理进行贴图。当视点变动,根据视点位置再次进行遍历和剖分,依次递归,可完成整个地球的划分和构建。

### 3) 数字地球裁剪

场景中位于视载体之外的所有物体都要裁剪掉,只需要绘制对于视点可见物体即可。本文根据当前视点位置及视载体参数以及每个块的空间坐标,对地球和视截锥进行空间几何体相交计算,对于可见的块加入绘制流程,否则就不与处理。这样就大大地提高了绘制效率,节省系统资源。

## 2.3 运动建模

### 1) 卫星仿真建模

在卫星轨道动力学中,卫星相对于地球中心的运动,可以通过轨道半长径、轨道偏心率、轨道平面倾角、升交点赤径、近地点角、平近点角这六个轨道根数来确定。

在仿真系统中,卫星轨道是由卫星模块来计算并控制的。该模块根据当前  $t$  时刻卫星基本轨道根数,模拟计算并预报卫星的精确轨道;根据精确轨道及当前仿真时间计算卫星当前飞行姿态。卫星在场景中的实时位置是根据当前系统仿真时间,对卫星轨迹数组进行插值获得。数组精度较高时,进行线性插值即可,精度较低时进行二次插值。仿真系统综合考虑显示效果及资源消耗情况来选择合适的插值算法。

同时,系统实现了卫星和地面接收站之间的数据传输动态特殊效果,即动态波束。波束实现的原理是通过制作纹理,并对纹理做相应的位置变换来实现的。此方法建模简单,计算量少,消耗资源较小,但效果理想。

### 2) 卫星覆盖区域建模

覆盖区域建模就是计算出卫星传感器在地球表面的工作范围,即卫星探测锥体在空间上与地球相交的一圈数据值。这对于直观了解卫星工作状态至关重要。如果把地球近似为一个球体,覆盖区域是一个圆(如果

载荷的探测锥是一个圆锥形)。方形探测锥覆盖区域则是一个四段弧线围成的区域。效果图如图 3 所示。

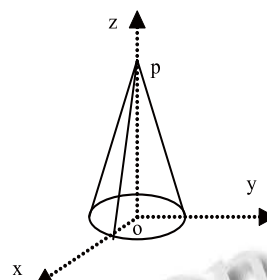


图 2 单位探测锥

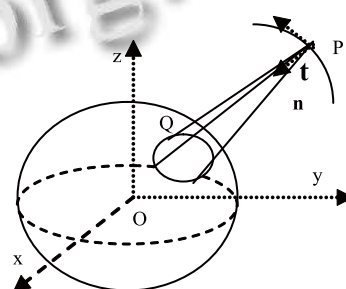


图 3 卫星覆盖范围图

覆盖范围模型计算如图 2、图 3 所示。图 2 是根据卫星载荷参数建立的一个单位圆锥,作为变换之前的单位锥体。在图 3 卫星覆盖范围在地球表面的示意图中, $p$  点表示当前时刻卫星所在的位置,其所在的弧段为卫星的一段轨迹线。 $Q$  点代表探测范围上一点。 $t$  向量表示卫星当前时刻飞行的切线方向, $n$  向量表示卫星位置  $p$  与地心的连线所在的向量。根据这两个向量,确定以  $p$  点为中心的局部坐标系,并构造圆锥变换矩阵  $M$ 。根据  $M$ ,将在单位锥上采样的母线向量进行坐标变换,最终位置如图 3。变换结束后,计算覆盖区域坐标。以计算  $Q$  点坐标为例,根据几何体相交条件(1)和(2)式可计算其坐标 $(x, y, z)$ :

$$O\vec{Q} = O\vec{P} + P\vec{Q} \tag{1}$$

$$\|O\vec{Q}\| = R^2 \tag{2}$$

其中  $R$  为地球半径。方形锥探测范围计算与圆锥相似。

如果探测锥有侧摆角,则需要构造侧摆矩阵,使得  $PQ$  围绕已知方向(此处假设绕  $t$  向量,即坐标轴的  $x$  轴)进行摆动,且摆动角度为  $\alpha$ ,则侧摆矩阵  $M_s$  定义如式(3)所示<sup>[4]</sup>:

$$M_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

进行矩阵变换,就可得到 Q 点偏转  $\alpha$  角度后的覆盖区域坐标。

### 3) 视点的控制与变换

在一个大范围视景仿真系统中,多视点、多角度去观察三维场景及目标能丰富空间的展现,增强渲染力。本系统中,基于运动学原理和空间几何学知识,实现了几种观察方式。在某一具体方式下,视点可以对观察物进行远近推拉,俯仰,水平、垂直方向围绕观察。观察变换方式有以下几种:

