

## 机载合成视景地形可视化系统设计与实现

王兢喆<sup>1,2</sup>, 牛文生<sup>1,2</sup>, 谢建春<sup>1,2</sup>, 程岳<sup>1,2</sup>

(1. 中航工业西安航空计算技术研究所, 西安 710065; 2. 机载弹载计算机航空科技重点实验室, 西安 710065)

**摘要:** 三维地形可视化技术是合成视景系统的重要基础技术之一。针对机载合成视景系统地形绘制范围大、硬件计算资源较少和对实时性的要求较高等特点, 研究了地形分块调度、层次细节和纹理生成等关键技术, 设计并实现了一种适用于机载合成视景系统的地形可视化系统。实验表明, 该系统的绘制效果和实时性均能够满足机载合成视景系统的需求。

**关键词:** 机载合成视景系统; 计算机仿真; 三维地形可视化; 层次细节

**中图分类号:** T391.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2016)11-0062-06

## Design of a 3D Terrain Visualization System for Airborne Synthetic Vision System

WANG Jing-zhe<sup>1,2</sup>, NIU Wen-sheng<sup>1,2</sup>, XIE Jian-chun<sup>1,2</sup>, CHENG Yue<sup>1,2</sup>

(1. Computing Technique Research Institute, AVIC, Xi'an 710065, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne and Missileborne Computer, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The 3D terrain visualization is one of the most important technologies of Synthetic Vision System (SVS). Considering that the airborne SVS has the characteristics of large-scale terrain scene, less computing resource and rigorous real-time requirement, we studied such critical technologies as scheduling of terrain blocks, levels of detail, and texture generating. Based on which, a 3D terrain visualization system suitable for SVS was designed and implemented. The experimental results showed that our terrain visualization system satisfies the requirement of SVS both in visual effect and real-time performance.

**Key words:** airborne synthetic vision system; computer simulation; 3D terrain visualization; level of detail

### 0 引言

能见度受限一直是航空安全的主要威胁之一。在商用航空领域, 有30%的致命事故属于可控飞行撞地(CFIT), 而这种事故发生的原因就是由于飞机外部能见度受限, 导致飞机在功能完好的情况下撞向地面或障碍物<sup>[1]</sup>。在传统的飞机驾驶舱设计中, 为了让飞行员获取更多的信息, 往往会增加仪表板的仪表数量。飞行员在执行飞行任务时, 既要观察舱外实景, 又要注意各种仪表所提供的飞机参数, 这在一定程度上加重其负担。在飞机进场、目标跟踪等复杂飞行状态下, 这种负面影响更加明显, 甚至会导致飞行事故的发生<sup>[2]</sup>。

合成视景系统就是为解决这个问题而设计的座舱显示系统, 它以三维地形数据为基础, 结合飞机GPS提供的位置和姿态等信息, 实时生成外部环境的虚拟视景, 并叠加显示飞行仪表信息, 为飞行员提供外部环境和飞行参数的描述, 从而有效增加飞行员对外部环境的感知能力, 提高飞行安全性。

大规模三维地形的可视化是合成视景系统的重要基础技术之一, 与其他虚拟场景可视化系统的应用场合相比, 机载合成视景系统有其自身特点。首先, 飞机航线所覆盖的地形场景范围广阔, 地形高程数据和纹理数据规模较大, 并且场景中不同对象的视距和分辨率相差较大; 同时, 机载嵌入式计算环境对于硬件的功耗和体积的要求比较严苛, 因此其可用的图形计算资源较少, 计算能力相对较弱; 此外, 机载合成视景系统对实时性要求较高, 所以地形可视化系统必须有较快的绘制与响应速度。针对上述要求, 本文对大规模地

收稿日期: 2015-09-15

修回日期: 2015-11-08

基金项目: 中航工业技术创新基金(2014D63130R)

作者简介: 王兢喆(1990—), 男, 山东潍坊人, 硕士生, 研究方向为机载计算机图形学与人机工程。

形的数据管理、分块调度以及场景实时绘制等方面进行研究,对占用计算资源较多的过程进行了优化,设计并实现了一种适用于机载合成视景系统的三维地形可视化系统。在嵌入式平台上进行的测试表明,使用该系统进行地形场景绘制,在视觉效果和实时性等方面均能够满足机载合成视景系统的要求。

