

基于人眼视觉感知的场景明暗适应动态过程模拟*

王章野¹⁺, 张繁¹, 王作省¹, 邹少芳², 廖继渊¹, 崔晓燕¹, 彭群生¹

¹(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

²(浙江大学 科技学院 艺术设计学院, 浙江 杭州 310023)

Human-Eye Visual Perception Based Simulation of Dynamic Process of Light and Dark Adaptation

WANG Zhang-Ye¹⁺, ZHANG Fan¹, WANG Zuo-Sheng¹, ZOU Shao-Fang², LIAO Ji-Yuan¹,
CUI Xiao-Yan¹, PENG Qun-Sheng¹

¹(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

²(Arts and Design Institute, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

+ Corresponding author: E-mail: zywang@cad.zju.edu.cn

Wang ZY, Zhang F, Wang ZS, Zou SF, Liao JY, Cui XY, Peng QS. Human-Eye visual perception based simulation of dynamic process of light and dark adaptation. *Journal of Software*, 2010,21(Suppl.):111–122. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/10012.htm>

Abstract: Currently main display algorithms in realistic image synthesis of Computer Graphics and Virtual Reality couldn't show the scene perception change of human eyes when the environment luminance varies dramatically. To improve the default, this paper proposes and realizes a new enhanced display algorithm based on human eye photoreceptor cell response mechanism to simulate light and dark adaption processes. First, our algorithm bases the different physiological response mechanisms of cone and rod cells of human eyes to establish the interaction model between the photoreceptor cell and its neighboring cell hiring bilateral filtering algorithm. Second, we build the dynamic model of luminance of objects in the scene under various environmental luminance changing with time. Then, by combining the tone mapping model of high dynamic range image, the empirical model of experimental physiology, adjusting the physiological parameters under various environmental luminance, the inverse response transform and chromatic adaptation transform, we finally realistically simulate the dynamic visual perception process of human eye during light and dark adaptation in 3D scene.

Key words: enhanced display; human-eye visual perception; light and dark adaptation simulation; luminance response; high dynamic range image

摘要: 针对现有计算机真实感图形学及虚拟现实主流显示算法不能表现当环境光强骤变时人眼对场景感知变化的缺陷,提出并实现了一个基于人眼感光细胞亮度响应机制的明暗适应过程模拟的增强显示新算法.该算法首先针对人眼中视锥细胞和视杆细胞不同的生理反映机制,利用了双边滤波方法建立起感光细胞接受光

* Supported by the National Basic Research Program of China under Grant No.2009CB320802 (国家重点基础研究发展计划(973)); the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60833007, 60970075 (国家自然科学基金); the Outstanding Young Team Program of Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China under Grant No.R407042 (浙江省自然科学基金杰出青年团队项目)

Received 2010-05-15; Accepted 2010-08-16

刺激后同周边细胞之间的作用关系模型,然后在不同亮度环境下建立起亮度随时间响应的变化模型.结合图像高动态范围图像的色调映射处理模型及实验心理学中的经验模型,并经实验调整不同环境亮度下的生理适应值,通过逆响应变换及颜色适应变换,最终在三维场景中较为逼真地模拟出人眼在明暗适应过程中的对场景的动态感知变化.

关键词: 增强显示;人眼视觉感知;明暗适应过程模拟;亮度响应;高动态范围图像

目前,基于计算机真实感图形原理和算法^[1]的虚拟现实(VR)技术^[2]在军事仿真训练、大型复杂装备设计、影视特技合成制作、数字游戏娱乐、文物保护和展示、科普教育、城市规划等领域都有着广泛的应用.然而现有的计算机真实感图形算法及 VR 系统的显示技术中,普遍存在着与人眼实际感知不相符合的不少缺陷.这些缺陷正妨碍着 VR 技术向更广、更深的领域进行推广.

在目前 VR 显示系统中,当用户在虚拟环境中漫游观察时,其体验与人眼在真实环境观察时所获得的感知仍然存在着很大的差异,主要体现在如下几个方面:

(1) 人眼与现有显示设备的表现能力的差别.人眼被认为是一个较为完善的成像系统,它对环境亮度具有很强的动态调节适应的能力.而目前显示算法和设备却不能自动调节匹配场景数据,经计算机绘制系统模拟计算后,场景里各种不同物体的高动态范围亮度,往往远超出显示设备(比如投影仪及幕布、显示器等)所能显示的能力.这样,目前 VR 显示算法和设备就不能表现当环境光强度大幅度骤变时人眼的感知变化(如:人眼的明适应和暗适应现象等).

(2) 现有 VR 显示算法对各部分场景区域以一致的精度进行计算绘制显示,并没有考虑人眼视觉系统中视野中心与边缘区域采样分辨率的区别.这样,就不能模拟人眼中“视而不见”现象、单眼的盲区视觉效应以及聚焦和凝视的动态变化功能.

(3) 当前的 VR 显示技术并没有充分考虑人眼感知的生理及生理的功能.许多研究表明:用户在长时间佩戴头盔显示器进行虚拟场景观察时,经常会出现头晕和恶心等不适的生理症状,严重时还会导致呕吐甚至休克.即使是在 3D 大片《阿凡达》(Avatar)热播的今天,仍有报道^[3]称台湾省新竹县一郭姓男子在观赏 3D 电影《阿凡达》时突感不适,其间频频摘下立体眼镜休息,在电影快要结束前严重晕眩,最终导致死亡!这一震撼性悲剧充分暴露了现有 3D 显示技术所存在的缺陷.

(4) 目前的 VR 系统容易丢失对小尺度但往往是重要信息的显示.例如,在高速驾驶仿真中,现有的 VR 系统往往不能清晰地显示对驾驶者至关重要的标牌信息.而在现实环境的正常条件下,人眼的高分辨率是决不会遗失对这些信息捕捉的!

