

功率监控图形系统中自适应着色处理

周俊明, 胡小龙, 彭建伟

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:提出一种在功率监控计算机图形系统中的自适应着色处理方案。为了对功率和消耗之间进行权衡, 提出三维实时图形渲染功率监控中的两个关键理论: AGR 和 HVP。讨论了功率节省方法以及图像质量评价方法, 提出了在满足质量要求的前提下, 得到最大功率节省的现实控制标准。介绍几种着色处理中的重构算法, 而自适应着色处理是从这些可选算法中得到一种适当的着色算法。通过仿真实验结果表明, 文中设计的自适应着色处理能够极大地节约功耗。

关键词:功率监控; 自适应; 着色处理; 渲染

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2008)04-0245-04

Power - Aware Adaptive Shading for Graphics System

ZHOU Jun-ming, HU Xiao-long, PENG Jian-wei

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: A new design scheme of power - aware adaptive shading in the graphic system is put forward. In order to achieve a tradeoff between the quality and the power consumption, two vital mechanisms for power - awareness in 3D graphics is proposed: AGR and HVP. And gives two power estimation methodologies and image quality measurement to arrive at realistic control criterion that provides maximum power savings. And then explains the various techniques proposed for adaptive shading, and the adaptive shading uses an appropriate shading algorithm from a set of alternatives. The results of simulation show that power - aware adaptive shading can reduce the power consumption greatly.

Key words: power - aware; adaptive; shading; rendering

0 引言

近年来, 三维图形学广泛应用于各个领域, 比如影片制作、三维游戏、虚拟现实模型构造以及图形用户界面(GUI)开发。

在三维图形引擎中, 消耗能源最多的一个阶段就是渲染。图形渲染是将颜色应用到三维图像的每个像素并将其投影到计算机屏幕的过程。在计算机实时三维图形渲染过程中, 需要大量计算和比较频繁的存储访问操作, 这将消耗相当多的能源。对于一些携带能源有限的设备来说, 节约功耗显得尤为重要。这就有必要在这些设备中采用一些节能技术, 而功率监控就是一种有效节约能源的新技术。

1 背景知识

首先简单地介绍计算机图形渲染系统中的一个重要环节: 着色处理(shading)。然后提出在三维图形渲染功率监控中的两个关键理论: AGR 和 HVP。

1.1 光照模型

光照模型^[1]是用来计算由图像中的每一像素射到观察者眼中的光强。如果在场景中放置了 n 个点光源, 那么可以在表面某点上叠加各个光源所产生的光照效果, 其表达式为:

$$I = k_a I_a + \sum_{i=1}^n I_{li} [k_d (N \cdot L_i) + k_s (R_i \cdot V)^s] \quad (1)$$

i 表示第 i 个点光源, k_a 是环境光反射系数, k_d 是漫反射系数, k_s 是镜面反射系数。 N 是物体表面的单位法向量, L_i 是从表面上一点指向第 i 个光源的单位向量, V 是观察方向的单位向量, R_i 是镜面反射方向的单位向量, s 是镜面反射参数。方程 1 的第一部分是环境光反射分量; 第二部分是漫反射分量; 第三部分是镜面反射分量。

着色处理是计算光照并由此决定像素颜色的过程, 主要有 3 种着色方法: Flat 着色、Gouraud 着色和

收稿日期: 2007-07-07

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助(863-511092); 湖南省科学技术与科技计划(2006GK3130)

作者简介: 周俊明(1983-), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 研究方向为 FPGA 和嵌入式系统设计、图形图像处理、组态软件设计等; 胡小龙, 副教授, 博士, 研究方向为嵌入式系统、计算机网络、计算机应用等。

Phong 着色。这 3 种方法分别基于多边形、顶点和像素计算光照效果。

1.2 三维图形渲染逼近

AGR(Approximate 3D Graphics Rendering)方法采用信号处理逼近技术^[2,3](Approximate Signal Processing, ASP)来实现功率监控。ASP 主张在处理结果质量和数据消耗,比如功率消耗之间进行权衡。对于一个随着时间变化的功率水平系统来说,ASP 便于逐渐改善结果质量。因此,一个绝对质量常数直接对应于所供应的功率 E 。

