Journal of System Simulation

Volume 28 | Issue 9

Article 19

8-14-2020

Parallel Rendering of Massive Aircraft CAD models

Dunming Tan 1. The First Aeronautical Institute of PLA Air Force, Xinyang, 464000, China;;

Guoting Cao 1. The First Aeronautical Institute of PLA Air Force, Xinyang, 464000, China;;

Juanfang Lang 1. The First Aeronautical Institute of PLA Air Force, Xinyang, 464000, China;;

Yang Shuo 2. No. 95903 Unit of PLA, Wuhan, 430331, China;

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Parallel Rendering of Massive Aircraft CAD models

Abstract

Abstract: A parallel rendering method was presented with PC clusters in order to render massive aircraft CAD models in real time with high resolution. PC clusters were used for sort-first based rendering, BVH tree was built for efficient frustum culling, DID screens were utilized for high resolution display. In addition, multi-CPUs were exploited for thread based parallel out-of-core paging, frustum culling, BVH tree building and rendering. The experimental results show that by this parallel rendering PC clusters consists of 15 PC nodes, aircraft CAD models with 1.7 million of triangles can be rendered in real-time with resolution of 6800* 2304 pixels.

Keywords

massive CAD models, parallel rendering, cluster, multi-threads

Recommended Citation

Tan Dunming, Cao Guoting, Lang Juanfang, Yang Shuo. Parallel Rendering of Massive Aircraft CAD models[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 2049-2054.

第28卷第9期 2016年9月

飞行器大数据量 CAD 模型并行绘制

谈敦铭¹,曹国廷¹,郎娟芳¹,杨朔²

(1. 空军第一航空学院,河南 信阳 464000; 2. 中国人民解放军 95903 部队,湖北 武汉 430331)

摘要: 针对飞行器 CAD 模型的数据量非常大,难以实现高分辨率实时绘制的问题,提出了一种基 于拼接屏的多 CPU 并行绘制方法。集群绘制节点之间通过基于 Sort-first 的拼接屏并行绘制,将 CAD 模型构建动态 BVH 树,快速剔除单个节点视锥体外不可见的部分以降低负载,绘制结果通过拼接 屏输出显示。集群绘制节点内部利用多核处理器开展数据调度、可见性剔除、BVH 树更新、绘制 等多线程并行进一步提高性能。实验结果表明,利用 15 个绘制节点并行绘制包含 1 700 万三角面 片的飞行器大数据量 CAD 模型,可实时绘制分辨率高达 6800*2304 像素的图像。

关键词: 大数据量 CAD 模型;并行绘制;机群;多线程

中图分类号: TP391.7 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 09-2049-06

Parallel Rendering of Massive Aircraft CAD models

Tan Dunming¹, Cao Guoting¹, Lang Juanfang¹, Yang Shuo²

(1. The First Aeronautical Institute of PLA Air Force, Xinyang, 464000, China; 2. No. 95903 Unit of PLA, Wuhan, 430331, China)

Abstract: A parallel rendering method was presented with PC clusters in order to render massive aircraft CAD models in real time with high resolution. PC clusters were used for sort-first based rendering, BVH tree was built for efficient frustum culling, DID screens were utilized for high resolution display. In addition, multi-CPUs were exploited for thread based parallel out-of-core paging, frustum culling, BVH tree building and rendering. The experimental results show that by this parallel rendering PC clusters consists of 15 PC nodes, aircraft CAD models with 1.7 million of triangles can be rendered in real-time with resolution of 6800* 2304 pixels.

Keywords: massive CAD models; parallel rendering; cluster; multi-threads

引言

实时可视化是虚拟仿真等应用的基础,特别是 在航空航天领域,飞行器的研制周期长、成本高、 结构复杂,通过虚拟仿真训练不仅可缩短周期、而 且能降低成本。但是飞行器的 CAD 模型数据量非 常大,如波音 777 有 600 多万个零件和连接件,几



收稿日期: 2015-05-18 修回日期: 2015-07-24; 基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0036);

作者简介:谈敦铭(1983-),男,甘肃兰州,博士,讲师,研究方向为虚拟现实,图形学:曹国廷(1972-), 男,山东烟台,本科,副教授,研究方向为虚拟仿 真、发动机原理与构造。 何模型包含 3.5 亿三角面片,存储量超过 12 GB,因此不但实时绘制十分困难,而且无法输出高分辨率的图形以充分展示飞行器零部件的细节。