(5) 当前的 VR 虚拟显示环境,难以使操作者对虚拟场景中的物体获得尺度度量信息及场景深度估算,这就导致了虚拟场景沉浸感的不足,使得虚拟的仿真环境仍难以完全代替真实环境,仍存在着仿真可信度评判的问题.

上述缺陷的改进,涉及多学科知识的综合,需要众多的研究者及工程技术人员多年的协同合作,才能得到明显改善,因此尚有较长的路要走.本文将着重针对上述缺陷中的第 1 点进行改进研究.我们综合了心理学、生理学及图像高动态范围图像处理技术等多学科的知识,提出了一种基于人眼视觉感知的增强显示新算法来改进模拟人眼在光强度骤变的明、暗适应过程中的动态感知效果.

本文第 1 节介绍相关工作.第 2 节介绍人眼的视觉感知理论.第 3 节讨论基于人眼感知特性的明暗适应过程模拟算法.第 4 节展示本算法的实现及其过程绘制结果.最后是本文工作的总结与讨论.

1 相关工作

众所周知,在环境光强度骤变的情况下,由于生理机制的作用,人眼并不能马上感知并适应环境的亮度变化,而是有一个时间延迟及亮度响应的过程.当我们从明亮的环境走进(或变成)黑暗处,一时眼睛就会什么也看不见,需经过一会才会慢慢地适应,逐渐看清暗处的东西,这个过程就称之为暗适应(dark adaption).其明显的例

子为电影开影后人走进影院时的适应体验.与此相反的是,当我们从黑暗的环境走进(或变成)明亮处,最初感到眼前一片眩光,不能看清物体,但是稍待片刻后就能恢复视觉,这个过程就称之为明适应(light adaption)^[4].但是对于这类现象,现有的计算机真实感图形及虚拟现实场景绘制时所采用的光照明显示模型,如:基于几何光学的 Phong 模型^[5]、Blinn 模型^[6]和 Whitted 模型^[7]、基于波动光学的模型^[8,9]及基于量子光学的模型^[10]等,都不能准确地加以描述.这些光照明显示模型都没有考虑人眼对环境亮度的时间响应延迟机制,因而无法模拟人眼的场景感知变化过程.

从图像处理的角度讲,场景图像的明暗适应变化可用色调映射的算法来处理,即处理高动态范围图像(high dynamic range image,简称 HDR).现有的色调映射算法,根据其作用方式的不同,可以分为全局算子和局部算子两类.其中全局算子是空域不变的算法,它对整幅图像采取统一的映射曲线变换,简单有效,但有时不能很好保持局部的细节;而局部算子则刚好相反,通过空域变化操作能保持局部对比度,但有时可能会导致在较高梯度域上出现失真现象.常用方法有高斯滤波等.

全局算子类方法中,1996年, Ferwerda^[11]等人根据不同亮度下人具有不同的最小可视差(just notice difference,简称 JND),建立了基于 TVI(threshold vs. intensity,即:阈值-强度)函数的全局映射方法.该方法基于场景中的观察者接收到的亮度,通过分别计算当前适应状态下观察者和显示设备相应的可见亮度阈值,从而计算出变换缩放因子,将随时间变化的缩放因子乘以观察者接收到的亮度,从而模拟出显示设备亮度随时间变化的适应过程.2000年, Durand^[12]等人通过改变前面 Ferwerda 模型中缩放因子的取值方式,使之能随着时间进行指数形式的变化.该模型可模拟了眩光的过程,但无法模拟亮度突变的效果,因此只能适于小范围亮度变化的情形.同年, Pattanaik^[13]等人提出了一种时变色调映射算法来模拟随时间变化的视觉适应过程.该算法增加了视觉适应模型及视觉外观模型,从而可模拟视网膜响应、亮度和颜色的变化.但其计算模型中采用了较多的经验值,且计算较为复杂.2005年, Irawan^[14]等人在时变算法基础上结合静态直方图均衡算法,提出了一种动态表现高动态场景可见性的算法,模拟视障病人的弱视(Low Vision)效果.该方法对高动态图像进行处理后,可保留图像的可见度信息,同时又能不断调整当前人眼的适应状态.但其迭代计算速度较慢,计算效率较低.其另一不足之处在于它只依赖于用对比度阈值作为调整的基础,不能保证准确地表达场景的特征.同年 Reinhard^[15]等提出一种由生理感光器激发的高动态范围衰减模型,该模型考虑了人类视觉系统的调整特色,易于进行自适应色调复制,用户可通过直观地输入参数来控制强度、对比度及颜色适应等,可将数字高动态图像映射到低动态的显示设备如:计算机显示器及打印机上.但该模型适用于场景全局处理,而对局部的细节感知增强方面的显示仍有所不足.

局部算子类方法中, Ledda^[16]等人提出了一种视网膜响应计算过程.采用了双边滤波算法来避免边界出现的失真,并以此为每个像素根据与周边像素的关系计算适应状态,再分别计算响应信号.在此基础上,通过插值适应状态来模拟亮度的适应过程.但该算法仅考虑了场景中的局部特性,而没用统一的方法来处理显示设备的计算适应.并且该方法中适应状态取值方法是基于经验模型的,而非基于生理神经处理机制,且在处理过程未考虑人眼颜色适应的过程,因此其模型还不完善.

综上所述,以往的研究工作未能充分考虑人眼视细胞随时间响应变化的生理特性,因而难以准确模拟人眼的感知过程的连续变化.要真实感地模拟人眼对明暗适应过程的感知变化,就必须建立起基于生理学和心理学机制的人眼视觉感知变化动态模型.下面我们将首先介绍人眼的视觉感知理论.

2 人眼的视觉感知理论

由现代生理学、心理学知识^[4,17]可知,人眼是由水晶体、虹膜和视网膜等组成的.视网膜是人感光的主要组织.场景物体通过瞳孔的光线会经由晶状体聚焦投射到视网膜上产生光学成像,再经由视神经传导到大脑皮层处理,在大脑中形成最终的图像.正常视力情况下,眼睛可以聚焦物体发出的光线并能在视网膜的中央凹上成像.中央凹处是视网膜的中心和最敏感之处,能产生精确的视觉.