在视频和图形之类的多媒体系统中,人类视觉系统会对所察觉的结果质量确定一个上界,即察觉质量 Q_p (Perceptual quality)。对一个给定的绝对质量 Q_a (absolute quality,由消耗功率 E 得到),质量 Q_p 会随着人类视觉系统察觉的对象而改变。因此, E 与 Q_p 的关系是多对一的,而 E 与 Q_a 是一对一的关系。AGR 对不同的功率要求提供多个质量值,通过 $E-Q_p$ 关系能有效地利用功率。图像信息能很容易地在图形处理的高级环节中获得,这些图像信息用于确定基于 HVP(Human Visual Perception,人类视觉特性)模型的质量 Q_p 的配置。

1.3 人类视觉特性

人类视觉系统(Human Visual System)^[4]能分辨出在光照强度和深度上的细微差别。人类能够分辨的细节数量用空间频率表示,即每空间张角周期数(cycles/degree)与环境有关的刺激强度的数量称为对比(contrast)。物体的空间频率和速度之比称为时空对比敏感度函数(Spatiotemporal Contrast Sensitivity Function, STCSF)。人眼对一个物体的视觉敏感度会随着空间频率和速率以每秒空间张角度而改变。

文中,一个物体的屏幕速度和深度(从观察者看)用于作为适应性着色处理的标准,这些自适应着色处理是基于 STCSF 特性的。

2 方法

这部分讨论了功率节省方法,提出了在满足质量要求的前提下,得到最大功率节省的现实控制标准。

2.1 功率评估方法

功率评估方法有两种:分析法和实验法。

2.1.1 功率评估分析法

通过对 Gouraud 和 Phong 着色处理功率消耗之比来分析评估功率消耗。提出了一个简单的模型来描述自适应着色功率节省的可能性。为了简化模型和减少这两种算法计算的差异,先作如下假设:

a. 所有的功能单元具有相同字长;

b. 只有一个点光源;

c. 在镜面反射部分,用 $N \cdot H$ 代替 $R \cdot V$,因为对每一个像素来说,当 R 变化时, L 和 V 的中间向量 H 对同一对象的所有像素都是不变的;

d. 功能单元加法器、乘法器和除法器都有标准的功率消耗,分别为 1、1.5 和 4。

基于上述假设的 Gouraud 和 Phong 着色的功率简化模型分别由表达式(2)和(3)来描述:

$$P_{\text{gouraud}} = P_{\text{dda}} + P_{\text{diff}} \times 3 \quad (2)$$

$$P_{\text{phong}} = P_{\text{dda}} \times 3 + (P_{\text{diff}} + P_{\text{spec}}) \times p \quad (3)$$

P_{dda} , P_{diff} , P_{spec} 分别表示 DDA 算法、漫反射部分、镜面反射部分的功率消耗; p 为一个三角形中的像素数。

方程 2 中 P_{dda} 是计算给定 3 个顶点的三角形内部像素的功率消耗,尽管一个三角形的 P_{dda} 会随着三角形的位置和形状而改变,但是如果假设这些三角形是等边三角形,那么这些变化就可以忽略了,从而得到:

$$P_{\text{dda}} = (x+1)(P_{\text{div}} + P_{\text{sub}}) + [p - (3x-3)]P_{\text{add}} = 5(x+1) + (p-3x+3) = p+2x+8 \quad (4)$$

其中, x 是一个三角形一边的像素数, p 是三角形内部的像素个数。 x 和 p 之间有如下关系:

$$0.43x^2 + 0.13x - 0.56 = p$$

假设 $P_{\text{sub}} = P_{\text{add}}$ 。不同于 P_{gouraud} 中的 P_{dda} ,方程 3 中的 P_{dda} 是对法向量 N 插值后的功率消耗。因为向量 N 有 3 个分量 x, y, z ,所以 P_{dda} 要乘以 3。