虽然国内外也存在一些飞行器大数据量 CAD 模型实时绘制的研究,除了使用拥有 256 GB 内存、 128 个处理器的超级计算机 Manta 系统能够输出较 好的绘制效果并达到 40 帧的平均刷新率外^[1],其 他研究在场景浏览过程中不仅难以避免显示瑕疵、 而且平均刷新率只有 10 帧左右^[2-5]。此外,所有的 研究中系统的输出分辨率最高只有 1024*768 像 素,进一步提高将影响实时绘制性能。因此,现有 的研究无论是图形的刷新率、分辨率都比较低,无

第28卷第9期	系统仿真学报	Vol. 28 No. 9
2016年9月	Journal of System Simulation	Sep., 2016

法应用于虚拟仿真训练。

并行绘制能够以较低的成本实现高性能图形 绘制,特别是建立在高速局域网连接的 PC 集群并 行图形绘制更是其中的研究热点^[8-10]。利用集群并 行绘制不仅可以降低单个绘制节点的负载,提高实 时刷新率,而且集群输出的图像组合在一起可以达 到较高分辨率,非常适合飞行器虚拟仿真训练应用。

1 基于拼接屏的节点间并行绘制

1.1 基于 DID 拼接屏并行绘制系统的组成

并行绘制系统的设备组成是由大数据量 CAD 模型可视化的需求决定的。为了充分展现飞行器 CAD 模型各个零部件的特征细节,需要并行绘制 系统能够显示超大分辨率的图像。目前的显示设备 无论是显示器、投影仪都难以突破分辨率的限制, 普遍的做法是采用多台显示器或者投影仪组合显 示,特别是多通道投影拼接融合系统。

多通道投影拼接融合系统由多台投影仪将并 行绘制系统各个绘制节点输出的图像投影到大屏 幕,最终形成高分辨率、高亮度的图像,比如浙江 大学的 Parallel-SG 系统就采用的是 5*3 的投影大 屏幕^[6]。但是要使用多通道投影拼接融合,需要额 外的几何校正与边缘融合来实现各个投影仪输出 图像的对齐与无缝整体显示。

针对多通道投影拼接融合系统存在的问题,本 文设计了一套 DID 拼接屏显示系统,15 台普通 PC 机组成整个系统的绘制节点,每个绘制节点输出的 图像连接到右上角对应的一个 DID 拼接屏,最终 合并成一个高分辨率的整体图像。绘制节点通过局 域网连接实现数据、信息传输共享。

与多通道投影拼接融合系统相比, DID 拼接屏 无需几何校正、边缘融合, 输出的图像也不存在重 叠区域的分辨率损失, 因此绘制效率高, 此外只需 要一个 DID 屏就可以实现投影仪与大屏幕的功能, 无需特殊设备因此成本低, 还具有高亮度、高对比 度、寿命长、可任意扩展等优点。与现有的大多数 并行绘制系统在提高绘制分辨率方面借助于多投 影仪拼接相比,本课题通过最新出现的 DID 拼接 屏,避免了几何校正、边缘融合等后处理过程,同 时可以减少融合带损失。

DID 拼接屏存在的缺点是屏与屏之间有一条 窄缝,但是并不明显,今后随着工艺的进步,可进 一步减少或消除。

1.2 DID 拼接屏并行绘制系统的工作原理

1.2.1 图像拼接与网络同步

对于集群式并行图形绘制系统,由于图像由多 个绘制节点生成,为了保证最终输出的图像显示在 DID 拼接屏后连接组合成为一个整体,需要对每个 绘制节点的图形生成参数做相应的设置。在计算机 图形学中,图形绘制采用的是视锥体剪裁模型,要 实现 DID 拼接屏输出的图像形成一个整体,需要 按照各个 DID 拼接屏的位置比例缩放后设置对应 绘制节点的视锥体,如图 1 所示,通过非对称视锥 体,使得相邻绘制节点对应 DID 拼接屏图像的左 右上下相连。



图1 并行绘制视锥体拼接原理

这就需要设置各绘制节点的 Projection 矩阵, 而且仅在初始化时设置,普通可视化应用程序无须 较大修改就可移植到并行绘制。

实时绘制时,为了保证各个绘制节点的状态与 数据、视点变换、几何模型位置、姿态一致,需要 通过网络同步。并行绘制中的网络同步一般采用主 从模式,一个主节点将控制指令和数据(如鼠标键 盘消息,观察者、几何模型位置信息)发送到各个 绘制节点,实现各个节点的数据同步。 第28卷第9期 2016年9月

