

真实感天空的实时渲染^①

王 纲^{②*} 季振洲^{*} 张泽旭^{③**}

(* 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

(** 哈尔滨工业大学深空探测基础研究中心 哈尔滨 150008)

摘 要 提出一种实现真实感天空实时渲染的高效方法。首先利用基于分析的天空模型实现天空的光照计算,该模型充分考虑了天空的昼夜变化,并对夜空中特有的各类光源如月球、星体、黄道光和气辉等进行分析;其次通过色调重现实现天空的真实感渲染,通过对暗视效果的模拟进一步提高夜空渲染的真实感;最后给出基于观察窗口的天空几何模型和银河系、星体的渲染方法,并通过图形处理器(GPU)实现上述算法的实时渲染。该方法适用于室外场景的渲染,并已成功应用于某直升机飞行模拟器中。

关键词 天空模型,色调重现,几何模型,实时渲染

0 引 言

天空、水、云、雨、雪等自然现象的实时渲染研究一直都是计算机图形学的研究热点,而且提高渲染效果的真实感已逐渐成为目前研究的重要方向。由于天空包括多种天体以及存在着大气散射、空气污染、时间相关性等诸多影响因素,因而天空的渲染成为研究的难点之一。本文对真实感天空的渲染进行了研究,提出了一种实现真实感天空实时渲染的高效方法。

1 相关知识

天空的渲染包括天空模型的建立和计算结果渲染两部分,而模型则又可以进一步细分为基于物理的模型和基于分析的模型。基于物理的模型主要考虑大气对光照的影响,包括吸收、折射以及 Rayleigh 散射和 Mie 散射等,由于大气效果的计算需要消耗大量计算资源,因而用这种模型进行天空的渲染主要是通过简化大气特性来计算^[14],或是通过建立独特的大气模型实现对大气的光学特性的模拟^[5]。另一种方法是通过图形处理器(graphics processing unit, GPU)实现光照计算的加速,例如 O'Neil 于

2005 年通过 GPU 实现了文献[1]提出的算法,并实现了对高动态范围(high dynamic range, HDR)的模拟^[6]。Bruneton 等学者在 2008 年基于光照传输公式,通过预先计算的各种视点、观察方向以及太阳方向数据,通过 GPU 实现了视点在各种高度的天空光照散射现象^[7]。上述方法主要考虑了白昼及黄昏和拂晓时的天空渲染,而 Haber 等依据光照被小分子散射的理论,实现了基于物理的日出前和日落后的天空光照及颜色计算^[8]。Jensen 等提出了一种夜空、月光、星光的照度和大气散射等模型,并基于天文数据精确地模拟了天体的位置和亮度,实现了夜间天空的渲染^[9,10]。基于物理的模型对天空的模拟结果比较精确,尽管采用了上述各类加速算法,在实时性方面依然不能令人满意。

不同于物理模型,基于分析的模型主要是通过长期观测的结果数据进行分析建立起的天空的光照模型,因而无需进行大气特性的复杂计算。Perez 等人于 1993 年就提出了一种基于 5 个参数的模型实现了各种天气下的天空光照计算^[11],国际发光照明委员会(CIE)在 2004 年采用了此模型并根据此模型定义了 15 种常规天空模型^[12],Preetham 等给出了实现方法^[13],Hoffman 和 Nielsen 等在这一基础上进一步改进,解决了 Preetham 等提出的方法中在天空中间出现暗色区域的问题,并实现了 GPU 加

① 863 计划(2008AA12A241)资助项目。

② 男,1967 年生,博士生,高级工程师;研究方向:视景仿真和视觉计算;E-mail: gmkwangr@gmail.com

③ 通讯作者, E-mail: zexuzhang@hit.edu.cn

(收稿日期:2011-06-27)

速^[14,15]。此外,Zotti 等对 Preetham 等提出的天空模型的辉度(luminance)生成方式及其可靠性和稳定性进行了研究^[16]。Schaefer 则提出了另外一种天空光照模型,该模型综合考虑了包括观察者所处的纬度、高度以及温度、相对湿度及时间等影响因素^[17]。

由于白昼与夜晚时天空光照的变化范围极大,而显示设备的输出范围有限,因而如何在显示设备上正确显示出天空模型的计算结果非常重要。Tumblin 等在分析了显示设备和人眼对光照的显示和感知的基础上,实现了真实图像的光照在显示设备上的色调重现^[18],Devlin 等在此基础上进行了进一步的改进,得到了更好的效果^[19];Larson 等学者则采用直方图调整的方法实现了高动态范围场景的色调重现^[20]。

下面对本文提出的天空渲染方法进行较详细的描述。

2 数学模型

地球的周围包裹着厚厚的大气层,大气层是由空气分子和尘埃组成的,在太阳等天体发出的光线经过大气层到达地球的过程中,光线会被大气层中的空气分子和尘埃吸收和散射,天空的光照主要是由各个方向到达地球的散射光线组成的。