## 1 相关工作

### 1.1 合成视景系统

目前国外的合成视景解决方案主要由美国罗克韦尔·柯林斯公司以及霍尼韦尔公司提供<sup>[3]</sup>。霍尼韦尔的合成视景系统集成经过了认证的杰普森航图数据,主要显示在下视显示器上;而科林斯公司的主要产品为平视显示器,其增强视景与合成视景画面都显示在平视显示器上。

2008 年霍尼韦尔公司在一架“湾流”G450 公务飞机上演示了合成视景系统,其座舱显示器复现了飞机几千米之下的地形,随着飞机高度下降,可以逐渐看见地面障碍物。目前装备霍尼韦尔公司合成视景系统的飞机有“湾流”G350, G450, G500 和 G550 公务机,法国达索公司的“隼”900EX, 2000EX 和 F7X, 巴西航空工业公司的 E-170 和 190 系列支线客机,以及意大利阿古斯特公司的 AB-139 直升机等。罗克韦尔·柯林斯公司的 Pro Line Fusion 系统也配有合成视景系统,已经运用于加拿大庞巴迪公司的“环球快车”XRS 和 5000, 巴西航空工业公司的“莱格赛”450 和 500 等支线喷气机上。

国内目前在该领域的研究尚处于起步阶段。清华大学有一项子课题涉及到合成视景技术,但尚未有公开的研究成果发表。四川大学也对合成视景技术产生了浓厚的兴趣,不过,其研究成果仅局限于地面 PC 或服务器的仿真与实现,并未有嵌入式领域的产品。可见,国内合成视景系统方面的研究与其他国家尤其是美国的差距较大。

### 1.2 大规模地形绘制算法

按照生成网格的不同类型,地形绘制算法可以分为基于规则方形网格(RSG)的算法和基于不规则三角形网格(TIN)的算法两大类<sup>[4-5]</sup>。

采用 RSG 的优点是便于压缩存储,因为顶点的邻接关系已经隐含在网格排列之中,缺点是不同细节丰富度的地形块所包含的数据点数量相同,对绘制过程而言优化程度不够。LINDSTROM 于 1996 年首先提出了基于规则网格视点相关的连续细节层次(CLOD)算法<sup>[6]</sup>,采用二叉树结构管理地形场景,并采用屏幕误差判定条件建立节点评价函数,该算法实现简单,但二叉树结构

本身占用内存较多,当地形场景较大时,难以保证实时性;DUCHAINEAU 于 1997 年提出实时优化自适应网格(ROAM)算法<sup>[7]</sup>,该算法自顶向下对地形表面进行递归二分,从而构造三角形二叉树,强制剖分保证每一步操作均不会产生 T 裂缝,被广泛应用于三维游戏;2000 年, BLOW<sup>[8]</sup>对 ROAM 算法进行了改进,优化了三角形剖分的条件,从而缩短了优先级计算和更新的时间,极大地减少了 CPU 的计算量。

采用不规则三角网格的优点是使顶点选择的自由度更大,生成网格的三角形数目较少,但缺点是 TIN 数据结构组织复杂,且难以配合使用层次纹理,因此,通常大规模地形可视化系统并不采用 TIN 类方法。这类方法主要包括 Multi-Triangulation 结构方法<sup>[9]</sup>和视点相关递进网格(Progressive Mesh, PM)方法<sup>[10]</sup>等。PM 方法的简化效果较好,并且不会在视点移动时产生裂缝,但是它以顶点的形式组织,即使视点距模型较近,层次结构中需要实时遍历的节点依然很多,很难达到实时,而且不支持在同一模型内的多层次细节表示,因而目前在地形绘制中使用的较少。RENATO 等人结合 TIN 的灵活性和二叉树结构的高性能,提出了基于二叉树的不规则三角形网格 QuadTIN 算法<sup>[11]</sup>,与传统 TIN 算法相比,有效提高了绘制速度。

在工程实践方面,文献[12]从飞行器模拟视景系统的应用角度出发,对大规模虚拟场景绘制的开发流程做出了阐释,并在多通道同步、数据库的调度和环境模拟技术方面进行了改进;文献[13]引入线性二叉树管理机制对 Geomipmapping 算法进行改进,有效地降低了 CPU 在线处理时间和 GPU 渲染批次;文献[14]提出基于视点的可见地形预测算法,动态加载地形数据,同时利用外推算法预测视点运动情况,渲染速率变化小,实时性能良好。

