

## 近界视景导航中森林场景加速绘制\*

卞燕山<sup>1</sup>, 邹鹏<sup>2</sup>, 于荣欢<sup>2</sup>, 吕雅帅<sup>2</sup>

(1. 装备学院 研究生管理大队, 北京 101416; 2. 装备学院 复杂电子系统仿真实验室, 北京 101416)

**摘要:**作为近界视景导航中典型地物, 三维几何树模型能提高虚拟场景视觉精度, 增强场景真实感, 但会导致大规模森林场景绘制效率降低, 从而降低视景导航精度。为提高绘制效率以确保视景导航精度, 并提高场景真实感, 采用布告板云算法构建了基于视距的多分辨率树模型, 针对算法在近界视景导航应用中存在的问题进行了改进。为进一步提高近界特别是贴地飞行时高动态视点下视景导航精度, 根据有限视域、威胁区域以及视觉冗余等特点, 提出了一种基于高动态视点的加速绘制算法。通过实验对比分析, 算法大幅提高了场景绘制效率, 增强了场景视觉质量, 提高了虚拟场景导航精度。

**关键词:**视景导航; 布告板云; 贴地飞行; 视域; 视觉冗余

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)06-031-06

## Accelerating rendering of the forest scene in the near-ground visual navigation

BIAN Yanshan<sup>1</sup>, ZOU Peng<sup>2</sup>, YU Ronghuan<sup>2</sup>, LYU Yashuai<sup>2</sup>

(1. Department of Graduate Management, Equipment Academy, Beijing 101416, China;

2. Science and Technology on Complex Electronic System Simulation Laboratory, Equipment Academy, Beijing 101416, China)

**Abstract:** As the typical ground objects in near-ground visual navigation application, the three-dimensional geometrical models of trees can improve the visual precision and the reality of virtual scene. However, it may lead to the decrease in rendering efficiency of a wide forest scene and result in the loss of navigation precision. In order to boost the rendering efficiency to ensure the navigation precision and maintain the sense of reality, billboard clouds algorithm was employed to establish the multi-resolution tree models based on view distance and its disadvantages existing in near-ground visual navigation application were improved. To improve the visual navigation precision with high dynamic viewpoint in the near-ground especially the nap-of-the-earth flight further, an accelerating rendering algorithm based on high dynamic viewpoint was proposed in accordance with the characteristics of limited horizon, threatened area and redundant vision. The contrast analysis of experiments testifies that the proposed algorithm improves the rendering efficiency, enhances the vision quality of the scene and raises the navigation precision of virtual scene.

**Key words:** visual navigation; billboard clouds; nap-of-the-earth flight; field of view; visual redundancy

低能见度条件下, 近界飞行器在距离地面 50m 以内进行超低空飞行, 甚至贴地飞行 (10m 以内) 时, 增强目视能力、及早发现和规避可能的危险, 是提高生存力的有效途径。吴美平等<sup>[1]</sup>以高分辨率地形数据库构建虚拟场景, 结合卫星定位, 通过视景引导, 实现在低能见度条件下沿正确的航线飞行。近界飞行 (尤其是贴地飞行) 安全极易受低空地物威胁, 树以其广泛分布性、结构复杂性在视景导航应用中极具代表性。高精度的三维几何树模型 (数万面片) 能提高虚拟场景视觉精度、增强场景真实感, 但会导致大规模森林场景 (几千棵树以上) 绘制效率降低, 使得视景导航场

景中位置等信息的更新滞后于实际, 从而严重影响视景导航精度。为保证视景导航场景绘制的实时性, 即帧率大于 24fps, 并进一步提高绘制效率、降低场景更新滞后、提高视景导航精度, 当前每秒生成数亿个三角形面片的显卡显然不足以满足需求, 而采用简化的三维模型是一种非常有效的方法。

对几何模型的简化技术主要可以分为 3 类: 基于几何细节层次 (Level of Detail, LOD) 的简化、体纹理简化和基于图像的简化。基于几何 LOD 的简化采用顶点收缩<sup>[2-3]</sup>、边收缩等算法<sup>[4]</sup>, 根据顶点、边的局部几何信息, 对相邻顶点