2.1 散射模型

天空的颜色是由于散射引起的,不同大小的分子对不同波长光线的散射效果是不同的。Rayleigh 散射主要由小分子造成,这类散射方向性较弱,但受光线波长影响较大,对短波光线的散射比较强,因而白天的天空呈现出蓝色;Mie 散射则是由大分子引起的散射,其方向性比较强,受波长的影响较小,因此太阳附近较四周的天空更亮。角度散射系数一般为

$$\beta(\theta) = \beta \cdot f(\theta) \quad (1)$$

式中, β 为总散射系数, $f(\theta)$ 为相函数, θ 为散射角。

对于 Rayleigh 散射,其总散射系数为

$$\beta = \frac{8\pi^3(n^2-1)^2}{3N\lambda^4} \left(\frac{6+3p_n}{6-7p_n} \right) \quad (2)$$

式中, n 为空气的折射系数(≈ 1.0003), N 为标准温度和压力下的单位容积的分子数, p_n 为去极化因子, λ 为光波的波长。对于标准大气来说, $N = 2.545 \times 10^{25}$, $p_n = 0.0035$ 。

Rayleigh 散射相函数为

$$f_r(\theta) = \frac{3}{16\pi}(1 + \cos^2\theta) \quad (3)$$

对于 Mie 散射,总散射系数为

$$\beta = 0.434c\pi \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{v-2} K \quad (4)$$

式中, c 为浓度因子, v 为 Junge 指数(对天空来说, $v = 4$), K 为与波长相关的变量。

Mie 散射相函数为

$$f_m(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 - 2g\cos\theta + g^2)^{3/2}} \quad (5)$$

式中, g 为非对称因子。

2.2 天空的光照模型

精确计算天空光照需要耗费大量的计算资源,难以满足对天空实时渲染的要求,因此采用基于观测数据或分析模型来对天空光照进行模拟,可以有效降低对计算资源的需求,本文采用分析模型实现天空光照的计算。

CIE 采用文献[11]提出的 5 个参数模型,并根据此模型定义了 15 种包括晴天和阴天的常规天空光照模型,该模型采用下式作为特征函数:

$$F(\theta, \gamma) = (1 + Ae^{B/\cos\theta})(1 + C(e^{D\gamma} - e^{D\pi/2}) + E\cos^2\gamma) \quad (6)$$

式中, A, B 为地平线附近的亮度梯度参数, C, D, E 为散射相关参数, θ 和 γ 为角度,其定义参见图 1。通过对 A, B, C, D, E 5 个参数设置不同的值,可以实现 15 种常规天空光照模型。

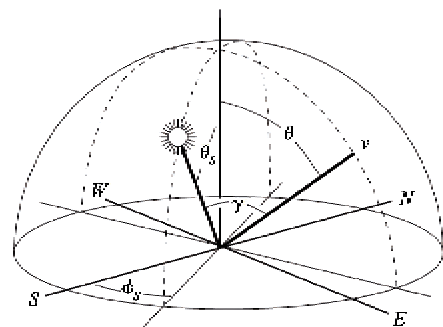


图1 天空模型的角度定义

依据上述模型,天空中任一观察方向上的辉度 Y 由上述的特征函数和天顶处的辉度决定,如式

$$Y = Y_z \frac{F(\theta, \gamma)}{F(0, \theta_s)} \quad (7)$$

所示。式中 Y_z 为天顶处的辉度,采用 Y 表示辉度是基于 CIE 的标准和下面提到的 xyY 颜色空间。

上述模型仅仅给出了辉度的计算,没有提供任何色彩信息,研究表明,该模型并不适用于 CIE 颜色

空间 XYZ 的计算,但该模型可以用来进行 xyY 颜色空间的计算:

$$x = x_z \frac{F(\theta, \gamma)}{F(0, \theta_s)}, y = y_z \frac{F(\theta, \gamma)}{F(0, \theta_s)} \quad (8)$$

式中, x_z, y_z 为天顶处的颜色。

上述各式中的角度定义见图 1。

上述的天空模型仅仅考虑了太阳对天空光照的贡献,对于夜空渲染来说,还应该考虑月球等天体以及其它因素对天空光照的影响。夜空的光照主要来自月光、太阳的间接光照、黄道光、气辉以及少量来自于银河系的漫射光和慧星等的光照。当给定月相角 φ 和距离 d 时月球的辐照度(irradiance)为

$$E_m(\varphi, d) = \frac{2C_a r_m^2}{3d^2} (E_{sm} + E_{sm}(1 - \sin \frac{\varphi}{2} \tan \frac{\varphi}{2} \log(\cos \frac{\varphi}{4}))) \quad (9)$$

式中, r_m 为月球的半径, E_{sm} 为太阳到达月球表面的辐照度, E_{em} 为地球到达月球表面的辐照度,常数 C_a 为满月时的平均反照率, $C_a = 0.072$ 。

夜空中星体的照度是由天文学中的视星等决定的,给定夜空中任一星体,其视星等 m_v 由式

$$m_v = - (19 + 2.5 \log_{10}(E_s)) \quad (10)$$

决定。式中, E_s 是星光到达地球时的辐照度,反之给定某星体的视星等,其辐照度为

$$E_s = 10^{-m_v - 19} \quad (11)$$

根据观测结果,太阳的视星等约为 -12.7 ,满月时月球的视星等约为 -12.2 ,天空中最亮的星体天狼星的视星等约为 -1.6 ,肉眼能够看到的星体约为 6 等星。