视网膜上的感光机制来源于两种不同的感光细胞——视锥(cone)细胞和视杆(rod)细胞.其中视锥细胞对光

的敏感性较低,感觉阈值高,它们对物体的颜色、表面细节及轮廓边界具有很强的空间分辨能力,但只能在白昼光的明亮环境下感受光刺激的作用引起视觉,这称之为明视觉(photopic).但在低光环境下易丧失感知,对环境亮度的响应速度较快(<1 分钟);而视杆细胞对光的敏感性高,感受阈限低,能在夜晚或是微弱亮度环境下受光刺激作用引起视觉,称之为暗视觉(scotopic).但视杆细胞只能区别明暗,无颜色感觉,对物体表面细节结构及轮廓边界的分辨能力很低,对环境亮度的响应速度较慢(约 20 分钟~30 分钟).这两种视细胞的分布位置及密度并不相同.视锥细胞的数量约为 600 万个,主要分布在中心凹及其附近区域;而视杆细胞的数量达约 1.2 亿个之巨,主要分布在视网膜的周边部分.除了上述两种视觉外,还存在称为中间视觉(mesopic)的过渡视觉状态.在这个阶段,视锥和视杆细胞同时处于活动状态,它们之间的相互作用将影响人对颜色和亮度的感觉.

人类视觉系统的卓越功能使得我们能够分辨世界万物,感知它们的大小、颜色、形状、动静、明暗、远近.从阳光下的 105 勒克斯(lux)到星光下的 10⁻⁴ 勒克斯(lux),其照度相差约 10 个数量级左右的情况下,人类视觉系统还能在如此大亮度范围内实施其功能,此充分揭示了人眼具有惊人的调控适应能力.但这并不意味着人眼在什么时候看到的都是一样的.在微暗环境(亮度范围一般在 10⁻¹~10⁻⁶cd/m²(或称尼特,nit)之间),主要是视杆细胞在起感光作用,此时人眼对光线变得敏感,但视敏度降低、分辨色彩能力也变弱.与此相对的是,在昼光(范围一般在 10¹~10⁸cd/m²(或称尼特,nit)之间)下,主要是视锥细胞在起作用,因而人眼的色觉和分辨物体的能力增强,但对亮度敏感降低了.这就是为什么白天很难在天空中看到星星的原因.

人对环境亮度变化的适应过程不是即刻达成,而是逐渐相趋的.在明适应过程中,如:当我们从漆黑的房间走到明亮的室外,眼睛顿时会觉得耀眼发眩,一时什么都看不见.此时可能需眯起眼睛过一两分钟后,才恢复正常逐渐看清周围的物体;类似的,在暗适应过程中,如:当我们从明亮的室外阳光环境走进漆黑的室内时,起初眼前一片漆黑看不见任何东西,隔了一段时间后,才能慢慢分辨出物体的轮廓.引起这种适应变化的原因是,视网膜上的两种感光细胞不足以承受这个过程中巨大的亮度范围跨度.其中每个感光细胞都有自己的最大响应值,当外部的光刺激超过它的最大阈限时,就无法形成进一步的响应产生神经脉冲.随着视网膜上接收到的亮度不断增加或减少,感光细胞自身的响应范围是在不断被压缩的,所以才有明适应时的一度炫目或暗适应时的暂时性失明.

除了感光细胞上的化学机制外,视觉系统还应用光学机制和神经传导处理机制共同作用完成视觉适应过程.在整个过程中,瞳孔、感光细胞、感光色素的合成分解以及神经传导处理分别扮演着不同的角色.瞳孔调节直径大小控制光通量,光微弱时放大而当光增大时缩小,但瞳孔在整个作用过程中只起到较小的作用,故本文中我们暂忽略其作用,感光细胞在接收到光刺激后,内部的感光色素会因光的作用开始分解(漂白)或合成.当人处于明视觉时,感光色素的分解速度会比合成速度更快.因此光感受器上能够接受的光子会变少,产生的光刺激也会变少,造成人眼对明亮环境下亮度增量变化的不敏感.因而每个细胞对于光刺激的响应都受到感光色素化学反应的速度和强度的影响.当反应发生在它们快到达响应的最大值附近时,即使感光细胞接收到再多的光子也不足以增加更多的响应,这种状态就被称为饱和状态,其直接结果就是响应压缩.

当人处于暗视觉时,视杆感光细胞中有一种叫视紫红质的物质,它对弱光敏感,在暗处就可逐渐合成,据统计,在暗处 5 分钟内就可以生成 60% 的视紫红质,约 30 分钟即可全部生成.因此在暗的地方待的时间越长,则对弱光的敏感度也就越高.但视杆感光细胞功能有障碍的人,其视杆色素细胞不能正常地工作,不管他在暗处待多久,都不能提高对弱光的敏感度,此现象称为夜盲.

另外,在环境光强骤变过程中,视细胞所初始接收到的亮度不仅与其本身亮度有关,且与其邻域细胞亮度相关.在计算不同视细胞的响应过程之前,需计算视细胞接收到的光强亮度随时间的适应变化.下面我们将根据以上人眼感知特性,提出一种新的明暗适应过程模拟算法.

3 基于人眼感知特性的明暗适应过程模拟算法

本节中,我们将利用人眼的感知特性,提出了基于人眼局部性特点的亮度响应模型算法来模拟人眼局部适应的变化过程.在明暗适应过程中,首先输入场景图像,针对视杆细胞和视锥细胞,分别计算这两种视细胞的时

间适应度模型,该模型利用了双边滤波方法来模拟感光细胞接受光刺激后同周边细胞之间的作用关系;再计算视杆细胞和视锥细胞在过程中各自的随时间变化的感知响应值;并采用逆响应度变换模块将其高动态图像变换映射到低动态范围(LDR)观察显示设备(如显示器)上,最后通过颜色适应矩阵变化,得到经纠正后的最终人眼所感知的不同时刻场景图像.整个算法的流程框架如图 1 所示.下面我们详细介绍本算法的各个步骤.