## 2 系统设计与实现

### 2.1 需求分析

地形可视化系统是应用于机载合成视景系统中的,因此需要考虑此应用场景下的特殊需求。首先,绘制的地形场景必须能够实时反映飞行员通过窗口看到的座舱外的真实景象;其次,需要向飞行员提供足够的信息帮助其做出正确的决策;最后,需要能够实时接收特定类型的控制指令来调整显示内容。地形可视化系统在机载合成视景系统中的位置以及与其他系统的接口关系如图 1 所示。从图 1 中可以看出,地形可视化系统既需要接收外部系统如控制面板、传感器等提供的信息,又要与其他模块进行交互,共同完成合成视景系统的功能。根据上述地形可视化系统在合成视景系

统中的位置及其作用,对其具体要求如下:1) 实时显示与观察点位姿相关的三维场景,包括大规模地形与机场等局部细节模型;2) 能够接收外部系统指令,以对场景的漫游过程进行控制;3) 能够实时进行高度查询,对地形的碰撞检测进行处理;4) 绘制场景时帧率稳定,且帧率能够达到每秒30帧。

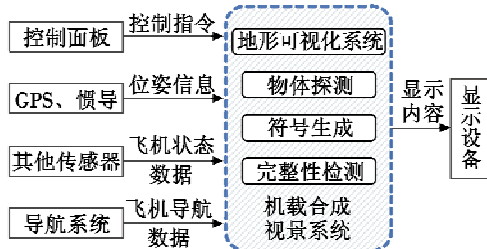


图1 三维地形可视化系统与其他系统的关系  
Fig.1 Relation between 3D terrain visualization system and other systems

## 2.2 系统设计

针对上述对地形可视化系统功能的需求分析,该系统主要从系统架构和程序实现方面进行设计。

根据软件模块化设计的思想,将系统的具体功能进行分离,形成单独的功能模块。模块之间的结构和相互关系如图2所示。

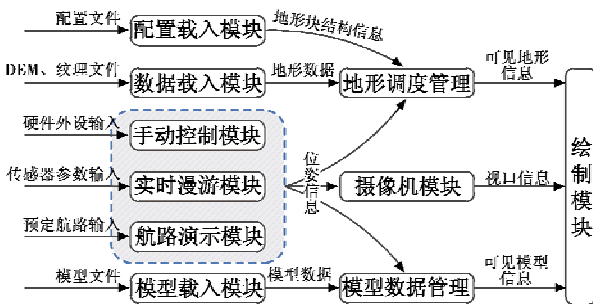


图2 三维地形可视化系统模块结构  
Fig.2 System module structure

整个系统有多种不同类型的输入文件,其中最早被使用的是配置文件。配置文件中包含地形块的位置、范围以及数据点的组织等信息,程序读入配置文件之后,由地形调度管理模块建立地形块所对应的数据结构,并进行存储。DEM数据、纹理文件以及模型数据存储在外存储器的文件中,需要程序读入并解析。解析得到数据之后,分别由地形调度管理模块和模型数据管理模块进行处理,建立相应的数据结构并进行存储。观察视角的信息则有3种不同的传递途径,即通过硬件外设实时手动控制、通过传感器接口实时传入以及通过预定航路数据实时演示等。因此设定3个模块来处理3种不同的输入信息,并将最终的解析结果转换为观察点的相应数据,传递给摄像机模块,由后者实时维护观察视角以及观察位置的变化。同时,位

姿信息也被传递给了地形调度管理模块和模型数据管理模块,用以计算并判断地形信息以及模型的可见性和细节层次,以便选用合适的数据和方式进行场景的绘制。最后,地形、模型以及视口的信息传递给绘制模块,绘制模块通过调用OpenGL的相应接口对整个场景进行绘制,得到所需的视景画面。

程序运行的主要流程则可用伪代码简要描述如下。

```
initialize()
while inMessageLoop == True do
  if peekMessage (&msg) == True then
    if msg == QUIT then
      inMessageLoop ← False
    else
      dispatchMessage (&msg)
  else
    update()
    draw()
  freeResource()
```