从方程 1 可知,漫反射部分需要一个向量点积以及与漫反射系数的乘积,还需要一个加法加上环境光反射部分得到总体光照。因此

$$P_{\text{diff}} = 3 \times P_{\text{mul}} + 2 \times P_{\text{add}} + 1 \times P_{\text{mul}} + P_{\text{add}} = 4 \times P_{\text{mul}} + 3 \times P_{\text{add}} = 9 \quad (5)$$

根据前面的假设 c 和 d, $P_{\text{spec}} = P_{\text{diff}} - 1 = 8$ 。将这些数据代入方程 2 和 3 中,得到方程(6)。

$$\frac{P_{\text{phong}}}{P_{\text{gouraud}}} = \frac{3(p+2x+8) + (9+8)p}{(p+2x+8) + (9 \times 3)} = \frac{20p+6x+24}{p+2x+35} \quad (6)$$

其中 $p \geq 3$ 。

2.1.2 功率消耗实验评估法

尽管分析法能较快地得到功率节省的初级评估,但它不能准确建立某一特定情形的模型,比如对实现机制的合理结构和输入数据模式对功率消耗的影响。而实验评估方法能够有效地解决这些问题。

图 1 所示为功率消耗实验评估法的流程图。首先用 OpenGL(Open Graphics Library)编程工具建立一个应用程序,然后用 Pixcon 软件生成一个茶壶或战斗机

的动画。OpenGL 是作为程序和计算机硬件之间的接口。通过修改 OpenGL 库来追踪应用程序测试数据以便监控着色处理所输入的数据。OpenGL 编程可用于模拟 Gouraud 着色,但不支持 Phong 着色。而 Pixcon 软件是用来实现 Phong 着色的。

硬件功能模块^[5]是在 RTL(Register Transfer Logic)中使用 Verilog 硬件描述语言实现的。硬件模块功率消耗是通过使用台湾集成电路制造公司(TSMC)的 0.25 μ m ASIC(Application Specific Integrated Circuits)库和基于 FPGA(Field Programmable Gate Array)的单元库(使用工具 Altera QuartusII)来模拟。以上得到的应用程序测试数据用来激发硬件模块,从而获得实际功率值。这种方法也用来推导基于 HVP 的控制标准。一个物体的特性,比如与观察者的距离和运动速度在应用程序中都已经给定,OpenGL 渲染三维图形时,质量高低可以根据需要来自由选择。

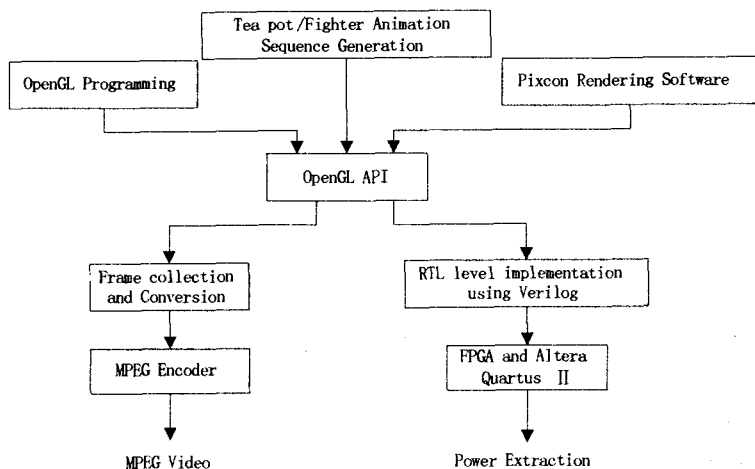


图1 基于自适应计算的 HVP 功率节省实验评估法

2.2 图像质量评价

通常,三维图像质量^[6]是通过人眼观察做出判断的。为了确定选择着色处理的标准,用峰值信噪比 PSNR(Peak Signal to Noise Ratio) 作为图像质量评价指标。对于一幅大小为 $M \times N$ 的图像 $f(x, y)$ 和参考图像 $f_0(x, y)$,则图像 f 的 PSNR 为

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{f_{\max}^2}{\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - f_0(x, y)]^2} \quad (7)$$

