

实时闭环红外场景仿真技术

于 洋, 汤心溢, 陈元林

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 基于计算机平台的红外场景仿真系统存在输入输出接口受限, 实时响应能力不足, 可扩展性差的缺点。为此, 文中构建了一套基于嵌入式硬件的实时闭环红外场景仿真系统演示平台。引入并行计算与多级流水线技术, 采用多片嵌入式处理器级联的方式, 解决了单片嵌入式处理器计算能力的不足, 实现了实时计算; 单任务运行环境使得系统实时响应性能良好, 便于实现闭环仿真; 自主设计的针对红外应用的三维红外实时渲染引擎提高了仿真精度。详细介绍了系统方案的实现与优化过程, 并给出了实验结果。运行时间控制在 25 ms/frame 之内, 成像帧频为 40 frame/s, 结果证明系统达到了设计要求。

关键词: 红外场景仿真; 实时闭环; 嵌入式; 渲染引擎

中图分类号: TN216 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)01-0015-05

Simulation technology of real-time close-looped IR scene

Yu Yang, Tang Xinyi, Chen Yuanlin

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Infrared scene simulation systems based on computers are limited in input and output interface, which induces the weakness in real-time response and extendibility. The demonstration platform of real-time close-looped infrared scene simulation system based on embedded hardware was described. The parallel-calculation and multi-pipeline technology of this system were introduced. It combined several chips together to enhance its real-time calculation capability. The single-task environment enabled the simulation system to response real-time, which made the close-looped simulation possible. A self-design real-time rendering engine especially for infrared application was adopted to enhance the simulation precision. The realization and optimization process of this system were described, and the experimental result was given. The running time was controlled within 25 ms/frame with frame frequency of imaging system of 40 frame/s. All the results prove that it can reach design requirement.

Key words: infrared scene simulation; real-time and close-loop; embedded; rendering engine

收稿日期: 2011-05-07; 修订日期: 2011-06-13

基金项目: 预研项目(41101050501)

作者简介: 于洋(1984-), 女, 博士生, 主要从事红外光电系统研究。Email: fishinwater99@hotmail.com

导师简介: 汤心溢(1970-), 男, 研究员, 博士, 研究方向为红外光电系统、红外成像与信号处理技术。Email: tangxini@sina.com

0 引言

现有的红外场景仿真系统^[1-2]大都建立在计算机平台上。随着计算机技术的发展,近年的场景仿真系统利用图形处理单元(GPU)等最新技术,性能得到了不断提升^[3-4]。但基于计算机平台的红外场景仿真系统存在输入输出接口受限,实时响应能力不足,任务易被打断,可扩展性差的缺点,无法满足实时输出结果或实时响应输入信号的要求。

为此,文中构建了一套基于嵌入式硬件的实时闭环红外场景仿真系统演示平台。相比计算机,嵌入式硬件(如 DSP)具有其独特优势。它能够提供更丰富的输出接口,以及确保任务不被打断的运行环境,另外,还具有便携式、可扩展等优点,这些使得嵌入式系统能够代替计算机满足某些特殊场合的应用需求。

但是,单片嵌入式芯片的运算能力远远比不上单台计算机,有必要对嵌入式芯片进行多片级联,充分运用并行计算与多级流水线技术,以提高运算性能。

选用了 ADI 公司的 TS201S 芯片作为嵌入式处理器^[5],将红外场景仿真系统在由多块 TS201S 芯片组成的嵌入式平台上进行了任务拆分,采用自主设计的针对红外应用的三维红外实时渲染引擎^[6],对系统进行了实现与验证。

1 系统方案设计

1.1 系统指标

基于多 DSP 并行处理硬件平台^[7]的实时红外场景仿真系统试图达到的指标如表 1 所示。从便于开发角度考虑,首先在计算机平台上搭建了完整的红外场景仿真软件系统,然后将其从计算机移植到嵌入式硬件上。