在天体坐标系下观察。视点处于三维世界坐标系,所有地表目标,包括地球都是运动的,可定点观察,也可用鼠标操作视点移动。这种方法有助于分析真实空间卫星、地球、太阳之间的相对时空关系。

在地球固连坐标系下观察。视点相对于地球是静止的。通过鼠标的操作移动,可以以不同的距离和角度去观察地表某一处。对于定点观察地球表面上的目标,这种方式比较理想。

视点关联目标。视点与目标相对位置固定。这种方法是通过关联两个相对运动的坐标系实现的,鼠标的操作也是相对于目标局部坐标系的,即视点的拉近、推远、围绕目标转动等操作调整都是相对于所关联的目标进行的。能近距离多方位观察目标运行机工作状态,有较好的视觉效果。

## 3 系统实现及运行结果

本文的应用背景是资源卫星地面控制仿真系统。主要目的是实现对卫星的任务规划、资源监控、监督、管理、分析等工作进行模拟仿真。系统开发是在 VC++ 环境下,通过调用 Vega 视景仿真平台包,利用其回调机制结合 OpenGL 图形库驱动视景。其实现结构如图 4。

系统由数据服务器,应用服务器、视景服务器和 4 台显示终端等单元组成。为了提高显示数据传输效率,降低延时,系统采用业务网络和视景显示网络双网结构,将业务数据和显示数据的传输分离开。

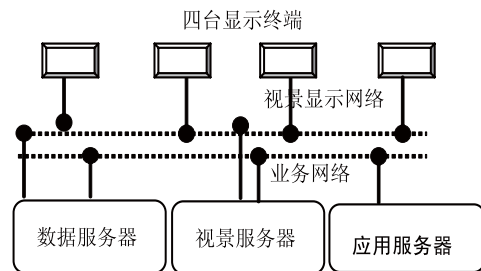


图 4 系统实现结构图

仿真开始后各单元首先进行初始化,然后在视景服务器的调度下实现分布式仿真。数据服务器为视景服务器和显示终端提供各种视景数据(矢量,纹理,模型数据等)的存取访问功能。应用服务器实时解算各种数学、物理模型、进行坐标变换,并将结果传送到场景。视景服务器驱动整个场景,对模型进行渲染,并实时访问数据服务器及应用服务器完成场景更新,将结果同步到显示终端进行显示。

为了提高显示输出的分辨率,系统利用 Vega 的 DVega 模块实现了分布式显示的功能。Dvega 是用多台低端系统上运行的应用程序,模拟多图形硬件管线系统功能的一种虚拟多通道 Vega 模块。视景服务器作为主设备进行视觉模拟,4 台显示终端分别模拟一个视觉通道并输出相应部分的视觉场景,在视景服务器的同步驱动下 4 个模拟通道的输出经过拼接后形成完整的场景。

仿真结果如图 5 所示,为某遥感资源卫星进行帧照及数据传输的工作状态分布式显示效果图。系统利用软硬件强大的分布式计算及图形渲染能力,对场景中海量数据以及特效进行处理,实现了 Vega 多通道广视野的无缝拼接,增强了整个场景的显示效果。

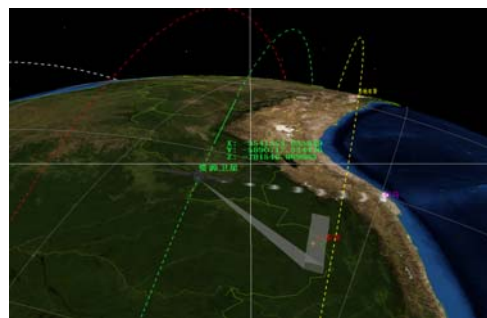


图 5 三维分布式显示效果图



#### 4 结语

系统实现了以空间环境为背景的卫星实时仿真系统,真实地展现了空间中不同卫星在轨运行及工作状态。经运行使用验证,系统运行稳定,仿真效果流畅逼真,满足实时性和交互性。该系统不仅是一个卫星监控,展现,任务规划分析工具,也适用于基于空间环境基础上的其他应用分析,能通过三维显示,逼真地再现空间环境,为航天遥感任务决策或其他应用提供了一个直观的分析,显示工具。

#### 参考文献

- 1 王长波,王章野等.卫星与深空动态场景实时仿真系统.宇航学报,2005,26(增刊):135-140.
- 2 李亚臣,张红柳,等.视景仿真中三维地球的建模.计算机工程,2007,33(12):225-227.
- 3 张守信.GPS卫星测量定位理论与应用.长沙:国防科技大学出版社,1996.256-305.
- 4 孙家广.计算机图形学.第3版.北京:清华大学出版社,1998.365-377.