\* 收稿日期: 2014-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61202129); 国家科技重大专项资助项目 (2013ZX01045-004-002)

作者简介: 卞燕山 (1986—), 男, 湖北公安人, 博士研究生, E-mail: bys02201@163.com;

邹鹏 (通信作者), 男, 教授, 硕士, 博士生导师, E-mail: wld@nudt.edu.cn

或边进行删除、合并。这类算法充分利用顶点或边的拓扑连接信息,适用于表面平滑的物体,而对于拓扑结构复杂、连接性差的几何树模型,则实现效果差、简化程度有限。体纹理简化算法利用三维纹理表现整个森林(将森林划分为不重复小块进行管理),采用平行于地面的面片进行面绘制<sup>[5-6]</sup>,或者根据视线方向对面片进行细微角度调整<sup>[7-8]</sup>。这类方法适用于远景描述大规模森林场景,占用大量内存,场景重复度高,对稀疏分布的地物支持性差。基于图像的简化算法采用一个或多个布告板来代替几何模型<sup>[9-10]</sup>,简化程度高,适用于远景。布告板云技术<sup>[11-12]</sup>将复杂几何模型简化成不依赖视点的少量布告板,视觉效果良好,包括合适的视差和三维显示效果,可以根据视觉远近调整布告板数量,从而满足不同视觉精度,且无须存储任何拓扑信息。魏厚明等<sup>[13]</sup>为进一步提高树木的视觉特征,在布告板云模型基础上实现了软阴影的快速生成与真实感绘制,但需要较多的简化模型面片数,影响大规模森林场景绘制的实时性。魏雅芊<sup>[14]</sup>在文献[11]的基础上,对布告板云算法易产生裂缝和对非平面模型简化效果不佳等问题进行了改进,使其适用于结构较为复杂的建筑物。

利用人眼视觉特性,根据视距远近,采用不同的简化模型构建森林场景 LOD 结构,既保持了场景真实感,也提高了场景的整体绘制效率,是现有大规模森林场景绘制的一般方法<sup>[8-9,15-16]</sup>。现有森林场景绘制主要基于缓慢移动的视点,而近界飞行下视点高动态变化,对场景更新效率要求更高,直接影响视景导航精度。目前国际上一些商业模拟飞行软件,比如 Flight Gear, Microsoft Flight Simulator 等,专注于飞行姿态的控制以提高飞行技能,也缺乏近界飞行大规模森林场景的高效、高逼真

度表现。国内在这方面受应用平台的限制,也缺乏研究。

## 1 基于视距的多分辨率树模型构建

### 1.1 布告板云技术

将同一棵树的模型放在远近不同的位置,人眼区分细节的程度不同,LOD 技术利用这一视觉特点,根据树所在位置与视点距离,构建该树的一组多分辨率模型,绘制时以视距为参数分别调入不同 LOD 层次的模型。

由于飞行区域大,森林中可能包含成千上万棵树,每棵树不宜构建过多的 LOD 模型。本文将原始几何树模型设置为第 0 级 LOD 模型,并以此为基础构建  $n$  级 LOD 模型,共  $n+1$  级 LOD 模型。其中,第 0 级 LOD 模型显示范围为  $[0, \sigma_0]$ ,  $\sigma_0$  为视点与模型的最大距离。本文采用随机布告板云(Stochastic Billboard Clouds, SBC)<sup>[12]</sup> 算法来构建连续的 LOD 模型,它是一种基于布告板云思想、简单高效的树模型简化算法,具有可控制的模型精度、良好的视差等特点。通过设置不同的阈值(顶点与简化布告板平面最大距离)  $\varepsilon_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),构建第  $i$  级 LOD 模型,并设置对应的显示范围  $[\sigma_{i-1}, \sigma_i]$ 。上一级 LOD 模型作为构建下一级 LOD 模型的基础,实现模型间的连贯性;相邻 LOD 模型间通过线性插值实现平滑过渡<sup>[12]</sup>,避免出现“popping”(跳跃)现象<sup>[7]</sup>。为与下文 LOD 模型区分,基于视距的多分辨率模型标记为 LOD<sub>0</sub>。图 1 为 SBC 算法生成的单棵树的 3 级 LOD 简化模型,从左至右依次为原始几何模型、50 个布告板简化模型、24 个布告板简化模型、4 个布告板简化模型,图 1 中每个矩形方框对应一个布告板。随着布告板数量减少,简化模型质量逐渐降低,纹理细节损失逐渐增大,但仍具有可接受的视觉质量。