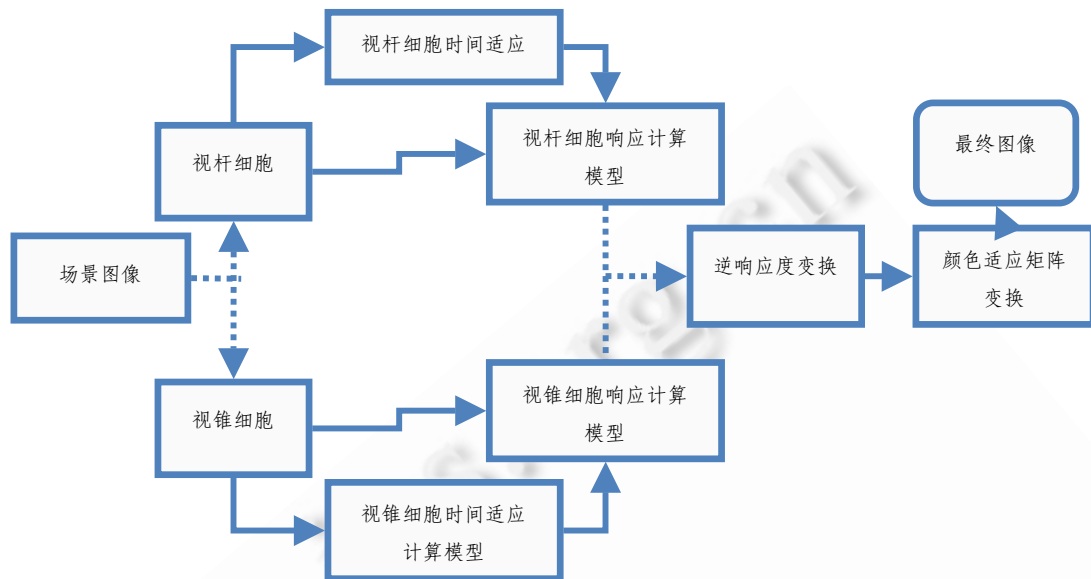


Fig.1 The flow chart of the algorithm of this paper

图1 本文算法的流程框图

3.1 视细胞时间适应计算

视觉中的神经感光处理过程是非常快的,在视杆细胞中一般 200s 内就能调整完成,而对视锥细胞来说就更短.可用以下指数函数^[13]来模拟视细胞适应状态感光亮度 L_a 的变化:

$$L_{a,i} = L_0 + (L_{a,i-1} - L_0) \times (1 - e^{-t/\tau_b}) \quad (1)$$

式中 L_0 为变化之前的初始亮度值, $L_{a,i}$ 和 $L_{a,i-1}$ 分别为第 i 时刻和其前一时刻 $(i-1)$ 的感光亮度, τ_b 对于视锥细胞和视杆细胞分别取 80ms 和 150ms.通过在时间变化过程中,不断更新 L_a 值,就可得到不同时刻两种视细胞(视杆和视锥细胞)适应状态感光亮度的变化.

当人眼逐渐适应到场景中可见的亮度后,就能看清较大亮度范围内的场景物体.比如:在晴天正午阳光高亮度范围环境下,人眼不仅能看到较亮的物体,还能看到树荫下的树叶,这都源于人眼是局部适应的.适应状态不仅取决于感光细胞所在的位置受到的光刺激,还跟它邻域内细胞所接收到的光刺激相关.

我们将当前位置上感光细胞的适应状态定义为 L_a ,它的值可以表示为与邻域内其他细胞亮度之间的关系函数.生理学上,一般认为感光细胞间相互作用是满足高斯分布的,但由于高斯滤波方法仅考虑空间上关系,所以在遇到亮度跨度较大的情况时会出现失真,因此我们改用双边滤波方法计算局部的亮度值,通过该滤波函数,可近似估计周围细胞的共同作用,同时能使图像免于光晕过强的现象.

$$L_{local}(n) = \frac{\sum_{m \in N(n)} G_{\sigma_s}(|m-n|) G_{\sigma_g}(\|L_m - L_n\|) L_n}{\sum_{m \in N(n)} G_{\sigma_s}(|m-n|) G_{\sigma_g}(\|L_m - L_n\|)} \quad (2)$$

其中 $N(n)$ 表示邻域像素,通常滤波窗口半径取为 3 或 5; $G(\cdot)$ 表示二维高斯滤波函数; σ_s 为空间域上的权重衰减因子; σ_g 为亮度域上的权重衰减因子; L_m 和 L_n 分别表示当前和邻域像素的感光亮度值.由于双边滤波方法中权

系数的计算,是随着亮度大小自适应改变的.在亮度差距较小时,权系数较大;而在亮度跨度较大时,则权系数很小趋向于0.从而可以有效保持边界并减少局部滤波中出现的光晕现象.

3.2 视细胞响应计算模型

视觉中响应机制发生人眼视网膜上,控制着人在不同亮度环境下动态适应变化的重要生理过程.视网膜上的感光细胞对一定范围内的亮度产生感知反应,通过人眼的适应机制,通过不断调整感光细胞的响应范围和视神经的响应,才能在当前光照情况下获得最佳的可见度.许多心理学实验中通过在不同实验条件下,测定亮度和响应之间的关系反映这种适应机制.在眼睛完全适应于环境光照的情况下,通过测定神经元的光刺激可以得到类似于S型的响应曲线,一般称为 Naka-Rushton^[18],形式如下:

$$V(L) = \frac{L^n}{L^n + \sigma(L_a)^n} V_{\max}(L_a) \quad (3)$$

其中 L 是亮度(单位为 cd/m^2), V_{\max} 是感光细胞的神经响应的最大值, $\sigma(L_a)$ 是半饱和状态的亮度,其物理意义是当其值为亮度 L 时, $V/V_{\max} = 1/2$ 其中 V_{\max} 和 σ 都受到当前感光细胞适应状态 L_a 影响. V 是当前适应状态下对亮度 L 的响应, n 是用来控制敏感度的参数, n 的值越大曲线就越陡, n 越小越平.该模型中 V/V_{\max} 与 L 关系形成了S曲线,如图2所示.通过这条曲线我们可以看到,在曲线的中间部分,亮度与响应之间几乎是处于线性的关系,表明感光细胞对亮度的改变是比较敏感的.曲线的上下端相对响应的范围都很窄,即当 L 远小于或者大于 σ 时,感光细胞不敏感.此时若要产生刺激响应,则需要有更大的亮度变化.这种情形跟前面在视觉感知中提到的响应压缩机制相符.人眼的适应机制能够消除响应压缩的效果,恢复可见性.利用这个响应模型,我们可近似模拟人眼对应的感知处理过程.

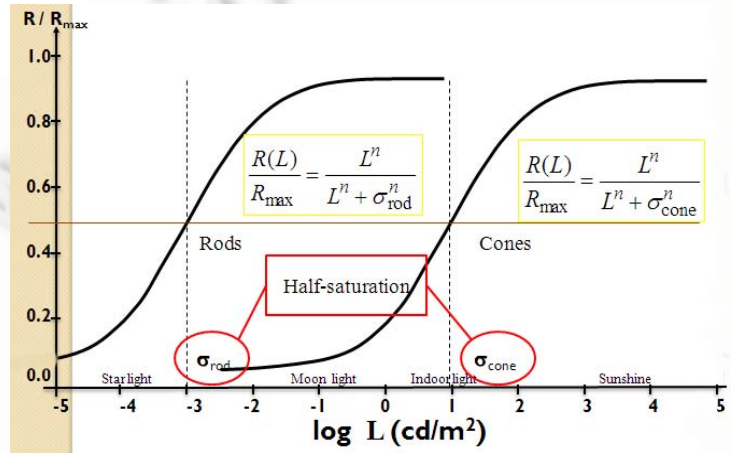


Fig.2 The relative visual responding curve of rods and cones under different light luminance
图2 不同环境光亮度下视杆和视锥视细胞的相对视觉响应曲线

为简化处理,我们将 V 转换成相对响应值表示,即 $V_{\max} = 1$. 则视锥和视杆细胞在 i 时刻的响应度分别为

$$V(L_{i,cone}) = \frac{L_{i,cone}^n}{L_{i,cone}^n + \sigma_i(L_a)^n} \quad (4)$$

$$V(L_{i,rod}) = \frac{L_{i,rod}^n}{L_{i,rod}^n + \sigma_i(L_a)^n} \quad (5)$$

其中 $L_{i,rod}$ 和 $L_{i,cone}$ 分别表示 i 时刻视杆和视锥细胞在暗视觉和明视觉下的亮度. $\sigma(L_a)$ 是与同当前适应状态亮度 L_a 相关的函数,它的取值决定了当前亮度下响应度的大小.

要建立视细胞随时间的响应模型,关键之处在于求出半饱和状态响应值 $\sigma(L_a)$ 随时间 t 的变化模型.首先根据前面式(1)求得视细胞适应状态感光亮度 L_a 随时间 t 的变化并经时间适应计算后.

视觉产生过程首先是从在感光细胞接收到光刺激后感光色素的化学反应过程开始的.这种化学反应将导致色素的漂白(分解),且漂白速度和接收到的光强有关,光强越大,漂白速度就越快.另一逆过程—色素合成,则是同已漂白的色素量和反应持续的时间相关.由于化学反应的速度跟当前的色素量有关,并且由于漂白与合成过程不是瞬间完成的,所以视觉适应过程取决于当前的色素浓度.因此我们可以得到在稳定状态下,取 B 为未漂白的色素总量,它与当前亮度 L 的关系定义为

$$B = \frac{L_h}{L_h + L} \quad (6)$$

其中 L 表示色素浓度达到一半的亮度值. L_h 为常量,对于视锥和视杆细胞分别取 $4 \log cd/m^2$ 和 $4.5 \log cd/m^2$. 由于在心理学实验中,发现色素漂白的过程满足指数的变化关系,又因为它是跟目前的光强度相关的,所以可以将其引申到时间变化的过程中^[19],得到:

$$B \times (L_h + L) = L_h + [B_h \times (L + L_h) - L_h] \times \exp\left(-\left(1 + \frac{L}{L_h}\right) \frac{t}{\tau_a}\right) \quad (7)$$

其中,当 $t \rightarrow \infty$ 时,表示目前达到稳定的状态,可以得到上面的式(6).这里 τ_a 对于视杆和视锥细胞分别取 400 和 120s. B_h 为当 $t = 0$ 时,当前色素的总量.根据稳态下的色素量,我们可以获得曲线(如图 3 所示)表示出该量同亮度之间的关系.通过这条曲线,我们可以发现在亮度小于 3 个对数亮度级的时候,色素的总量基本上维持着不变;当亮度扩大到 5~6 个对数亮度级时,色素很快被消耗.在亮度突变到非常高时,感光细胞吸收的光子数会减少,因此人会有耀眼的感觉.