其中 $f_{\max}$ 是函数 $f(x, y)$ 的最大灰度值。

3 着色处理中的重构算法

自适应着色处理是从一组可选算法中得到一种适当的着色算法。像后像现象、对远距离或运动物体的相对不敏感等这些人类视觉系统的局限性,会影响人们作出判断,从而选择一个质量低的着色算法。场景

切换、物体与照相机的距离以及运动物体速度等相关信息对自适应着色器来说是必不可少的。以下为几种自适应着色技术。

3.1 帧上分布式计算

在一个分层图形渲染系统中,场景切换是系统难点之一。因为在一个帧时间中,所有图层的每个对象都要渲染,因此场景切换通常决定渲染系统时钟。通过在渲染新对象的几个帧时间,人类视觉系统所产生的后像现象能够减慢系统时钟。使用累积缓存器,能够减轻由渐次渲染(progressive rendering)所产生的明显失真。方程(1)中,整体光照强度需要计算所有光源的漫反射和镜面反射。假如有四个点光源,系统时间必须在一个帧时间里足够快地对漫反射和镜面反射部分迭代4次。通过增加一个累积缓存器在四个帧时间里对漫反射和镜面反射部分进行迭代,系统时钟能够降至初始值的1/4。这就相当于降低了系统时钟速率。

如果每个像素的法向量都缓存在本地内存中,就没必要对每个点光源进行重复计算。用这种方法所节省的功率能达到 P_{mem} 的75%, P_{mem} 是访问存储器和数据保持所消耗的功率。功率节省是随着图像内容变化而变化的。由渐次渲染所引起的失真能够通过图像序列显示来证明。

3.2 运动物体的自适应着色处理

对物体进行着色处理主要是用 Gouraud 着色算法和 Phong 着色算法。如果一个物体离照相机的距离和相对于照相机的速度超过某个临界值时,用低复杂性的 Gouraud 着色处理就可以得到没有明显质量损耗的图像。为了确定临界值,记录一组物体的运动速度和距离的 PSNR 值。

决策规则图描述了在给定的速度和距离所用到的算法,它是基于选定的 PSNR 产生的。虽然所选的 PSNR 可能不是直线,但可以将它近似地看成是一条直线,从而简化了控制器。三维模型有许多属性参数,如光反射、表面复杂度、颜色等。任何一种属性的不同都可能导致模型的不同。所以,对每一个三维模型或一组有着近似特征的模型都可能需要唯一的决策规则。

即使应用运动模糊,也可以清晰地分辨出差异。因为这些图像是在静态模式下观察的,但是,当运用了适应着色处理的图像序列实时播放时,就很难分辨出差异。决策能够通过修改低质量着色使用时间来改变,这样就控制了功率节省。

表1显示了在渲染战斗机和茶壶三维模型快速运

动时功率的可能节省。茶壶模型比战斗机模型更节省功率,因为战斗机模型中每个三角形的像素个数更多。功率节省评估是在 $s = 1$ 时测得的。对战斗机模型和茶壶模型来说, s 分别等于 20 和 40 时,功率节省高于表 1 所显示的。

表 1 五种不同距离的平均功率节省

Distance	Avg. Pixel/Tri	Fighter	Teapot	Avg. Pixel/Tri
1	23.5	7.35	10.36	51.8
2	18.8	6.56	8.52	32.1
3	15.8	5.99	7.10	21.9
4	11.2	4.94	5.06	11.7
5	6.7	3.66	3.23	5.4
Avg.		5.7	6.85	
Power saving%		82.5%	85.4%	

3.3 自适应镜面反射部分计算

在方程(1)中,镜面反射部分的评估涉及代价很大的指数计算。指数计算可以通过其它方法来实现。但是,将指数计算的实现方法作为计算代价的一个参考,那么它的计算代价至少是以 s 的对数级增长。

一种计算镜面反射部分的方法叫做快速 Phong 着色法(Fast Phong Shading),如方程(8)所示。这个方程包含一个乘法、一个加法、一个减法、一个除法,所以对镜面反射参数 s 的所有取值来说,这个方程的效率都不高。当参数 s 取值比较小时,使用迭代乘法消耗更少的功率。

$$\text{Specular_term} = k_s \frac{ns}{(N \cdot H) - (N \cdot H)ns + ns} \quad (8)$$