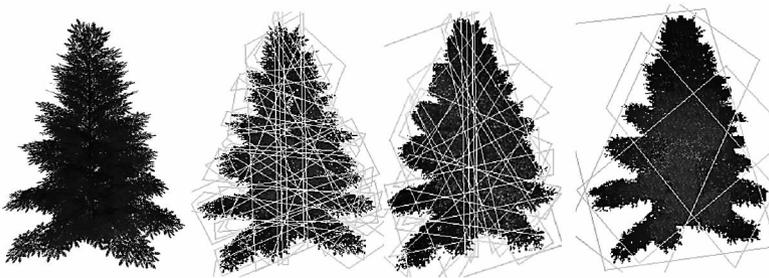


图 1 SBC 算法生成的 LOD 模型

Fig. 1 LOD models generated by SBC algorithm

### 1.2 算法改进

#### 1.2.1 视线惩罚

无论是布告板还是布告板云,都倾向于选择与

视线方向垂直的布告板平面,以实现最优可视化效果。近界飞行特别是贴地飞行时,飞行高度低,模型精度对导航效果影响大,此时视点距离地面高度与

树高接近,即此时视线方向几乎水平,因此布告板云模型应优先选择法向量平行于地面的布告板,将此称之为视线惩罚。

设视线与水平面的夹角为  $\varphi_v$  ( $\varphi_v \in [0, \pi/2]$ ), 布告板法线向量与水平面的夹角为  $\varphi_n$  ( $\varphi_n \in [0, \pi/2]$ ), 则对第  $i$  级  $LOD_i$  模型  $\varphi_v(i)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 计算如下:

$$\varphi_v(i) = \arctan \frac{H}{\sigma_i} \quad (1)$$

式(1)中,  $H$  为飞行高度。对导航精度影响较大的主要是贴地飞行, 视距较近, 模型精度具有重要影响。因此,  $H$  值一般设置为贴地飞行高度。在采用 SBC

算法构建  $LOD_i$  模型时, 每一个三角形面片投射到对应布告板平面的面积按式(2)进行缩放。

$$s(i) = |\varphi_v(i) - \varphi_n| \cdot \frac{2}{\pi} \quad (2)$$

三角形面片的投影面积经过缩放后, 法向量与视线方向平行的布告板平面将被优先选择, 从而提高模型精度。图 2(a) 为原始几何模型, 图 2(b) 为原始 SBC 算法生成的简化模型, 为增强对比, 仅仅对树叶进行了简化。图 2(c) 为 SBC 算法融合了视线惩罚的效果, 此时视线为水平方向, 简化模型倾向于与水平面垂直的布告板, 与图 2(b) 相比, 纹理分布更为紧凑。