表1 系统设计指标

Tab.1 System parameter

Item	Parameter
Simulation format	512×512×14 bit
Simulation speed	>30 frame/s
Respond time	<200 ms
Complexity of IR target model (facet num)	≤12 000
IR target radiation model	Simple graybody radiation model
Other function	Atmospheric attenuation and target-background synthesization

1.2 软件系统组成与原理

红外场景仿真软件系统主要由目标几何模块、目标运动模块、目标红外辐射模块、背景仿真模块、目标背景合成模块、探测器与光学系统模块、大气效应模块、仿真结果输出模块、以及轨迹生成程序、目标模型转换程序等组成,如图 1 所示。

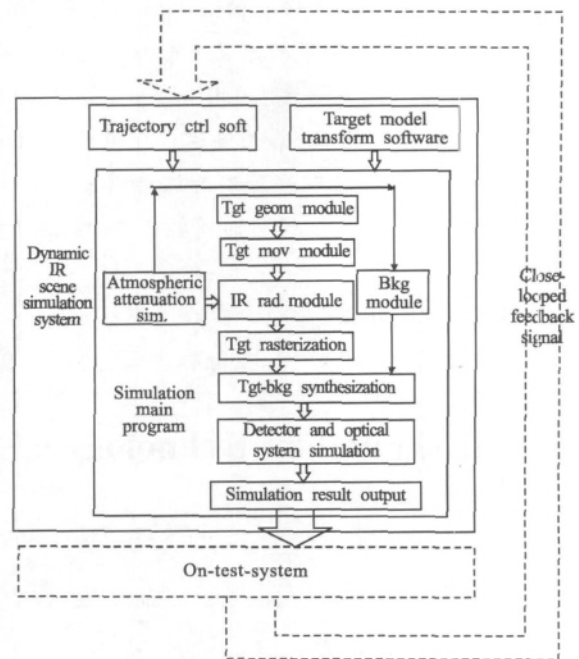


图 1 红外场景仿真软件系统

Fig.1 IR scene simulation software system

系统采用了自主设计的针对红外应用的三维红外实时渲染引擎。该引擎的工作原理如图 2 所示。该引擎针对红外仿真应用编写,代替了现有的针对可见光仿真的商用渲染引擎如 DirectX 或 OpenGL,独立于操作系统,实现了灰度分辨率的可控,提高了仿真精度。

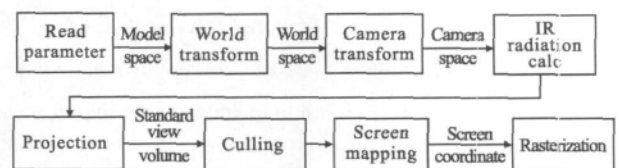


图 2 三维红外实时渲染引擎流程

Fig.2 Working flow of 3D real-time IR rendering engine

1.3 多处理器任务划分依据

将仿真系统向嵌入式硬件移植时,需要合理拆分渲染管线,从而合理分配每片 DSP 的计算任务与级联关系,使得整个系统的工作效率最高。

文中首先以 ADI 公司的 TS101S 芯片为蓝本,进

行了测试。测试模型为 FIG_FA18,由 24462 个三角形面元与 15535 个顶点组成,测试参数为 256×120 元面阵探测器,不含背景。测试结果如表 2 所示。

表 2 TS101 芯片上算法评估测试运行时间

Tab.2 Tested running time of TS101

Item	Time cost/ms
World and camera transform	4.355
IR radiation calc and gray-level mapping	28.340
Projection and culling	1.743 5
Rasterization	55.311

按照一片 TS201S 芯片约相当于 1.7 片 TS101S 芯片的运算能力来换算,若考虑在 TS201 芯片上系统仿真 512×512 大小的图像,则估算时间如表 3 所示。

