CCD 摄像机图像处理仿真

刘雨丹 张 炯 戴树岭

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对 CCD(Charge Coupled Device)摄像机的图像处理过程,提出一种基于可编程 GPU(Graphic Processing Unit)的摄像机仿真方法,利用 GPU 的流处理模式和并行计算能力,对图像的每个像素进行 Gamma 校正、亮度调节、对比度调节、色温偏差调节,以及色彩饱和处理. 分析了 Gamma 校正的原理以及在其他调节之前进行 Gamma 校正的必要性. 讨论了图像亮度与像素颜色的关系,提出针对当前时刻的拍摄图像提取亮度信号的方法,规定了亮度等级的划分,并将亮度等级作为图像处理的依据. 提出了在低照度情况下模拟动态噪点的方法. 结果表明:该方法可以模拟真实 CCD 摄像机在复杂光照环境下的拍摄效果,并保证实时仿真的高速与高效性.

关 键 词: 电荷耦合器件摄像机; 可编程图形处理器; Gamma 校正; 亮度

中图分类号: TP 391.9

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)12-1455-04

CCD vidicon image processing simulation

Liu Yudan Zhang Jiong Dai Shuling

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A simulation method based on programmable graphic processing unit (GPU) was proposed to simulate charge coupled device (CCD) vidicon image processing. The flow-operating mode and parallel computation ability of GPU were utilized to process each pixel, including Gamma correction, brightness and contrast adjustment, color-temperature adjustment, and color-saturation processing. The principle of Gamma correction and the necessity to implement it before other operations were analyzed. The relation between luminance and pixel color was discussed. A method to compute luma signal of current image was proposed. The luma scale was defined and image processing was based on it. A method to simulate the dynamic noise in low luminance condition was introduced. The results show that this method can simulate the imaging effect of real CCD vidicon in complex illumination environment with high speed and efficiency which are required in real-time simulation.

Key words: charge coupled device vidicon; programmable graphic processing unit; Gamma correction; luma

摄像机仿真技术融合了摄像机模型、几何光学、计算机图形学、视景仿真、图形硬件等多领域的前沿知识,具有很高的应用价值. 以往的摄像机仿真主要侧重于透镜系统的成像模型及其产生的景深效应,主要方法是在理想的线性模型上加入景深和畸变[1]. ①该方法忽略了摄像机光电转换系统对于成像效果的影响,使仿真过程无法模拟复杂光照环境下 CCD(Charge Coupled Device)摄像机对图像亮度和对比度的调节以及对颜色的校正,从而制约了摄像机仿真效果的真实性. ②传统方法利用 CPU(Central Processing Unit)读取颜色缓存,经过光栅化和片元操作后写入 GPU(Graphic Processing Unit)帧缓存,二者之间的交互读写要通过总线完成,从而导致低速和低效问

收稿日期: 2008-11-25

作者简介: 刘雨丹(1985—),女,北京人,硕士生,ssbaby0517@hotmail.com.

题.

本文提出基于可编程 GPU 的仿真方法,将光电转换系统对图像颜色的调试和校正算法直接在图形硬件中实现,利用 GPU 的流处理模式和并行运算能力保证仿真过程的高速性和高效性.

1 仿真模型

CCD 摄像机首先通过透镜系统成像,假设成像模型是理想的针孔模型,则该环节为线性传递函数. CCD 像面负责将光信号转换为电信号,该环节也为线性传递函数. 扫描电路将采集到的电信号传递给 Gamma 校正电路和其他电路处理部分. Gamma 校正环节为非线性传递函数,一般使用对数方式逼近. 其他电路处理部分对图像亮度和对比度的调节均可通过调整像素的红绿蓝颜色信号(R,G,B)的方法逼近. 最终颜色信号值将传递给图像缓冲单元,并输出到显示设备. 显示设备会通过内部的校正获得线性输出信号. 本文仅对上述过程中的光电转换系统的功能进行仿真,仿真模型如图 1 所示.

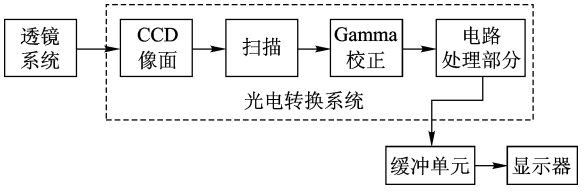


图 1 CCD 摄像机模型

2 基于 GPU 的仿真方法

2.1 方案设计

仿真程序结构如图 2 所示,CPU 和 GPU 任务划分为两部分,除确定亮度等级等查表工作和噪点纹理由主程序完成,其余工作均由 GPU 完成. GPU 的流处理模式保证在渲染过程中对每一个输入像素的颜色分量进行处理,相应算法用计算机图形编程 Cg 语言实现.