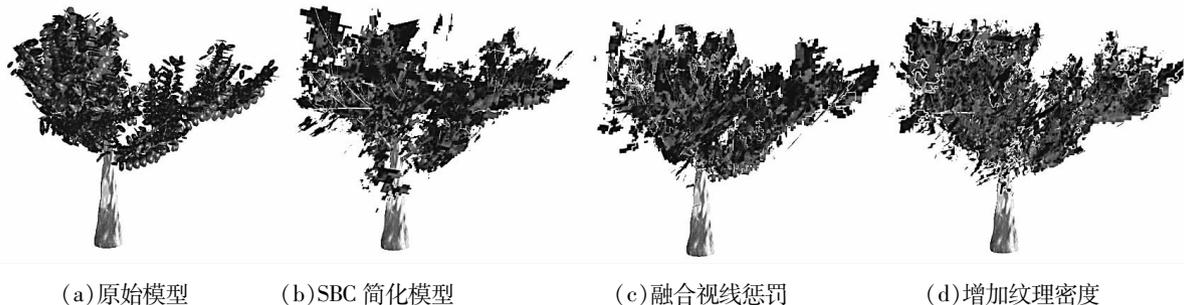


图 2 SBC 算法改进

Fig. 2 Improvements on SBC algorithm

### 1.2.2 纹理密度增加

构建  $LOD_i$  模型中, 由于布告板数量减少, 多个三角形面片可能投射到重叠区域, 以及三角形面片在纹理投射过程中的缩放, 导致布告板上的纹理分辨率不断降低, 模型纹理细节损失严重, 特别是对于  $LOD_i$  级别较高的模型, 如第  $n$  级  $LOD_i$  模型, 纹理细节损失最严重。本文采用如下方法进行改进: 在纹理投射过程中, 将三角形面片的纹理投射到与其距离为  $2\varepsilon$  的所有布告板上, 而不是 SBC 算法中的  $\varepsilon$ , 使得布告板纹理密度得到增强。由于简化模型距离视点较远, 可以牺牲一定的模型精度换取视觉效果。图 2(d) 为 SBC 算法融合了视线惩罚以及增加纹理密度后的简化模型, 与图 2(c) 相比, 图 2(d) 纹理细节增加, 更接近图 2(a) 的纹理密度, 提高了远景视觉感知能力。

## 2 高动态视点场景加速绘制

### 2.1 有效视域

近界飞行中视点高动态变化, 比如急速转弯、快速俯冲等, 而飞行员的视觉感知范围是有限的(有效视域), 且飞行员视点停留在导航显示器上的时间极其受限, 以扫视的方式掠过显示器或短暂停留, 注意力主要集中于飞行前向以及潜在的威胁地物(距离飞行员一定范围内且高度高于当前飞行高度的树或

其他地物)。对有效视域内的树采用高分辨率  $LOD$  模型, 提供高精度地物参考; 而对有效视域外的树采用低分辨率  $LOD$  模型, 可以减少绘制图元数量, 加速绘制, 将飞行员视点引导至潜在威胁地物。

设飞行员在飞行过程中的有效视场角为  $\phi$  的辐射区域, 按照  $15^\circ$  的间隔将视场角划分为  $N = \lfloor (\phi/15 + 1)/2 \rfloor \cdot 2$  ( $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整) 个子区域, 如图 3 所示, 由中心线(即飞行正前方向)向外对称分为  $N/2$  个子区域。根据视距构建了  $LOD_i$  模型, 飞行过程中有效视域并不是整个场景, 对有效视域外的模型进一步降低精度。

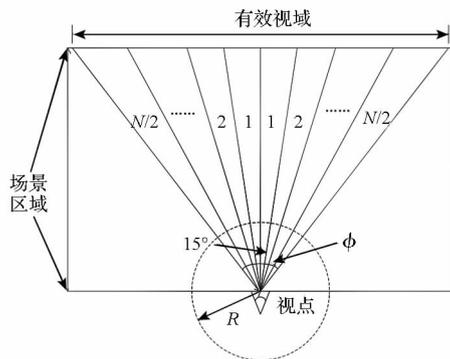


图 3 有效视域划分

Fig. 3 Division of the valid field of view

有效区域从视域中心向外扩展时, 注意力逐渐减弱, 即模型精度逐渐降低。在已经构建的  $LOD_i$

模型基础上,按照视域中心向外的顺序对称扩展(1~N/2),如图 3 所示,建立基于视域的 LOD 模型,标记为  $LOD_V$ ,模型层次  $LOD_V(j)$  由式(3)决定。

$$j = LOD_V(j) = LOD_D(i) + C - 1 \quad (3)$$

式中, $C$  为子区域编号,且  $1 \leq C \leq N/2$ 。位于有效视域外的树模型  $LOD_V$  均采用第  $n$  级  $LOD_D$ 。因此,每一棵树的 LOD(记为  $LOD_{DV}$ ) 级别  $k(0 \leq k \leq n)$  由式(4)决定。

$$\begin{cases} LOD_{DV}(k) = \max[LOD_D(i), LOD_V(j)] \\ LOD_D(i) = i \\ LOD_V(j) = j \end{cases} \quad (4)$$