最开始执行 initialize() 函数进行初始化,进行配置文件的读取、地形和模型数据结构的建立以及OpenGL的相关初始化函数的执行等工作。之后进入消息循环,在每个循环中,如果接收到了消息输入,则根据消息内容对绘制过程的参数进行调整,若收到的是退出消息,则修改相应循环标记,以便跳出循环并结束程序;如果没有消息输入,则进行场景的更新和绘制。

update() 函数的主要工作是根据上一个循环中调整的绘制参数,更新可见地形块、纹理、模型以及视口信息等内容,并且根据视距等因素选取相应地形的层次细节,计算模型位置等。通过一系列操作,将所有需要绘制的对象以及绘制方式计算出来,便于下一步直接交给绘制模块进行绘制。draw() 函数将需要绘制的地形和模型等数据转换为三角形面片、线段等结构,通过调用OpenGL函数将点、面、纹理、法向量等信息输出到OpenGL状态机中,进行场景的绘制。

## 3 关键技术

关键技术主要有后台数据管理和可视化效果两方面,其中,后台数据管理方面包括地形数据的分块调度以及层次细节技术,可视化效果方面则主要研究如何根据DEM数据生成适用于机载合成视景系统的纹理。

### 3.1 地形分块调度

在实际应用中,地形高程数据和纹理数据规模较大,不能一次性读入内存,因此需要对DEM数据进行分块处理。根据实际需要,本文将每块地形的实际范围设定为边长50 km左右的正方形区域。传统的视口剪裁方法将每个高程点与视椎体截面进行比较,判断

高程点的可见性,当高程点较多时,这种做法会带来巨大的计算开销。本文采用以地形块为调度单位的方法,数据的存储、剪裁以及绘制均对整个地形块中的数据进行,较传统方法能够节省大量时间。

根据合成视景系统的要求,地形的绘制范围应该覆盖飞机 10 min 能够飞行的距离。以国产的海鸥 300 型飞机为例,其最大平飞速度为 258 km/h,10 min 飞行距离为 43 km,小于每块地形的边长,选择绘制飞机当前所在地形块以及相邻地形块进行绘制即能满足这个要求,如果对绘制场景的范围有更大的要求,也只需再多绘制更外一层相邻地形块即可。因此,本文选择直接将飞机所在地形块周围相邻 8 块地形提前预读入内存。为此,采用一个邻接表的结构,将每块地形的相邻 8 块地形编号存入一个邻接表,每次需要更新和预读地形块时,直接查询当前地形块的邻接表,获得预读地形编号。

此外,通过对飞机速度矢量的分析,将飞机航迹将要经过的后续地形块读入内存,如图 3 所示,这样可以吧接下来最可能被绘制的地形块都进行预读,使得实时绘制时的数据交换只发生在内存中,提高绘制速度。

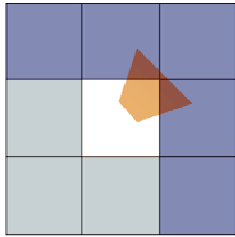


图 3 地形块数据的预读  
Fig. 3 Preload of terrain data

### 3.2 层次细节

由于 DEM 数据是采用规则网格点的形式,因此,不同的层次细节在实现的时候只需考虑对网格点进行不同程度的采样即可,不同的采样率就能够体现不同的层次细节。而四叉树结构是常用的地形数据组织方式,采用四叉树结构可以方便地将地形的不同细节层次联系起来。四叉树的结构如图 4 所示。

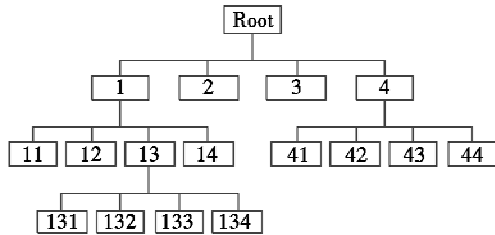


图 4 地形的四叉树结构  
Fig. 4 Quad tree structure of terrain

四叉树采用自顶向下的方式构建,首先建立一个根节点,包含整个地形区域。根节点有 4 个子节点,分

别包含整个地形区域的四分之一。以此类推,划分每个节点,直到叶子节点是最小地形块单元为止,就完成了四叉树结构的构造过程。上层节点所表示的范围广,地形数据点采样率低。随着层级下降,节点表示的范围逐渐缩小,地形数据点采样率逐渐增加。最后形成的地形实际关系如图 5 所示。