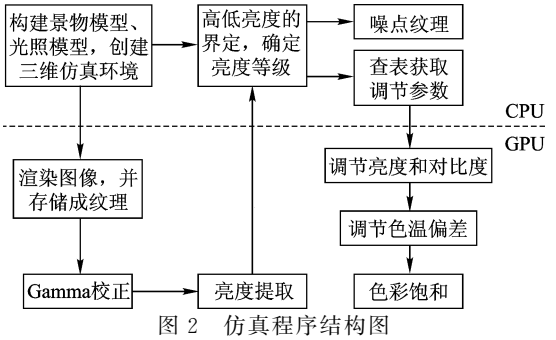


图 2 仿真程序结构图

光电转换系统在处理画面时的主要依据是拍摄照度的高低. 内部的测光单元会对 CCD 成像面上整体图像的亮度进行测量,并与预先设定的基准值比较. 比较结果带动光圈驱动电路,照度高时降低进光量,照度低时补给进光量,从而达到拍摄照度的均衡. 仿真过程中,对拍摄照度的衡量转化成为对图像亮度的衡量,图像亮度决定了图像处理过程中关键参数的选取.

2.2 Gamma 校正

人类视觉对于亮度变化的感知是以非线性方式分布的[2]. 在高照度的环境下人眼可以辨别的颜色层次减少,相反在低照度下可以辨别的暗部层次增多. 数字视频系统通常用对数方式逼近人眼的这一视觉特性. 普通的物理成像设备本身是非线性的,Gamma 系数近似为 2.5;Gamma 校正电路则先将输入的非线性信号校正为线性,再设定 Gamma 系数为 0.45,从而逼近人类的视觉特性[2].

由工作流程可知,在仿真过程中,只作最后的对数逼近,得到每个像素的非线性红绿蓝颜色信号(R',G',B'). Gamma 系数为 0.45 的校正公式[3]为

$$\left.\begin{aligned} R' &= 255\left(\frac{R}{256}\right)^{0.45} \\ G' &= 255\left(\frac{G}{256}\right)^{0.45} \\ B' &= 255\left(\frac{B}{256}\right)^{0.45} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

2.3 亮度提取

1) 亮度信号. 传统色彩学中,像素的亮度信号是基于线性的(R,G,B)信号转换而来,但是这种做法并不完全正确. 根据色彩学原理,线性亮度信号(luminance)由 Y 表示,通过抽取线性(R,G,B)信号的成分而得[4]. 当线性亮度信号被应用在视频系统中,该系统将按照恒定亮度的原理工作,但这并不适应真实视频系统对亮度的要求.

NTSC(National Television Standards Committee)标准指出,用非线性亮度信号衡量视频系统的图像亮度更为合理. 非线性亮度信号(luma)由 Y'表示,通过抽取非线性(R',G',B')信号的成分而得[4]

$$Y' = 0.299R' + 0.587G' + 0.114B' \tag{2}$$

其中,非线性(R',G',B')信号是通过 Gamma 校正得到的. 由此可见,Y'的引入对于视频图像颜色处理的意义深远,它从根本上改变了颜色处理的操作顺序. 传统的操作顺序是先提取亮度信号,再进行 Gamma 校正等一系列颜色处理;而在引入 Y'以后,Gamma 校正将独立于其他处理过程,在

亮度信号提取之前进行,而非之后[4].

2) 平均亮度.将所有像素的亮度信号进行统计平均,得到图像的平均亮度 $\overline{Y}$ 为

$$\overline{Y}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}Y'_i \tag{3}$$

3) 亮度提取方法.每执行一次 Cg 片段程序,可得到一个像素的 Y' 值,难点在于迭加和求平均,因为 GPU 对所有像素的处理是一个并行过程,而迭加却是一个顺序过程,所以在 GPU 中进行顺序的迭加操作并设置一个静态变量保存每次迭加的结果,这种做法并不合理.