## 2.2 威胁区域

近界飞行尤其是贴地飞行高度低,且飞行器(比如直升机)处于高度灵活状态,速度快,可进行急速转弯、倒退等姿态飞行,因此极易受地物威胁。在飞行器周围一定范围内,设定一个威胁区域,对该区域内高于飞行高度的地物采用高分辨率模型,能为飞行员提供较准确的威胁地物参考,便于及时做出反应。高动态视点下飞行方向多变,威胁区域设置为以当前视点在地面的投影为中心的圆形区域。设飞行速度为  $v$ ,飞行员根据威胁地物做出反应的时间为  $t$ ,飞行高度  $H$ ,树高为  $h$ ,以视点距离为  $R(R = vt)$  的圆形区域均属于威胁区域,如图 3 中虚线圆环区域。位于威胁区域内的模型,其多分辨率模型(记为  $LOD_T$  模型)的层次  $LOD_T(t)$  根据式(5)进行选择:

$$t = LOD_T(t) = \begin{cases} 0, R \leq vt \text{ 且 } h \geq H \\ LOD_{DV}(k), R > vt \text{ or } h < H \end{cases} \quad (5)$$

式中, $LOD_{DV}(k)$  为式(4)确定的 LOD 模型层次。由式(6)确定综合考虑有效视域与威胁区域的 LOD 模型(记为  $LOD_{DVT}$  模型)的层次  $LOD_{DVT}(l)$ :

$$l = LOD_{DVT}(l) = \min[LOD_{DV}(k), LOD_T(t)] \quad (6)$$

## 2.3 视觉冗余

人类视觉系统对于图像场的任何变化,并不是都能感知的,即为视觉冗余。图像处理领域利用人眼视觉冗余特性,实现了图像压缩<sup>[17]</sup>。对于高速移动的视点,大量密集的高分辨率树模型会导致视觉冗余;采用较低分辨率的模型,舍弃一部分细节,可降低视觉冗余度。因此,对于快速移动的视点,降低模型精度,能实现绘制加速。

表 1 平均意见得分(MOS)

Tab.1 Mean opinion score(MOS)

MOS	质量	损失
5	很好	难以察觉
4	好	可察觉但不恼人
3	一般	有点恼人
2	差	恼人
1	很差	很恼人

由于人眼视觉冗余是一个主观判断过程,冗余度因人而异,因此需要建立一套主观评价指标。平均意见得分(Mean Opinion Score, MOS)<sup>[18]</sup>是通信领域压缩/解压缩质量系统性能的量化指标,已被用于图像<sup>[19]</sup>和视频<sup>[20]</sup>领域的质量评价(表 1)。快速变换的视景导航场景显示类似视频,因此可以采用 MOS 进行质量评价,选择合适的 LOD 模型层次。

在已构建的多分辨率  $LOD_{DVT}$  模型基础上,根据当前飞行速度(水平速度)与高度,进行 MOS 量化;其参考标准为本文 2.2 节中确定的多分辨率模型分布,即此时 MOS 为 5。一般认为, MOS 大于 4 时具有良好的视觉效果。飞行速度与高度具有连续性,为避免模型频繁调度,需将速度  $v$  与高度  $H$  离散化,设置一定的间隔范围(分别为  $\Delta v$  和  $\Delta H$ ),在同一范围内采用同一模型,即:  $v = m\Delta v$  ( $m = 0, 1, 2, 3, \dots, M$ ),  $H = n\Delta H$  ( $n = 1, 2, 3, \dots, N$ ),其中  $M$  和  $N$  分别对应最大速度与最大高度的参数。具体计算步骤如下:

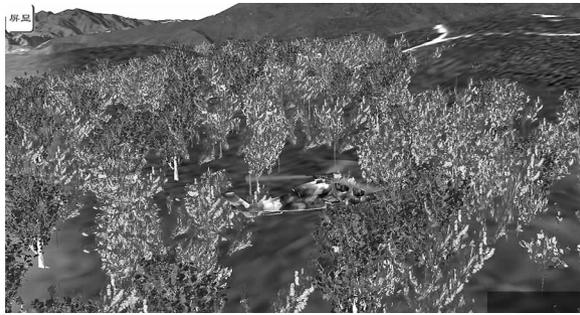
- 1) 当前飞行高度  $H$ (初始值时  $m = 0$ );
- 2) 当前水平飞行速度  $v$ (初始值时  $n = 1$ );
- 3) 评价当前第  $p$  级  $LOD_{DVT}$  模型(初始时  $p = l$ )的 MOS;
- 4)  $MOS > 4$ ,  $p = p + 1$ , 并转步骤 3; 否则,  $p = p - 1$ , 并转步骤 5;
- 5) 如果  $p < l$ , 则令  $p = l$ , 保存当前高度  $H$  与速度  $v$  对应的  $LOD_{DVT}$  模型层次  $p$ , 作为最终绘制模型 LOD, 并转步骤 6;
- 6) 如果  $n > N$ , 转步骤 7; 否则,  $n = n + 1$ , 转步骤 2;
- 7) 如果  $m > M$ , 转步骤 8; 否则,  $m = m + 1$ , 转步骤 1;
- 8) 结束。

上述步骤是一个监督训练过程,需要花费大量时间进行预先处理,一旦结果确定,在场景绘制中可以节省大量时间,提高绘制效率和导航精度,具有重要现实意义。

### 3 实验结果

实验采用 XFrog 软件制作的 5 种几何树模型作为第 0 级 LOD 模型,树的高度随机生成,森林场景覆盖范围为  $10\text{km} \times 10\text{km}$ , 共含 4 万棵树。最大近界飞行高度为  $H_{\text{max}} = 1000\text{m}$ ,  $\Delta H = 20\text{m}$ ,  $N = 50$ , 有效视场角  $\phi = 120^\circ$ ,  $\varepsilon$  以树模型的包围球半径  $r$  计算,且  $\varepsilon = 0.1pr$  ( $p$  为 LOD 模型层次)。最大水平飞行速度  $v_{\text{max}} = 80\text{m/s}$  (直升机的最大贴地飞行速度为  $20\text{m/s}$ ),  $\Delta v = 10\text{m/s}$ ,  $m = 8$ , 威胁反映时间  $t = 2\text{s}$ 。

为对比分析,本文采用 4 种方法生成多分辨率森林场景,并随后进行了对比分析:(A)全部采用几何树模型;(B)原始 SBC 算法(图 4(a));(C)SBC 改进算法,但排除有效视域、威胁区域和视觉冗余特征;(D)SBC 改进算法,并融合有效视域、威胁区域和视觉冗余特征(图 4(b))。不同方法的绘制效率对比如图 5 所示。



(a) 方法 B 生成的场景



(b) 方法 D 生成的场景

图 4 不同方法生成的多分辨率森林场景  
Fig. 4 Multi-resolution forest scene created in different methods

从图 4(b)中可以看出,近处和对飞行构成潜在威胁的树采用高分辨率模型,为飞行员提供高精度的参考物体,提高导航精度;远处的树采用低分辨率模型,增强了场景层次感,提高了绘制效率。图 4(a)全部采用 SBC 算法构建了简化模型,对于近处的树,简化模型导致了模型精度和纹理的损失,对场景真实感影响较大。为了提高真实

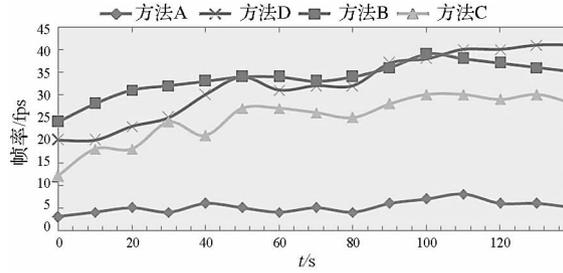


图 5 绘制帧率对比

Fig. 5 Comparison of rendering frame rates

感,解决方法是增加布告板云模型的面片数。不同分辨率树模型覆盖的区域与没有地物覆盖的地形区域(图 4(b)中右上角)形成对比,增强了视景导航场景真实性,并可用于模拟飞行训练中进行贴地飞行训练,提高飞行技能。