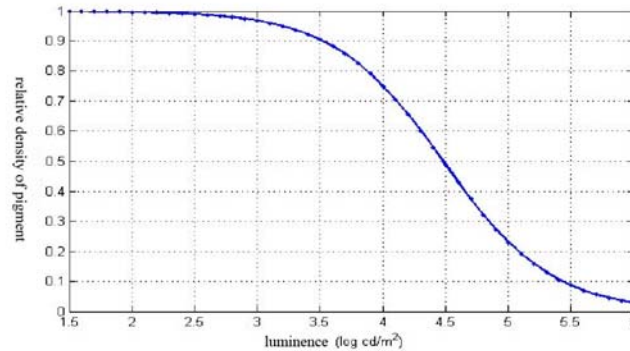


Fig.3 The relationship between the luminance under steady state and the density of the pigment
图 3 稳态下亮度与感光色素浓度的关系图

在求得色素总量随时间变化的表达式 $B = B(t) = B(L_a(t))$ 后,我们再求出半饱和和状态响应值 $\sigma(L_a)$ 随时间 t 的变化.由于亮度逐渐增加时,视细胞色素总量在减少;而当亮度逐渐减少时,视紫红质又会逐渐合成使得色素的总量增加.可假设感光细胞上的亮度和色素总量成反比关系,则可将它们的关系表述为

$$\sigma_b(L_a) \times B_h(L_a) = const \quad (8)$$

这样就可求得半饱和和状态响应值 σ 随时间 t 的变化,即 $\sigma = \sigma(t) = \sigma(L_a(t))$,并结合视锥和视杆细胞这两部分的变化机制,便可以得到半饱和和状态同当前适应状态之间的关联.可在明、暗适应过程中连续地模拟视觉动态变化的感知过程.

3.3 逆响应度变换

在获得了明暗适应场景的高动态范围(HDR)的变化规律后,如何将其变换到低动态范围(LDR)观察显示设备(如:显示器)来有效显示,这也正是色调映射的目的所在.设 V 为之前定义针对场景的响应值,而 V' 为观察显示设备所计算得到的响应值,可使: $V = V'$,则可得到:

$$\frac{L^n}{L^n + \sigma^n} = V = V' = \frac{L'^n}{L'^n + \sigma'^n} \quad (9)$$

通过上式的逆变换转换后,可分别推导出视锥(cone)和视杆(rod)细胞的最终的亮度值所对应的关系:

$$\frac{L'_{i,cone}}{L_{i,cone}} = \frac{\sigma'_{i,cone}}{\sigma_{i,cone}} \quad (10)$$

$$\frac{L'_{i,rod}}{L_{i,rod}} = \frac{\sigma'_{i,rod}}{\sigma_{i,rod}} \quad (11)$$

从上面公式中可看到,取得最终的亮度值的关键是针对视锥和视杆细胞计算未知量 σ' 和 σ .除了受到整体环境亮度影响外,人在观察时主要是受到局部影响,这是由人眼局部适应的特点决定的.针对这种现象,我们对显示设备观察者同样用局部状态的求解方法计算,对此进行改进:

$$\sigma' = \frac{1}{1 + e^{(-2\log(|L_a - t|) + \delta)}} \quad (12)$$

通过式(12),可以压缩图像中较高和较低的亮度区域,因此使得亮度的大部分区域能拉伸到更大的范围.若图像的平均亮度较低,说明大部分区域比较暗,因此要降低 t 的值;同理,若较亮时,则提高 t 的值.在我们的实现过程中, δ 为极小量, t 为用户设置的参数.根据 t 的取值不同,可以看到图像亮度的明显变化.

3.4 颜色适应矩阵变换

颜色适应(chromatic adaptation)是人类视觉系统在亮度变化过程中,仍能维持物体外观颜色的重要机制.在人的适应过程中,明适应和暗适应会影响物体的外观颜色,比如黑夜里的白色要比阳光下的黑色亮度要低.而即使光亮度发生变化,人仍感觉颜色没发生太大的变化,颜色适应过程在其中起到了更加重要的作用.这种色彩外观不改变的现象称作色彩不变性(color constancy).实际上,它也是使人能在不同环境下感知物体色彩的关键因素,在用相机拍摄时,我们就需要调整白平衡来恢复色彩.同样,在视觉适应过程模拟中,应该包含颜色适应的过程,这样才能正确表达物体色彩的信息.

不同环境下使人产生同样的色彩感知的不同光刺激,称为等效颜色(corresponding colors).比如在某一观看条件下有值为 XYZ_1 的光刺激,可能同 XYZ_2 在另一观看条件下产生的可见性是一样的,此谓“等效颜色”.颜色适应的同一模型里也不可能包含如亮度、色调等全部的信息,所以需要在在使用过程中相互间通过使用转换公式进行转化.

色彩学中主要有 Von Kries 模型,Fairchild 模型和 Nayatani 等颜色适应模型^[21].由于之后的模型大部分都是从 Von Kries 的方法中延伸开来的,这里我们采用 Von Krie 模型来表述这个过程.完整的转换过程如图 4 所示.



Fig.4 The process of color adaptation transforming

图 4 颜色适应转换过程

我们使用亮度通道 Y 分量,将其他通道也做同比例的缩放,从而保持各分量的比例:

$$Out(x, y) = \frac{Y_{out}(x, y)}{Y_{in}(x, y)} In(x, y) \quad (13)$$

其中 $Y_{in}(x, y)$ 是初始的亮度, $Y_{out}(x, y)$ 是经映射后的亮度; $In(x, y)$ 和 $Out(x, y)$ 分别代表初始和待计算的 X 和 Z 通道分量.通过该变换后,我们得到新的 XYZ 值.然后再将该数值转换到 LMS 空间得到 LMS_1 ,其中 LMS_1 分别表现 3 种不同的视细胞(S,M,L-Cones)的响应度:

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ M_1 \\ S_1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4002 & 0.7076 & -0.0808 \\ -0.2263 & 1.1653 & 0.0457 \\ 0.0 & 0.0 & 0.9182 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (14)$$

第 2 步是将 LMS_1 然后转化到新的环境下 LMS_2 值,最后再转换回 XYZ 空间得到颜色适应后的值.