为解决该问题,本文采用多次渲染的方法,在每次渲染时根据像素的偏移位置,求取相邻若干像素颜色的平均值,并将该值作为下一次渲染的单个像素.这样,每次渲染都相当于将初始图片浓缩成更小的图片,以达到求平均的目的.最后一次得到的像素颜色代入式(2)求 Y',即为整个图像的 $\overline{Y}$ 值.图 3 为算法示意图,以 2×2 模板为例.

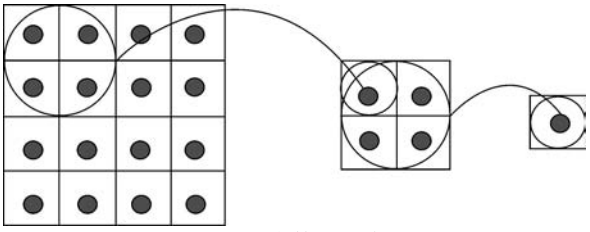


图 3　渲染算法示意图

基于以上算法,将初始纹理设置为 1 024×1 024.主程序负责循环渲染到纹理,每次更新循环次数和像素位置偏移向量,并传递给 Cg 程序;Cg 程序则按照 4×4 模板压缩纹理,这样经过 4 次循环以后,可得到 1 个 4×4 的纹理.对这个纹理求取颜色分量的平均值,相当于将纹理再压缩为单个像素,可求取该像素的亮度值作为整个图像的 $\overline{Y}$ 值.

2.4　高低亮度的界定

主程序按照(R',G',B')取值为(0,0,0)～(255,255,255),对应 $\overline{Y}$ 取值为 0～255,将亮度划分为 5 个等级,如表 1 所示.

表 1　亮度等级划分

亮度等级	$\overline{Y}$ 值	处理任务
1(亮)	200～255	亮度调节,对比度调节,色温调节
2(较亮)	170～200	亮度调节,对比度调节
3(适中)	85～170	对比度调节
4(较暗)	35～85	亮度调节
5(暗)	0～35	亮度调节,对比度调节,色温调节,噪点

2.5　噪点处理

噪点是指拍摄图像中的粗糙部分,属于光电转换中的电子干扰.这种现象主要是由于长时间曝光而产生,多数发生在拍摄夜景,即低照度条件下,画面中会出现一些孤立的亮点.因此,需要在低亮度(等级为 5)时,加入噪点纹理,如图 4 所示.



图 4　噪点纹理图

粘贴噪点纹理时,将纹理坐标顶点与随机扰动值相加,以产生动态噪点的效果.另外,在不同低照度情况下,噪点强度不相同.照度越低,噪点越明显.因此在主程序中采用 OpenGL 的混合操作:当 $\overline{Y}$ 为(0,20)时,设定源因子为 GL_ONE,目标因子为 GL_ONE_MINUS_SRC_COLOR;当 $\overline{Y}$ 为(20,35)时,将源因子改为 GL_SRC_COLOR,达到增加噪点纹理透明度的效果.

2.6　亮度和对比度

根据整体图像的亮度等级调节亮度和对比度,将重新回到单个像素的层面上进行.调节过程遵循以下原则:亮度等级高的画面则整体降低亮度,亮度等级低的画面则整体提高亮度;对比度应随亮度提高而增强.调节亮度和对比度的公式如下:

$$\left.\begin{aligned}R&=(R-128)c+128+b\\G&=(G-128)c+128+b\\B&=(B-128)c+128+b\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

其中,c 为对比度调节系数;b 为亮度调节系数;颜色分量为 Gamma 校正所得的颜色信号.

不同亮度等级下 c 和 b 的选取采用查表法,表 2 为通过多次实验选取的最佳参数.

表 2　不同亮度等级下 b,c 的选取

亮度等级	b	c
1	−45	1.20
2	−15	1.15
3	0	1.05
4	15	1.00
5	45	0.90

2.7　色温偏差

真实摄像机中的白平衡电路虽然起到了白平衡的作用,但并不能做到完全消除色温偏差.高照度拍摄下,色温偏高,色度信号中的红色差较高;低照度拍摄下,色温偏低,色度信号中的蓝色差较高.仿照调节图像亮度的方法,在调节色温偏差时

也回到每个像素的层面上进行，通过将 R 和 G 分量分别乘以偏差系数 k_r 和 k_b 完成色温偏差的仿真[5]，公式如下：

$$\left.\begin{aligned} R &= k_r R \\ B &= k_b B \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

不同亮度等级下 k_r 和 k_b 的选取采用查表法，表3为通过多次实验选取的最佳参数.