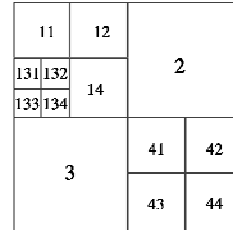


图 5 地形实际关系  
Fig. 5 Real relations of terrain blocks

如果认为最底层节点,也就是原始 DEM 数据的采样率为 1,相邻两层节点之间采样率之比为  $r$ ,那么最终每个节点与其所有子节点所包含的数据点数量有如下关系

$$N_{parent} = 4r^2 N_{child} \quad (1)$$

式中, $r$ 取值为 0.5,此时父节点与 4 个子节点所包含的数据点个数相等。以同时绘制每块边长为  $n$  个数据点的地形区域为例,假设同时绘制两个细节层级共 9 个地形块,如不采用层次细节优化,绘制的顶点个数  $N_0$  为  $9n^2$ ,而当采用了层次细节优化时,绘制的顶点个数  $N$  为  $3n^2 (N = n^2 + 8(n/2)^2)$ ,两者绘制顶点数之比为  $N/N_0 = 3$ ,其算法复杂度为  $O(n^2)$ ,启用层次细节优化后计算开销显著减少。

当相邻的地形块绘制的采样率不同时,其邻接边缘会出现裂缝,影响可视化效果。在采用上述层次细节策略时,裂缝的消除比较简单。由于相邻的不同分辨率的地形块之间,数据点的采样率总是相差一倍,因此,可以采用对分辨率较低的一侧加一条边的方式来消除裂缝,如图 6 所示。此方法的优点是不必添加新的数据点,并且可以在两侧的地形块绘制完成后单独对裂缝进行处理,可以减少程序实现时需要考虑的特殊情况,从而减少工作量。

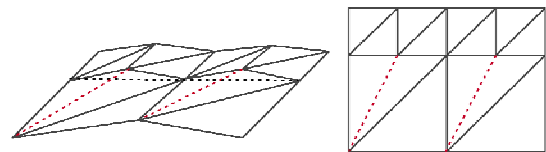


图 6 消除裂缝的方式  
Fig. 6 The way of crack elimination

### 3.3 纹理生成

现有的大规模虚拟地形应用中的真实纹理,通过卫星图片或航拍得到,其特点是细节丰富,真实度高,

适合要求细节较多的场合;还有一种是虚拟纹理,通过DEM数据生成,纹理中像素的颜色与该像素点对应的地形点海拔高程相关,其特点是细节较少,只关注地形的高程,适合对细节要求不高但关注地形高程的场景。本文采用的DEM有配套的真实纹理,采用该纹理进行绘制有较好的视觉效果。但是机载合成视景系统中,主要的关注点不是场景的丰富细节和地表特征,而是地形的起伏程度,并且过多的地表细节容易给飞行员带来更多的干扰。因此,本文采用虚拟生成的纹理来进行地形的绘制。

1) 生成颜色映射表。根据霍尼韦尔公司合成视景系统效果要求<sup>[15]</sup>,提取相应地形高度对应的颜色信息,为了使飞行员在航行过程中能够充分利用合成视景系统进行正确快速的判断,这些颜色往往根据地形从低到高的变化从偏绿色渐变为偏红色,以反映地形障碍对飞行安全性威胁的高低。经过飞行测试,采用这一系列颜色的人机功效也得到了验证。在获取了这一系列颜色之后,使用Matlab的Colormap Editor工具编辑生成颜色映射表。

2) 生成高程点对应的图像。将地形块的高程数据进行归一化,假定原始DEM数据矩阵为 $H$ ,归一化后的DEM矩阵为 $G$ ,那么映射关系如式(2)所示,即根据所有地形数据中的高程的最大值和最小值用式(1)将高程值线性映射至0~1之间。