4 绘制结果

我们在 Intel 酷睿 2.4GHZ,2GB 内存的 PC 机上,首先利用上面的算法流程在对不同的图像实现了简单的色调映射处理效果,如图 5 所示.图中左列为整图的比较;右列为细节图的比较.其中,图 5(a)为原图,图 5(c)为经 Reinhard^[15]算法后的处理结果,图 5(e)为经本算法的处理后的结果.从中可以看到,本算法比起 Reinhard 算法,其整个场景亮度对比更强一些.而从细节上来看,图 5(b)、图 5(d)、图 5(f)分别对应于左列各图像中的方框细节区域经放大后的图像.从细节图中可以看出,本算法处理结果中的目标边缘背景对比更明显些、更具有立体感,能较有效地处理低亮度场景图像的色调映射细节增强处理,因此可应用于人眼暗适应的动态过程的模拟;同样,该种处理方式可以缩小高亮度场景图像的亮度,可应用于人眼明适应的动态过程的模拟.当然,其处理过程需结合前面所讨论的人眼感知机制模型.



Fig.5 Comparison between Reinhard algorithm^[15] and this algorithm

图 5 本算法与 Reinhard 算法^[15]处理结果的比较

进而在此基础上,我们依据上述人眼的感知响应模型,并经多次实验,调节了其中的生理参数值,在三维场景上实现了对明、暗适应过程中人眼感知的动态模拟,其动态模拟序列分别如图 6 和图 7 所示.其中,图 6 为明适应过程模拟序列结果.从中可以看到,人若原处于黑暗环境(如图 6(a)所示)中,在突然开启灯光后,人眼起初将感到炫目(如图 6(b)所示),然后,随着视锥细胞感知响应功能的增强,人眼的感知能力逐渐恢复正常,炫光消失(如图 6(c)、图 6(d)所示),慢慢地能看清场景的细节了(如图 6(e)、图 6(f)所示),一般明适应过程延续时间在 1 分钟左右.

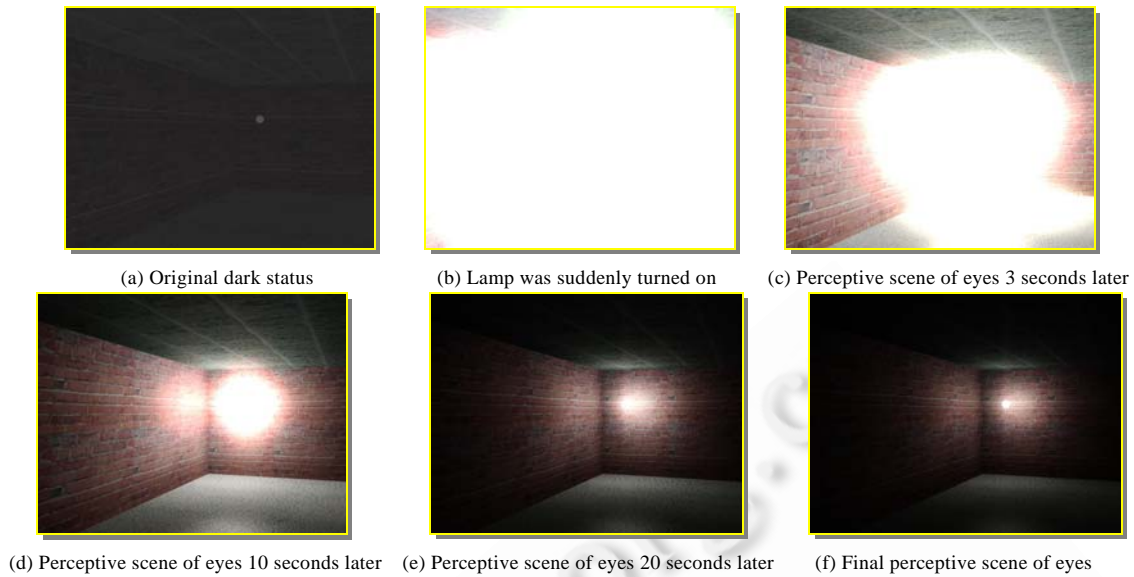


Fig.6 Perceptive image sequences of eyes under different moment during the process of light adaptation

图 6 明适应过程不同时刻的人眼感知图像序列

图 7 为暗适应过程模拟序列结果.从原来明亮的环境(如图 7(a)所示)突然变到暗环境(此处为灯光关闭)后,人眼首先感知到的是一片漆黑(如图 7(b)所示),因为在如此低亮度的环境下,接近视锥细胞的最低灵敏度,视锥细胞对低亮度失去感知功能,而视杆细胞无颜色感知功能,且感知响应速度慢.经过一段时间后,视锥细胞能较快得到感知响应,在存有一定低亮度的环境中,逐渐感知到一点场景细节(如图 7(c)、图 7(d)所示).而随着时间的流逝,视杆细胞最终恢复了在低亮度暗环境中的响应感知,于是人眼最终大致能够看清楚场景中的物体(如图 7(e)、图 7(f)所示).一般暗适应过程延续时间需要 30 分钟左右,且其感知的程度与环境的亮度有关.