表 2 最大水平滞后误差

Tab. 2 The maximum hysteresis error in horizontal direction

方法	平均帧率 (fps)	最大水平滞后误差 (m)
A	6	13.3
B	34	2.4
C	23	3.5
D	32	2.5

采用不同方法进行场景绘制,平均帧率与最大水平滞后误差如表 2 所示。从图 5 中可以看出,方法 A 全部采用高精度模型,绘制效率最低(平均帧率 6 fps),无法满足实时性需求。对于以  $v_{\text{max}}$  速度进行水平飞行的飞行器,设三维场景绘制帧率为  $f$ ,绘制每帧画面的时间为  $1/f$ ,在该时间段内飞行器移动距离为  $v_{\text{max}}/f$ 。因此方法 A 将产生  $80/6 \approx 13.3\text{m}$  的水平滞后误差,见表 2。方法 B 和方法 D 都实现了实时的绘制效率(平均帧率分别为 34fps 和 32fps),与方法 A 相比,水平显示误差分别为  $80/34 \approx 2.4\text{m}$  和  $80/32 \approx 2.5\text{m}$ ,在误差允许范围内(一般为 5m)。两种方法绘制效率相近,方法 B 效率略高于方法 D,对水平误差影响较小。当贴地飞行时,方法 D 需要绘制少量高精度几何模型,绘制效率较低(帧率约为 20fps,如图 5 所示),误差为  $20/20 = 1\text{m}$  (以最大贴地飞行速度  $20\text{m/s}$  计算)。随着飞行高度增大,方法 D 在方法 B 的基础上进行了优化,使得绘制效率高于 B,即曲线的后半部分。同时,方法 D 在贴地飞行中具有优于方法 B 的模型精度。方法 C(平均帧率 23fps)相比于方法 B 和方法 D 绘制帧率较低,但与方法 A 相比,绘制效率大幅提高,基本达到实时性要求。由于方法 C 没有进行有效视域、视觉冗余等优化,绘制效率低

于方法 D;特别是在贴地飞行时(以最大贴地飞行速度 20m/s 计算),虽然误差得到了控制(20/12 ≈ 1.7m),但由于此时绘制帧率较低(12fps),场景更新实时性受制,制约了视景导航平台其他信息显示。方法 D 在方法 C 的基础上采用了有效视域剔除和视觉冗余处理,降低了大量模型的分辨率,虽然在威胁区域中可能导致部分树采用最精细模型,但绘制效率相比于方法 C 提升了约 40%(表 2)。实验分析证明,本文算法提升了近界视景导航中的森林场景绘制效率,并维持了场景真实感,提高了导航场景显示精度。

## 4 结论

本文对近界视景导航应用中森林场景加速绘制展开研究:为提高大规模森林场景绘制效率以满足近界视景导航精度需求,并尽量增强场景真实感,采用一种布告板云算法构建了基于视距的多分辨率 LOD 模型;为适应近界飞行特定应用,对布告板云算法进行了适应性改进,集成了视线惩罚和纹理密度增加,并利用改进的算法构建了树的离散 LOD 模型;在场景绘制阶段,为提高绘制效率,分析了视景导航的应用特征,结合有效视域、威胁区域以及视觉冗余来优化 LOD 模型选择。实验表明,文中方法提高了绘制效率,增强了场景真实感,提高了视景导航平台与真实环境的一致性与可靠性。