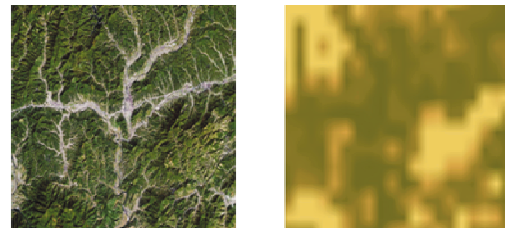
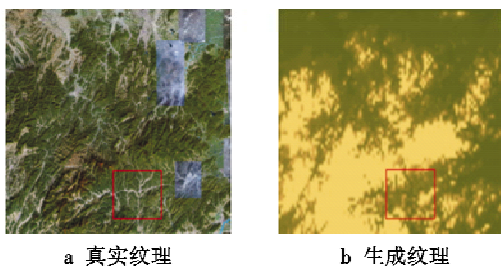
$$G_{ij} = \frac{H_{ij} - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}} \quad (2)$$

将之前生成的颜色映射表应用于变化后的新高程数据,就生成了像素点个数与高程点数目相同的图像 $I$ ,即

$$I = \text{colormap}(G) \quad (3)$$

3) 通过双线性差值的方法对图像进行上采样,将图像大小扩展到所需的尺寸,以实现地形数据点之间高度渐变的视觉效果。

图7展示了一个地形块的真实纹理和生成纹理,以及其部分细节的对比。可以看出,生成的纹理能够使地形的大部分高程信息有所保留,而又去除了如地表植被颜色等对于飞行影响较小的信息,有助于减少飞行员需要处理的信息量,提高飞行安全性。



c 真实纹理局部细节

d 生成纹理局部细节

图7 真实纹理与生成纹理比较示意图

Fig. 7 Comparison of real texture and generated texture

## 4 实验结果

主要从主观可视化效果和绘制性能两方面对地形可视化系统进行评价。测试在两种平台上进行,在PC机上主要测试了层次细节优化的效果,在嵌入式平台上主要测试了实际性能和可视化效果。根据实际应用的需求,两者的硬件配置如表1所示。

表1 测试用PC和嵌入式平台硬件配置

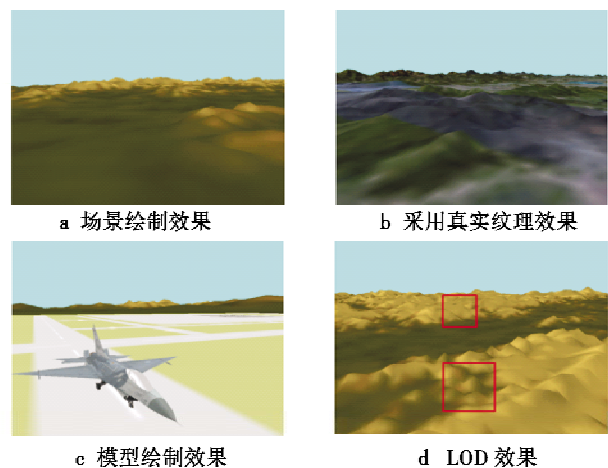
Table 1 Hardware configuration for experiment

平台	CPU	GPU	RAM
PC	Intel Core-i5 3.2 GHz	Intel HD Graphics 366.7 MHz	4 GB
嵌入式	AMD A4-1250 1 GHz	Radeon HD 8210 300 MHz	8 GB

数据方面,采用的DEM数据精度为1:250000。将DEM数据划分为66块,数据量总大小为850 MB,地形采样点约为87万×130万。

### 4.1 可视化效果

地形场景绘制效果如图8所示。



a 场景绘制效果

b 采用真实纹理效果

c 模型绘制效果

d LOD效果

图8 地形可视化效果

Fig. 8 Visual effect of rendering

图8a展示了地形场景的绘制效果,能够反映真实地形的主要特征,满足机载合成视景系统对地形绘制的需求;图8b则是采用原始的真实纹理的绘制效果。

可以看出,当采用真实纹理时,由于卫星或航拍图像的区域分辨率以及天气条件的不同,会导致不同区域出现较大色差,并且地表由于植被或人文景观的分布,会出现一些无用的细节,增加飞行员的负担,而采用生成的虚拟纹理则能较大程度地避免这些情况;图 8c 展示了场景中机场和飞机等模型的显示效果,可见在大规模地形场景中,能够对模型进行较为细致的展示;图 8d 展示了 LOD 效果,近处红框 LOD 层次比远处低一级,所以包含更多细节,但由于距离视点的远近不同,因此在视觉上差别不大。