表 3 TS201 芯片粗略估算运行时间

Tab.3 Estimated running time of TS201

Item	Time cost/ms
World and camera transform	2.561 8
IR radiation calc and gray-level mapping	16.67
Projection and culling	1.025 6
Rasterization	277.639

根据上述估算结果,可以发现,光栅化阶段为三维渲染过程中的瓶颈阶段,需要进行多处理器并行计算。事实上,在一块 TS201S 中独自完成 512×512 大小图像的光栅化是不现实的。因为 DSP 内存等资源受限,无法满足应用需求,而且从负载平衡角度,也需要将运算负载最重的光栅化操作分在多块 DSP 上并行完成,减少瓶颈阶段运算负载。而其他 3 个阶段可以合并到一块处理器中完成。考虑到测试中使用的模型面元约为 24 500 个,而系统指标中目标模型复杂度为不超过 12 000 个,因此有理由认为,若采用面元个数不超过 12 000 个的模型,以及 4 块处理器进行分块光栅化仿真,光栅化耗时约为 34 ms,可满足系统指标中提出的成像帧频 30 frame/s 的要求。

1.4 实现方案

根据红外场景仿真系统的实际工作流程中各阶段运行时间的测试与估算结果,综合了并行理论中的时域并行法与空间域并行法^[8],结合多级流水线技术,提出了系统的设想实现方案,如图 3 所示。

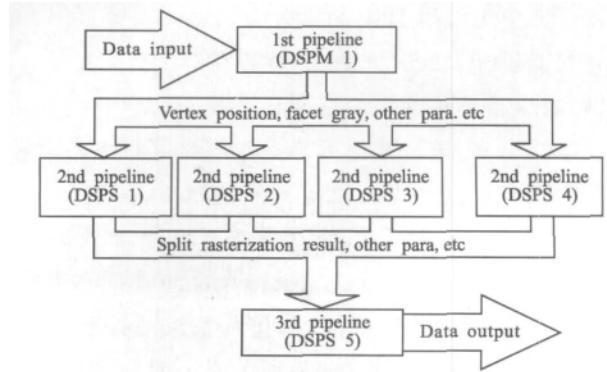


图 3 多 DSP 平台预想方案

Fig.3 Expect scheme of multi-DSP platform

其中第一级流水线进行几何变换、红外辐射计算与投影,第二级流水线进行光栅化操作,由 4 片空间域并行的 DSP 处理器完成,第三级流水线进行结果合并与输出。各级流水线之间形成了时域并行,第二级流水线内部形成了空间域并行。这样的体系结构使得整个系统的渲染速度仅由各级流水线中最慢的那级流水线的运行速度决定。

但是,由于 TS201S 芯片自带的全双工 LVDS 链路口通信端口数目为 4 个,若按照图 3 的方案,DSPM1 直接和 DSPS1~DSPS4 相连,则该系统的第二级流水线无法在将来扩展更多的处理器,实现更高的计算性能。而随着应用需求的不断提高,红外场景仿真系统在将来必定会引入更大的计算量,建立更为精细的红外辐射模型。

因此,考虑到方案在未来的可扩展性,将图 3 所示的方案进行了如下修正,如图 4 所示。

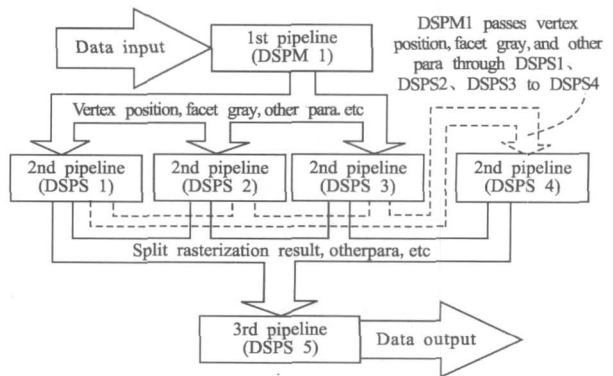


图 4 多 DSP 平台实际实现方案

Fig.4 Final scheme of multi-DSP platform

1.5 多处理器间同步与协作机制

为了提高系统的运行效率,减少不必要的停机

等待,文中为每块 DSP 的接收数据与发送数据引入了乒乓双缓冲。DSP 间的收、发操作以 DMA 方式运行,将数据传输作为一个后台任务执行,从而将处理器核释放出来,进行其他运算操作。利用 DMA 中断信号实现多级流水线的 DSP 片间的同步。