表3 不同亮度等级下 k_r，k_b 的选取

亮度等级	k_r	k_b
1	1.05	1.00
2	1.00	1.00
3	1.00	1.00
4	1.00	1.05
5	0.95	1.20

2.8 色彩饱和处理

为保证颜色信号在经过 Gamma 校正、亮度和对比度调节，以及色温偏差调节之后，仍然落在颜色范围[0,255]之内，采用色彩饱和法，其算法为：检查颜色分量值，当超出上下限时，则设为相应的极限值，公式如下：

$$\left.\begin{aligned} R &= \min(\max(R,0),255) \\ G &= \min(\max(G,0),255) \\ B &= \min(\max(B,0),255) \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

3 仿真结果

以太空环境作为三维视景，仿真截图如图5～图7所示.

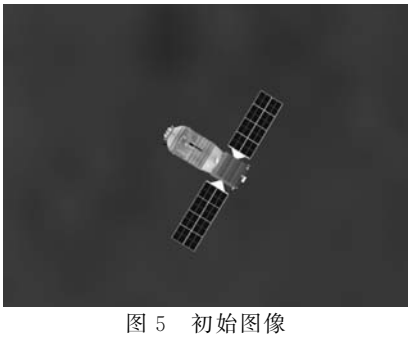


图5 初始图像

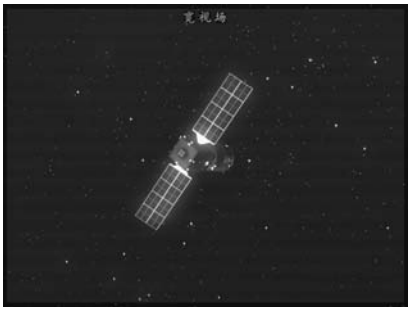


图6 低照度仿真截图

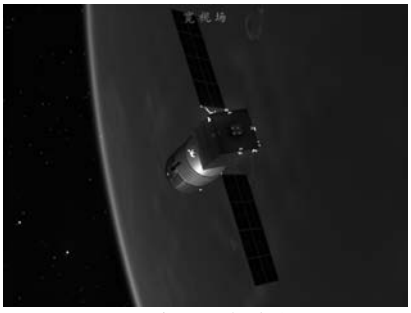


图7 高照度仿真截图

由图6所示，当摄像机对准星空环境逆光拍摄时，为低照度情况，由于 Gamma 校正和亮度调节，使得星空的暗部表现被提升，但是对比度下降，有明显的光晕和噪点现象. 由图7所示，当摄像机顺光拍摄时，为高照度情况，对比度增强，图像清晰，没有噪点. 可以看出，由于模拟了 CCD 摄像机光电转换系统的作用，高低照度环境下的图像亮度反差不大，同一张图像的亮部和暗部反差也不大，从而达到图像亮度的平均. 仿真速率可达到40帧/s. 而使用传统的 CPU 仿真方法则仿真速率不足10帧/s.

4 结 论

本文提出了一种基于可编程 GPU 的摄像机仿真方法，模拟 CCD 摄像机的光电转换系统对拍摄图像的处理过程，将图像校正和调节的算法直接在图形硬件中实现，从而解决了传统图形仿真中存在的低速和低效问题，满足实时仿真的需求，可直接应用在相关虚拟环境中.

参考文献（References）

[1] Kolb C, Mitchell D, Harahan P. A realistic camera model for computer graphics[C] //Proceedings of Acm Siggraph. Los Angeles: Siggraph Acm, 1995: 317－324

[2] Poynton C. Frequently asked questions about Gamma[EB/OL]. New York: Wiley, 1996[1998-01-04]. http://www.poynton.com/PDFs/TIDV/GammaFAQ.pdf

[3] Keith J. A handbook for the digital engineer[R]. SPRA361, 1996

[4] Poynton C. Digital video and HDTV algorithms and interfaces[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2003

[5] 胡波，林青，陈光梦，等. 基于先验知识的自动白平衡[J]. 电路与系统学报，2001，6(2)：25－28
Hu Bo, Lin Qing, Chen Guangmeng, et al. Automatic white balance based on prior information[J]. Journal of Circuits and Systems, 2001, 6(2): 25－28(in Chinese)

（编 辑：刘登敏）