#### 4.2 性能评测

性能评测主要有两项:1) 在 PC 上测试 LOD 优化的效果;2) 在嵌入式开发板上测试实际绘制性能。由于该系统应用于机载嵌入式平台,所以性能测评主要验证优化效果以及在嵌入式平台上绘制的实时性。

图 9a 展示了启用 LOD 优化前后场景绘制帧率的对比,其横坐标表示同时绘制的地形块数,纵坐标表示帧率。可以看出,随着同时绘制地形块数的增加,帧率均有所下降。但开启 LOD 优化之后的 FPS 能达到未开启 LOD 优化时的 2.1 ~ 5.4 倍;图 9b 展示了启用 LOD 优化前后场景绘制中顶点数的对比。横坐标是同时绘制的地形块数,纵坐标是场景中绘制的顶点数目。当未开启 LOD 优化时,顶点数随着绘制地形块数增加而迅速增加,当开启 LOD 优化时,顶点数则增加得非常缓慢。从图中可以看出,开启 LOD 优化之后能够减少 66.7% ~ 90.7% 的绘制顶点数目。这两项指标都说明同时绘制地形块数目越多,LOD 优化的效果越显著。

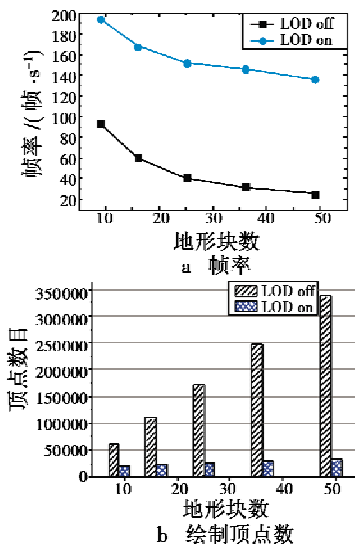


图 9 启用 LOD 优化前后性能对比

Fig. 9 Performance with and without LOD

在嵌入式平台上实测,当按照实际需求同时绘制 9 块地形时,采用本文的调度策略能够流畅绘制场景,帧率可以稳定保持在 59 ~ 62 帧/s 之间。

通过实验可以证明,本文的调度策略和 LOD 优化效果明显,地形绘制可视化效果和实时性方面能够满足机载合成视景系统的要求。

#### 5 结束语

本文对机载嵌入式环境和机载合成视景系统的特点进行分析,明确了对三维地形可视化系统在效果和性能方面的需求。在此基础上,对软件的系统架构和 workflow 进行分析,研究了场景绘制过程中的基于视点位置和航迹的地形分块调度、基于四叉树结构的层次细节以及基于地形高程的纹理生成等关键技术,设计并实现了一种大规模地形可视化系统。在嵌入式平台上进行的实验评测表明,该三维地形可视化系统所采用的地形调度策略和层次细节技术能够较大程度地减少场景绘制的计算量,提高绘制速度。在绘制效果和实时性等方面均能满足机载合成视景系统的要求。

为进一步完善该系统,下一步工作重点是在保证实时性的前提下,增加地形场景的表现能力,提高可视化效果,以及针对更加先进的图形硬件对系统进行优化。

#### 参考文献

- [1] PRINZEL L J, KRAMER L J. Synthetic vision system [J]. International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors, 2009(25):1-10.
- [2] KRAMER L J, WILLIAMS S P, BAILEY R E, et al. Synthetic vision systems: operational considerations simulation experiment [C]//Defense and Security Symposium, International Society for Optics and Photonics, 2007:655903-655919.
- [3] 时杰. 合成视景系统的发展及应用[J]. 国际航空, 2009(4):51-52. (SHI J. Applications of synthetic vision system [J]. International Aviation, 2009(4):51-52.)
- [4] 刘贤梅,张婷,汤磊. 视相关大规模三维地形实时绘制技术综述[J]. 计算机仿真, 2007, 24(6):194-198. (LIU X M, ZHANG T, TANG L. A survey of view-dependent real-time rendering method for large 3D terrain [J]. Computer Simulation, 2007, 24(6):194-198.)
- [5] 张慧杰,孙吉贵,刘雪洁,等. 大规模三维地形可视化算法研究进展[J]. 计算机科学, 2007, 34(3):10-16. (ZHANG H J, SUN J G, LIU X J, et al. Research evolution of large scale terrain visualization algorithm [J]. Computer Science, 2007, 34(3):10-16.)
- [6] LINDSTROM P, KOLLER D, RIBARSKY W, et al. Real-time, continuous level of detail rendering of height fields [C]//Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM, 1996:109-118.