## 参考文献 (References)

- [1] 吴美平, 逯亮清. 北斗双星系统车辆定向技术[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(3): 89 - 93.  
WU Meiping, LU Liangqing. Research on vehicle heading determination through beidou bi-satellite system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(3): 89 - 93. (in Chinese)
- [2] Schroeder W J, Zarge J A, Lorensen W E. Decimation of triangle meshes [C]//Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM, New York, USA, 1992: 65 - 70.
- [3] Soucy M, Laurendeau D. Multiresolution surface modeling based on hierarchical triangulation[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1996, 63(1): 1 - 14.
- [4] Erikson C, Manocha D. Gaps: general and automatic polygonal simplification [C]//Proceedings of the 1999 Symposium on Interactive 3D Graphics, ACM, New York, USA, 1999: 79 - 88.
- [5] Neyret F. Modeling, animation, and rendering complex scenes using volumetric textures [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1998, 4(1): 55 - 70.
- [6] Amara Y, Meunier S, Marsault X. A GPU framework for the visualization and on-the-fly amplification of real terrains [C]//Advances in Visual Computing, Springer Berlin Heidelberg, 2007: 586 - 597.
- [7] Decaudin P, Neyret F. Rendering forest scenes in real-time [C]//EGSR04: 15th Eurographics Symposium on Rendering, Sweden: Eurographics Association Aire-la-Ville, 2004: 93 - 102.
- [8] Behrendt S, Colditz C, Franzke O, et al. Realistic real-time rendering of landscapes using billboard clouds [C]//Computer Graphics Forum, Houston, Texas, Blackwell Publishing, 2005, 24(3): 507 - 516.
- [9] Colditz C, Coconu L, Deussen O, et al. Trends in real-time landscape visualization and participation [M]. Konstanz: Bibliothek der Universität Konstanz, 2005: 97 - 106.
- [10] Fuhrmann A, Mantler S, Umlauf E. Extreme model simplification for forest rendering [C]//Proceedings of the First Eurographics Conference on Natural Phenomena, Eurographics Association, 2005: 57 - 67.
- [11] Decoret X, Durand F, Sillion F X, et al. Billboard clouds for extreme model simplification [C]//ACM Transactions on Graphics (TOG), San Diego, California: ACM, 2003, 22(3): 689 - 696.
- [12] Laceywell J D, Edwards D, Shirley P, et al. Stochastic billboard clouds for interactive foliage rendering [J]. Journal of Graphics, GPU and Game Tools, 2006, 11(1): 1 - 12.
- [13] 魏厚明, 刘东香, 曹卫群, 等. 布告板云树木模型的阴影快速生成与绘制 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(5): 771 - 777.  
WEI Houming, LIU Dongxiang, CAO Weiqun, et al. Rapid shadow generation and rendering for the billboard cloud tree model [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2011, 23(5): 771 - 777. (in Chinese)
- [14] 魏雅芊. 基于 billboard clouds 的三维模型简化系统 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
WEI Yaqian. 3D model simplification based on billboard clouds [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [15] Liu F, Hua W, Bao H J. GPU-based dynamic quad stream for forest rendering [J]. Science China Information Sciences, 2010, 53(8): 1539 - 1545.
- [16] 淮永健, 王梅峰, 左正兴, 等. 虚拟环境中森林植被的实时可视化技术研究 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(35): 33 - 36.  
HUAI Yongjian, WANG Meifeng, ZUO Zhengxing, et al. The state of real-time rendering of vegetation in VE [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(35): 33 - 36. (in Chinese)
- [17] 张军, 廉蓓, 黄英君, 等. 联合二代 Bandelet 和 Wavelet 对图像进行分层压缩 [J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(5): 54 - 59.  
ZHANG Jun, LIAN Lin, HUANG Yingjun, et al. Two-layered image compression combining wavelet and the second generation bandelet [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(5): 54 - 59. (in Chinese)
- [18] Ribeiro F, Florêncio D, Zhang C, et al. CrowdWos: an approach for crowdsourcing mean opinion score studies [C]//2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), IEEE, 2011: 2416 - 2419.
- [19] 蒋刚毅, 黄大江, 王旭, 等. 图像质量评价方法研究进展 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(1): 219 - 230.  
JIANG Gangyi, HUANG Dajiang, WANG Xu, et al. Overview on image quality assessment methods [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(1): 219 - 230. (in Chinese)
- [20] 黄文辉, 陈仁雷, 张家谋. 数字视频图像质量客观测量方法的改进与实现 [J]. 北京邮电大学学报, 2005, 28(4): 87 - 91.  
HUANG Wenhui, CHEN Renlei, ZHANG Jiamou. Improvement and implementation of objective digital video quality measurement [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2005, 28(4): 87 - 91. (in Chinese)