文中将每块 DSP 的仿真计算放在启动数据传输与阻塞等待中断信号这二个操作之间进行,使得在 DSP 片间数据传送的同时,仿真系统的处理器核中正在运行仿真计算算法,从而节省了时间,减少了不必要的等待。

另外,为节省 DSP 片间的通信数据量,需要合理安排 DSP 片间数据通信方式。将 DSP 片间通信的待传数据分为 2 种,即逐帧变化的中间计算结果,与每帧都固定不变的仿真场景参数。仿真初始化时传送一次固定参数,仿真过程中逐帧传送中间计算结果。

2 瓶颈定位与优化

根据前面描述的系统方案,进行了系统的实现与测试,并根据实验结果,结合瓶颈定位与优化理论,对移植到嵌入式硬件的红外场景仿真软件系统进行了优化。

实验参数如下:对飞机蒙皮进行仿真,模型复杂度为 12 680 个面元与 6 977 个顶点,飞机距离探测器约 10 km(小目标),探测器为 512×512 元,添加贴图云背景功能。各级流水线运行时间如表 4 所示。

表 4 各级流水线运行时间

Tab.4 Running time of each pipeline

Item	DSP No.	Simulation time/ms
1st pipeline	DSPM 1	13.6
	DSPS 1	20.5
2nd pipeline	DSPS 2	6.5
	DSPS 3	5.5
	DSPS 4	8.7
3rd pipeline	DSPS 5	135

由表 4 可以明显看出,第三级流水线耗时远大于其他各级流水线,是需要重点优化的瓶颈。第三级流水线主要完成分块光栅化结果的图像拼接,以及目标背景合成功能,显著特点是数学计算量少,但片内 DRAM 与片外 SDRAM 之间数据转移频繁。为此,需要优化片内外数据转移方式。

旧方法采用 *dst++=*src++的方式,经测试,传递 2 Mbit 数据需 14 ms,这远远低于 TS201S 芯片宣称的 3.2 Gbit/s 的通信带宽,可见,这种互拷方式未发挥硬件平台的最佳性能。

于是采用 DMA 方式进行片内外内存间的数据转移,希望获得 DSP 最快通信速度。经测试,采用 DMA 方式后,传递 2 Mbit 数据仅需 0.7 ms。通过这种方式优化后,第三级流水线只需花费 23.3 ms 时间,各级流水线间基本达到了负载平衡。

接着,改变仿真参数,令飞机距离探测器约 1 km(大目标),其他参数不变,进行了新的测试,如表 5 所示。

表 5 各级流水线运行时间

Tab.5 Running time of each pipeline

Item	DSP No.	Simulation time/ ms
1st pipeline	DSPM 1	13.6
	DSPS 1	31.1
2nd pipeline	DSPS 2	14.3
	DSPS 3	6.93
	DSPS 4	15.4
3rd pipeline	DSPS 5	23.3

由表 5 可见,在目标由小目标变为大目标后,新的瓶颈阶段转化为第二级流水线分块光栅化阶段。为此,根据计算机图形学理论,采用降低光栅化图元的数目,即打开背面剔除的方法,不绘制不可见面元,提高光栅化效率。背面剔除的方法是:计算面元法线与光轴夹角,若大于 90°,则面元不可见,加以剔除。测试结果如表 6 所示。