(下转第 72 页)

## 6 总结

TTE 网络的通信完整性保证机制对于提高网络的安全性和可靠性具有重要意义。本文提出的 TTE 完整性检查网关,可以用于通用的交换式级联拓扑,其特点在于通过内外结合的双重通信完整性保障机制,能够满足级联拓扑下高完整性通信的需求。半物理仿真实验表明,利用 TTE 完整性检查网关,既可以隔离时序故障,又可以隔离内容故障,其中对于内容错误的故障数据流的隔离能够补充设备级中央监视机制的不足,有望在高安全性要求且分层次的航空航天 TTE 网络互连中得到应用。

### 参 考 文 献

- [1] RADJENOVIC A, PAIGE R. Architecture description languages for high-integrity real-time systems [J]. *Software, IEEE*, 2006, 23(2):71-79.
- [2] SAE Aerospace. SAE AS6802 Time-triggered Ethernet [S]. [S. l.]: SAE International, 2011.
- [3] 熊华钢,王中华. 先进综合航空电子技术 [M]. 北京:国防工业出版社,2009. (XIONG H G, WANG Z H. Advanced avionics integration techniques [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)
- [4] 兰杰,熊华钢,李峭. 时间触发以太网时钟同步的容错方法分析 [J]. *计算机工程与设计*, 2015, 36(1):11-16. (LAN J, XIONG H G, LI Q. Clock synchronization fault-tolerance in time-triggered ethernet [J]. *Computer Engineering and Design*, 2015, 36(1):11-16.)
- [5] ROMAN O. Time-triggered communication [M]. New York: CRC Press, 2009.
- [6] BRENDAN H, MICHAEL P, DWAYNE B, et al. Hybrid topology ethernet architecture; US, 008130773B2 [P]. 2012-03-06.
- (上接第 67 页)
- [7] DUCHAINEAU M, WOLINSKY M, SIGETI D E, et al. ROAMing terrain: real-time optimally adapting meshes [C]//Proceedings of the 8th Conference on Visualization, IEEE Computer Society Press, 1997:81-88.
- [8] BLOW J. Terrain rendering at high levels of detail [C]//Proceedings of the 2000 Game Developers Conference, 2000:37-45.
- [9] PUPPO E. Variable resolution terrain surfaces [C]//Proceedings of the CCCG, Citeseer, 1996:202-210.
- [10] HOPPE H. Smooth view-dependent level-of-detail control and its application to terrain rendering [C]//Proceedings of the Visualization, IEEE, 1998:35-42.
- [11] PAJAROLA R, ANTONIJUAN M, LARIO R. Quadtree: quadtree based triangulated irregular networks [C]//Proceedings of the Conference on Visualization, IEEE Computer Society, 2002:395-402.
- [12] 张燕燕,黄其涛,韩俊伟,等. 飞行模拟器视景系统的设计与实现 [J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(12):3362-3367. (ZHANG Y Y, HUANG Q T, HAN J W, et al. Design and implementation of visual simulation system in flight simulator [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(12):3362-3367.)
- [13] 李钦,戴树岭,赵永嘉,等. 分块 LOD 大规模地形实时渲染算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(5):708-713. (LI Q, DAI S L, ZHAO Y J, et al. A block LOD real-time rendering algorithm for large scale terrain [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013, 25(5):708-713.)
- [14] 王响,雷小永,戴树岭. 基于视点预测的大规模地形的实时渲染 [J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(6):1202-1206. (WANG X, LEI X Y, DAI S L. Real time rendering of large scale terrain based on viewport prediction [J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(6):1202-1206.)
- [15] VERVERS P M, HE G, SUDDRETH J, et al. Design and flight test of primary flight display combined vision system [J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2011, 4(2):738-746.



请扫描二维码关注我刊