如果 $s = 256$ 时指数计算需要 8 个乘法,那么消耗的功率为 $8 \times 1.5 = 12$ 。而用快速 Phong 着色法消耗功率为 $1 + 1 + 1.5 + 4 = 7.5$,从而节省了 37.5% 的功率。当 $s = 64$ 时,快速 Phong 着色法较之于 Phong 着色节省了 16.7% 功率。

自适应镜面反射部分计算用同一个标准和参数 s 作出决策规则。不同于自适应处理,快速 Phong 着色

能够用于所有的运动物体,不管其速度和深度如何。因为快速 Phong 着色法的 PSNR 值比自适应着色的 PSNR 高得多。

4 总结与展望

文中陈述了一个新颖的用于三维图形着色处理的功率监控图形渲染系统。该系统是基于 AGR 理论,有 HVP 特性的图像信息,用于选择一个最低的察觉质量,从而节省功率消耗。

HVP 理论将更加广泛地用于三维图形系统中其它部分的功率监控。还可以使用其它可重构技术,比如硬连线乘法器、分布计算等来节省功率。

参考文献:

- [1] Hearn D. Computer graphics C version[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
- [2] Nawab S, Oppenheim A, Chandrakasan A, et al. Approximate Signal Processing[J]. VLSI Signal Processing, 1997, 15 (1-2):177-200.
- [3] Sinha A, Wang A, Chandrakasan A. Algorithmic Transforms for Efficient Energy Scalable Computation[C] // in International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED). Rapallo, Italy, 2000. New York, NY: ACM Press, 2000:31-36.
- [4] Bertran M, Delaigle E J F, Macq B. Some improvements to HVS models for fingerprinting in perceptual decompressors[C] // Proc. of 2001 International Conference on Image Processing, Thessaloniki, Greece: [s. n.], 2001:1039-1042.
- [5] Euh J, Chittamuru J, Burleson W. A Low-Power Content-Adaptive Texture Mapping Architecture for Real-Time 3D Graphics[M]. [s. l.]: Springer verlag, 2002.
- [6] Chin F Z C, Xydeas C S. Dual-mode image quality assessment metric[C] // IEEE Region 8 International Symposium on Video Image Processing and Multimedia Communications. Zadar, Croatia: [s. n.], 2002:137-140.

(上接第 244 页)

虚拟环境,对提高矿山安全生产有重要的实用价值。

参考文献:

- [1] 吴立新. 史文中, Gold C. 3D GIS 与 3D GMS 中的空间构模技术[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(1): 5-11.
- [2] 毛善君. 煤矿地理信息系统数据模型的研究[J]. 测绘学报, 1998(4): 331-337.
- [3] 程朋根, 龚健雅. 地勘工程 3 维空间数据模型及其数据结构设计[J]. 测绘学报, 2001(1): 74-81.
- [4] 陈学习, 王彦斌. 面向煤矿应用的三维 GIS 空间数据模型研究[J]. 华北科技学院学报, 2003, 5(3): 12-16.
- [5] 和栋材, 赵健, 张锦. 基于 3ds max 的一种三维 GIS 实现技术[J]. 山西建筑, 2004, 30(22): 222-223.
- [6] 刘亚静, 毛善君, 郭达志, 等. 基于 VC++ 和 OpenGL 的矿体三维可视化系统研发[J/OL]. 2006. <http://www.esri.com/news/arcuser>.
- [7] 黄蔚, 冯学智, 林广发, 等. 基于组件的 GIS 系统研究与开发——以株洲市房产综合管理信息系统为例[J]. 遥感信息, 2002(1): 23-26.
- [8] ESRI. Exploring ArcObjects[EB/OL]. 2000-02. www.esri.com/news/arcuser.
- [9] 僧德文, 李仲学. 地矿工程三维可视化仿真技术及其集成实现[D]. 北京: 北京科技大学, 2005: 51-54.