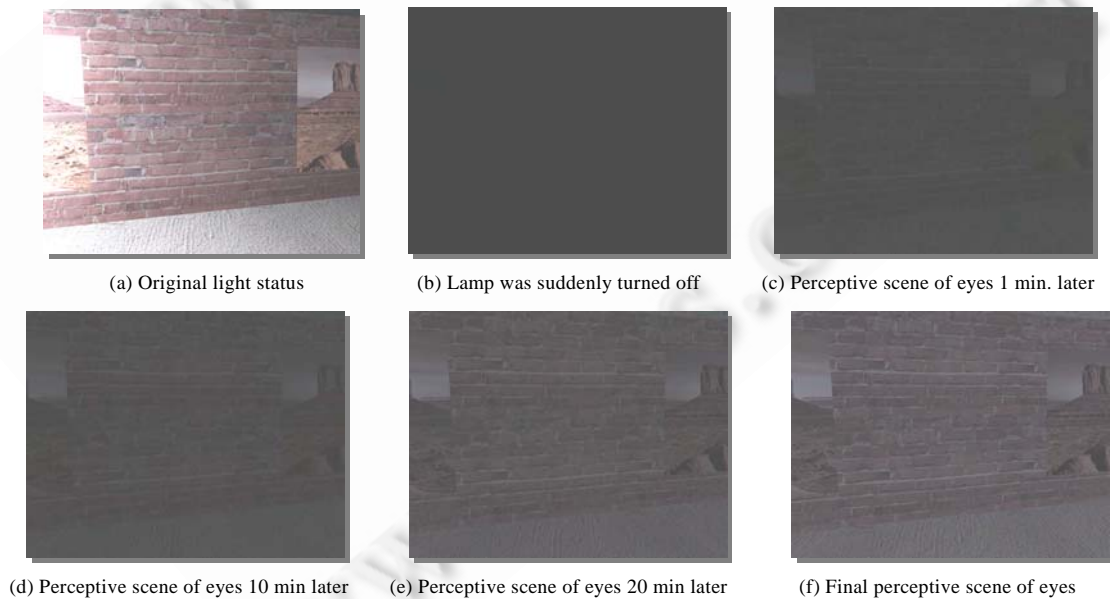


Fig.7 Perceptive image sequences of eyes under different moment during the process of dark adaptation

图 7 暗适应过程不同时刻的人眼感知图像序列

5 总结与讨论

本文中,我们针对现有计算机真实感图形学及虚拟现实显示算法不能表现当环境光强骤变时人眼的场景感知变化的缺陷,提出并实现了一个基于人眼感光细胞亮度响应机制的明暗适应过程模拟的新算法.该算法首先针对人眼中视锥细胞和视杆细胞不同的生理反映机制,在不同亮度环境下建立起亮度与响应的变化,再结合图像高动态范围处理技术及实验心理学中的经验模型,并经实验调整不同环境亮度下的生理适应值,通过逆响应变换及颜色适应变换,最终在三维场景中较逼真地模拟出人眼在明暗适应过程中的动态感知变化.相比 Reinhard 等人的算法,本算法能较好地处理低亮度场景图像的色调映射细节增强处理效果,场景动态感知变化效果更具真实感.

但本算法的计算模型目前还较为复杂,还达不到实时处理的虚拟现实(VR)系统的要求.今后要对本算法进行模型合理简化及采用 GPU 进行加速计算处理,并针对不同的显示设备提出一个统一的改进模型以满足实际的应用需求.

References:

- [1] 彭群生,鲍虎军,金小刚.计算机真实感图形的算法基础.北京:科学出版社,1999.122-359.
- [2] 石教英.虚拟现实基础及实用算法.北京:科学出版社,2002.1-20.
- [3] http://news.ycwb.com/2010-01/21/content_2408060.htm
- [4] 刘晓玲,主编.视觉神经生理学.北京:人民卫生出版社,2004.1-3.10-12.
- [5] Phong BT. Illumination for computer generated picture. *Graphics and Image Processing*, 1973,18(6):311-317.
- [6] Blinn JF. Models of light reflection for computer synthesized pictures. *Computer Graphics*, 1977,11(2):192-198
- [7] Whitted T. An improved illumination model for shades display. *Comm. ACM*, 1980,23 (6):343-349
- [8] Gondek JS, Meyer GW, Newman JG. Wavelength dependent reflectance functions. *Computer Graphics*, 1994,28(4):213-220
- [9] Li J, Peng QS. New illumination model for scenes containing diffraction gratings. *Progress in Natural Science*, 1998,8(2):174-179
- [10] 王章野,江照意,鲍虎军,彭群生.基于量子光学的红外成像光照模型.计算机学报,2002,25(9):897-903.
- [11] Ferwerda JA, Pattanaik SN, Shirley P, *et al.* A model of visual adaptation for realistic image synthesis. In: Fujii J, ed. *Proc. of the 23rd Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM Press, 1996. 249-258.
- [12] Durand F, Dorsey J. Interactive tone mapping. In: Peroche B, Rushmeier HE, eds. *Proc. of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques 2000*. London: Springer-Verlag, 2000. 219-230.
- [13] Pattanaik SN, Tumblin J, Yee H, *et al.* Time-Dependent visual adaptation for fast realistic image display. In: Brown JR, Akeley K, eds. *Proc. of the 27th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000. 47-54.
- [14] Irawan P, Ferwerda JA, Marschner SR. Perceptually based tone mapping of high dynamic range image streams. In: Bala K, Dutré P, eds. *Proc. of the Eurographics Symp. on Rendering 2005*. Konstanz, 2005.
- [15] Reinhard E, Devlin K. Dynamic range reduction inspired by photoreceptor physiology. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2005,11(1):13-24.
- [16] Ledda P, Santos LP, Chalmers A. A local model of eye adaptation for high dynamic range images. In: van Zijl L, Marais P, eds. *Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualization and Interaction in Africa*. New York: ACM Press, 2004. 151-160.
- [17] Myers DG,著,黄希庭,等,译.心理学.第7版,北京:人民邮电出版社,2006.164-176.
- [18] Naka KI, Rushton WA. S-Potentials from colour units in the retina of fish. *The Journal of Physiology*, 1966,185(3):536-555.
- [19] Hollins M, Alpern M. Dark adaptation and visual pigment regeneration in human cones. *The Journal of General Physiology*, 1973, 62(4):430-447.
- [20] Lee S, Pattichis MS, Bovik AC. Foveated video quality assessment. *IEEE Trans. on multimedia*, 2002,4(1):129-132.



王章野(1965—),男,浙江乐清人,博士,副教授,主要研究领域为计算机真实感图形,虚拟现实,红外视景仿真,可视化和图像处理.



张繁(1978—),男,博士生,讲师,主要研究领域为虚拟现实,GPU 并行计算.



王作省(1985—),男,硕士,主要研究领域为自然场景模拟,虚拟现实.



邹少芳(1968—),男,讲师,主要研究领域为计算机美术,虚拟现实.



廖继渊(1988—),男,硕士生,主要研究领域为虚拟现实.



崔晓燕(1987—),女,硕士生,主要研究领域为虚拟现实.



彭群生(1947—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机真实感图形,虚拟现实,生物计算,计算机动画,视频处理,科学信息可视化.