1.2.2 负载分配与均衡

负载分配与均衡是集群并行绘制系统的主要 研究内容,同时也是提高系统能的重要途径。

Sort-first 类型的集群并行绘制系统,主要开销 和不足是有大量不可见的图元进入绘制节点图形 绘制管线。由于几何模型由整个集群中的绘制节点 共同绘制,几何模型分布在各个绘制节点的视锥体 内部,因此降低负载最简单有效的途径是通过可见 性判断,剔除绘制节点视锥体外部不可见的图元。 比如文献[7]采用了四叉树加速结构构建大地形场 景,结合基于视点距离的规则网格多分辨率层次表 示实现地形并行绘制。然而 CAD 模型并不像大地 形有规则的网格拓扑结构,而且数据也并不是二维 XY 方向上的高程起伏,而是复杂的空间任意分布, 因此无法直接借鉴现有系统的处理方法。为此,本 文采用了 BVH(Bounding Volume Hierarchy)层次包 围体结构实现负载分配。

BVH 将几何模型按照空间位置划分为若干等 级的包围体,每个包围体可包含子包围体,如图 2 中的三角面片以及包围框所示,整个几何模型用 V 表示,黑色包围体包含 V_L(左上侧方框包围)和 V_R(右下侧方框包围)的子包围体。



图 2 包围体树视锥剔除

BVH 的构建依据是 SAH(Surface Area Heuristic)算法,SAH 算法中选择的最优分割面使 得模型遍历、剔除、绘制等处理时间 C_T 最小,见 公式(1)。其中 K_T 是遍历一个节点所需要花费的时间, K_I 是剔除、绘制一个节点所需要花费的时间,

SA(V)是当前模型节点包围盒的面积, $SA(V_L)$ 是分 割面生成的左子节点 V_L 的包围盒面积, $SA(V_R)$ 是 分割面生成的右子节点 V_R 的包围盒面积, T_L 是左 子节点 V_L 所包含的三角面片数量, T_R 是右子节点 V_R 所包含的三角面片数量。

$$C_T = K_T + K_I \left(\sum \frac{SA(V_L)}{SA(V)} T_L + \frac{SA(V_R)}{SA(V)} T_R\right)$$
(1)

LOD 是减少单个绘制节点负载的另外一个重要途径^[11]。当模型离视点较远,无需较高的显示精度,如图3所示,选择低精度的几何模型,减少实时绘制的面片数量,从而降低负载、保证实时绘制。



图 3 LOD 实现负载均衡

2 基于多 CPU 的节点内并行绘制

并行绘制,仅仅依赖集群加速是不够的,随着 多 CPU 的普及,还需要在集群绘制节点内部挖掘 多 CPU 的潜力,更进一步的提高性能,降低集群 系统的成本。

传统的图形绘制程序基本上在单个 CPU 上执 行,在绘制前需要等待完成数据加载、层次包围体 树 BVH 构建、视锥体剔除等处理流程。这些任务 总体上相对独立,只是存在一定的数据交换,因此 可以在单个绘制节点内部,通过多线程技术进行并 行加速。

基于内外存的动态数据交换是最主要的多线 程并行绘制加速手段,这是因为飞行器大数据量 CAD 模型的存储量超过了内存大小,在实时绘制

第 28 卷第 9 期	系统仿真学报	Vol. 28 No. 9
2016年9月	Journal of System Simulation	Sep., 2016

的过程中,需要动态调度线程及时将可见的几何模型从硬盘加载到内存,同时将不可见的几何模型从内存释放。几何模型动态调度的依据是视锥剔除,见图 4。视锥剔除也需要较多的 CPU 计算时间,因此也单独建立一个线程并行执行。



图 4 动态调度预加载与延迟释放视锥角

为了解决动态调度延迟以及内存反复释放加 载对系统性能的影响,视锥体剔除线程通过适当放 大视锥角,设计了一种基于视锥体的几何模型内外 存调度预加载、延迟卸载机制,见图4所示。实际 视锥体如图中黑色的锥体,实际视锥体之外的红色 几何模型也被调度线程提前加载到内存,而且当几 何模型不可见时并不是立即释放,只有超出调度视 锥体后才被释放,从而巧妙的解决了不同视点距离 处的几何模型何时加载以及卸载的判断依据与时 机。调度视锥体的放大系数(即调度视锥角与实际 视锥角的比值)可以根据场景复杂程度、计算机内 外存、总线等配置适当调整。