表 6 各级流水线运行时间

Tab.6 Running time of each pipeline

Item	DSP No.	Simulation time/ms	
		Backfaces culling off	Backfaces culling on
1st	DSPM 1	13.6	13.1
	DSPS 1	31.1	17.5
2nd pipeline	DSPS 2	14.3	8.9
	DSPS 3	6.93	5.1
	DSPS 4	15.4	9.32
3rd pipeline	DSPS 5	23.3	23.3

由表 6 可见,打开背面剔除后,光栅化性能提升约 40%。各级流水线间重新达到了负载平衡。

3 实验与结论

上述实验的仿真结果图片如图 5 所示。

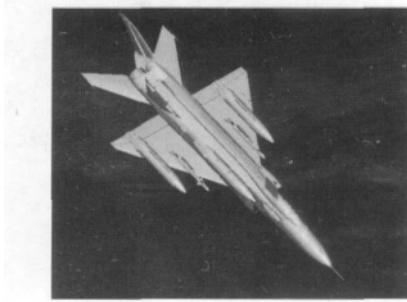


图 5 仿真结果图
Fig.5 Simulation result

在采用了各种优化方法后,系统运行时间控制在 25 ms/frame 之内,成像帧频达到了 40 frame/s,达到并超过了系统 30 frame/s 的设计指标。由于采用了三级流水线,并且每级流水线内均采用乒乓缓存技术,因此系统响应时间为 $3 \times 2 \times 25 = 150$ ms。因此,系统性能达到了仿真速度与响应时间的设计目标。

对实际应用而言,考虑到红外成像系统的光学机械转台的运转需要耗费的时间,此系统 40 frame/s 的吞吐率与 150 ms 的响应时间可以满足通常的实时闭环反馈应用需求。

将来,还可通过提升硬件性能与优化软件算法,在该平台上实现更多功能,比如通过扩展更多的 DSP 芯片,获取更强的计算能力与更大的存储空间,从而实现目标红外辐射精细化建模、背景直接生成、光学效应精细模拟、探测器效应精细模拟等功能,并且获得更快的运算速度与响应时间,进一步提高系统性能。

参考文献:

- [1] Crow Dennis R, Coker Charles F, Garbo Dennis L, et al. A closed-loop real-time infrared scene generator [C]//SPIE, 1998, 3368: 342-351.
- [2] Zhao Xunjie, Li Chengjin. Key-tech in a hardware-in-the-loop IR simulation system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 326-328. (in Chinese)
赵勋杰, 李成金. 红外半实物仿真系统的关键技术[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 326-328.
- [3] Sun Yi, Dai Shuling. Implementation of infrared scene simulation based on programmable GPU[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(7): 1492-1496. (in Chinese)
孙毅, 戴树岭. 基于可编程 GPU 的红外场景仿真实现[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1492-1496.
- [4] Hu Wei, Qin Kaihuai. A new rendering technology of GPU-accelerated radiosity[J]. *Computer Research and Development*, 2005, 42(6): 945-950. (in Chinese)
胡伟, 秦开怀. 一种基于 GPU 硬件加速计算的辐射度实现方法[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(6): 945-950.
- [5] Liu Shuming, Luo Yongjiang. Principle and Application Design of ADST TS20XS series DSP [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)
刘书明, 罗勇江. ADSP TS20XS 系列 DSP 原理与应用设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [6] Yu Yang, Tang Xinyi, Cai Haijiao, et al. 3D simulation of real-time infrared scene based on DSP [C]// IEEE, CSSE, 2008: 915-918.
- [7] Chen Yuanlin, Tang Xinyi, Yu Yang. Design and implementation of portable real-time IR dynamic scene simulator [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(1): 71-74. (in Chinese)
陈元林, 汤心溢, 于洋. 便携式实时红外动态场景仿真器设计与实现[J]. 激光与红外, 2010, 40(1): 71-74.
- [8] Tomas Akenine-Moller, Eric Haines. Real-Time Rendering [M]. Wellesley, MA: AK Peters Ltd, 2002.