视锥剔除线程可通过层次包围体树 BVH 加 速,但是当几何模型位置、姿态发生变化时,需要 重新构建BVH,由于飞行器CAD模型数据量很大, 重建需要较长时间,为避免绘制等待,将构建也开 启一个线程。虽然开启多线程后,BVH 重建仍然 需要一定的时间,但可以与绘制并行,不再抢夺同 一个 CPU 的执行时间。此外,由于几何模型的移 动是连续的,图形绘制每秒刷新率至少在 30 帧以 上,而 BVH 重建可以在 100 ms 以内完成,因此在 BVH 树重建完成之前的短时间内,即便是暂时使 用之前的 BVH 树,也可以保证绘制结果的正确性, 从而避免 BVH 重建需要漫长的时间而导致图形绘 制刷新率下降。

最后是图形绘制线程,由于几何模型动态调度、视锥体剔除、BVH 树重建等计算都被作为 单独的线程并行执行,因此绘制线程的负载大大 减轻,无需大量的计算等待时间。绘制线程还需 要查询各个可见几何模型在屏幕上实际显示的 像素数量,结合该几何模型当前 LOD 精度等级 包含的面片数量,利用面片密度调整 LOD 精度

动态调度线程、视锥体剔除线程、BVH 重建 线程、图形绘制线程并非孤立,各个线程存在一定 的数据交互与同步。BVH 重建线程构建 BVH 模型 树,剔除线程利用该 BVH 模型树判断可见性并得 到可见几何模型列表,动态调度线程利用该几何模 型可见列表预加载潜在可见的几何模型,并对比内 存中已经加载的几何模型,及时释放调度视锥体之 外的几何模型。绘制线程根据视锥剔除线程的可见 几何模型列表,利用动态调度线程加载的几何模型 数据完成绘制。

3 实验结果

基于本文上述方法,对飞行器大数据量 CAD 模型并行绘制方法进行测试,采用 5*3 的 DID 液 晶拼接屏显示系统,包含 15 台普通计算机作为绘 制节点,分辨率高达 6 800* 2 304 像素。实验以某 飞机(18 522 个零部件,1700 万三角面片,1.13 GB 数据)为验证对象,如图 5 所示。

为了测试系统并行绘制的可扩展性,采用第1 节提出的基于 DID 拼接屏的集群节点间并行绘制 方法,分别配置了不同数量的绘制节点,测试场景 从可见到不可见的过程中平均帧刷新率,结果如图 6 所示。 第28卷第9期 2016年9月



(a) DID 拼接屏绘制



(b) 局部视图

图 5 测试飞行器及其 DID 拼接屏并行绘制效果



图 6 集群节点间并行绘制帧刷新率统计

从图 6 可见:随着绘制节点数的增加,系统的 整体帧刷新率有明显提高,但还达不到线性增加。 这是由于整个场景总的绘制模型是固定的,随着绘 制节点数的增加,可以有效的分担负载,从而提高 帧刷新率。

采用第2节提出的基于多CPU的集群节点内 并行绘制方法,采用多线程调度、视锥剔除、BVH 重建,对不同负载情况下,平均每帧处理时间进行 测试,结果如图7所示。

从图 7 可见:视锥剔除、数据调度以及 BVH 重建并未大量占用 CPU 的处理时间,可以快速剔

除不可见的模型,调度新可见的几何模型并在模型 位置变化时对场景重建 BVH 树。



4 结论

本文提出了一种适合飞行器大数据量 CAD 模型的 DID 并行绘制方法,可以实现高分辨率实时 绘制,为相关复杂产品虚拟仿真应用探索了一条成 本合理、技术先进、便于实现的途径。

今后的工作包括:集群绘制节点间的负载均衡 方法还比较单一,需要完善并探索新的方法。集群 绘制节点内多线程并行处理时,各个线程存在数据 同步与保护,对并行性能有影响,需要进一步提高 并行性。

参考文献:

- Stephens A, Boulos S, Bigler J, et al. An application of scalable massive model interaction using shared memory systems [C]// Proceedings of the Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization. Aire-la-Ville, Switzerland: Eurographics Association Press, 2006: 19-26.
- [2] Tian Fenglin, Hua Wei, Dong Zilong, et al. Adaptive voxels: interactive rendering of massive 3D models [J]. The Visual Computer(S0178-2789), 2010, 26(6): 409-419.
- [3] Peng C and Cao Y. GPU-based streaming for parallel level of detail on massive model rendering [D]. Virginia, USA: Virginia Tech. Computer Science, 2011.
- [4] Humphreys G, Houston M, Ng R, et al. Chromium: a stream-processing framework for interactive rendering on clusters [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2002, 21(3): 693-702.