黄道光是由于地球伴随轨道上有一层尘埃围绕着太阳,太阳光线被这层尘埃散射后到达地球,黄道光在傍晚时分显现并随着时间的推移而逐渐扩散。而气辉则是由于地球的外层大气引起的,在距离地面约 110km 高度上的大气,受到主要来自于太阳的高能粒子不断轰击而发出一定波长的光。

逐个星体计算其光照的贡献是不现实的,同样黄道光、气辉等也难以通过计算来实现,这类光照的贡献可以通过平均值或观测数据给出,表 1 列出一些典型光源的辐照度数据。

从辐照度模型不能获取星体的颜色,天文学建立了一系列标准对特定的波段进行测量,其中 UVB 系统被广泛采用,该系统中 B 为蓝色光强度, V 为黄绿光强度, U 为紫外光强度,差值 B-V 被称为颜色索引,表示星体的颜色。通过颜色索引,可以求出星

表 1 典型光源的辐照度

光源类型	辐照度 (W/m^2)
太阳光	$1.3 \cdot 10^3$
满月	$1.3 \cdot 10^{-3}$
较亮行星	$2.0 \cdot 10^{-6}$
黄道光	$1.2 \cdot 10^{-7}$
整体星光	$3.0 \cdot 10^{-8}$
气辉	$5.1 \cdot 10^{-8}$
银河系漫射光	$9.1 \cdot 10^{-9}$
慧星光	$9.1 \cdot 10^{-10}$

体的温度

$$T_{\text{eff}} = \frac{7000K}{B - V + 0.56} \quad (12)$$

由该温度可以计算出星体的光谱辐照度, K 为温度单位。

3 色调重现

真实感渲染的目的是使渲染出的场景与观察者看到的真实场景一致,因而尽管光照结果是按照真实场景中的光照计算出来的,但是最终由显示设备输出的渲染结果与观察者看到的真实场景仍然有一定的差距,这主要是由于显示设备的局限性造成的。辐照度是场景亮度的重要特性,但是人眼对不同波长的光敏感性是不同的,更重要的是,人眼对亮度在时空上的变化比对亮度的绝对值更敏感。相较于高动态范围(HDR)算法,色调重现算法更加适合于本文中既有白昼又有夜空的渲染。

人眼对周围的环境光照有调节作用,设真实场景的辉度为 L_w , 人眼观察到的辉度为 $L_{a(w)}$, 则人眼观察到的真实场景亮度(brightness) B_w 为

$$B_w = 10^{\beta(L_{a(w)})} (\pi \times 10^{-4} L_w)^{\alpha(L_{a(w)})} \quad (13)$$

式中, α 和 β 为真实场景的调节函数,分别为

$$\begin{aligned} \alpha(L_{a(w)}) &= 0.4 \log_{10}(L_w) + 1.519 \\ \beta(L_{a(w)}) &= -0.4(\log_{10}(L_w))^2 \\ &\quad + 0.218 \log_{10}(L_w) + 6.1642 \end{aligned} \quad (14)$$

设显示设备的辉度为 L_d , 人眼观察到的辉度为 $L_{a(d)}$, 显示设备的亮度 B_d 为

$$B_d = 10^{\beta(L_{a(d)})} (\pi \times 10^{-4} L_d)^{\alpha(L_{a(d)})} \quad (15)$$

由于色调重现是保持人眼观察到的显示设备输出的亮度与观察到的真实场景的亮度一致,即 $B_w = B_d$, 因而得到

$$L_d = \frac{1}{\pi \times 10^{-4}} 10^{\frac{\beta_{a(w)} - \beta_{a(d)}}{\alpha_{a(d)}}} (\pi \times 10^{-4} L_w)^{\frac{\alpha_{a(w)}}{\alpha_{a(d)}}} \quad (16)$$

对于给定的显示设备,设其伽马校正值为 γ , 其帧缓存的值为 $n \in [0,1]$, 则

$$L_d = L_{amb} + L_{dmax} n^\gamma \quad (17)$$

因而

$$n = \left(\frac{L_d - L_{amb}}{L_{dmax}} \right)^{1/\gamma} \quad (18)$$

式中, L_{amb} 为显示设备的环境辉度, L_{dmax} 为显示设备的最大辉度, n 又称作色调重现的操作符,其值应箝位在 $[0,1]$ 范围内,将式(16)代入到式(18),得到最终的色调重现操作符为

$$n = \left(\frac{10^{\frac{\beta_a(w) - \beta_a(d)}{\alpha_a(d)}} (\pi \times 10^{-4} L_w)^{\frac{\alpha_a(w)}{\alpha_a(d)}} - L_{amb}}{\pi \times 10^{-4} L_{dmax}} \right)^{1/\gamma} \quad (19)$$

色调重现前后的白昼及拂晓或黄昏对比如图 2 所示,从图中可以看出,在进行色调重现前,太阳至地平线的区域过于明亮,色调重现后,渲染效果有了明显了改进。

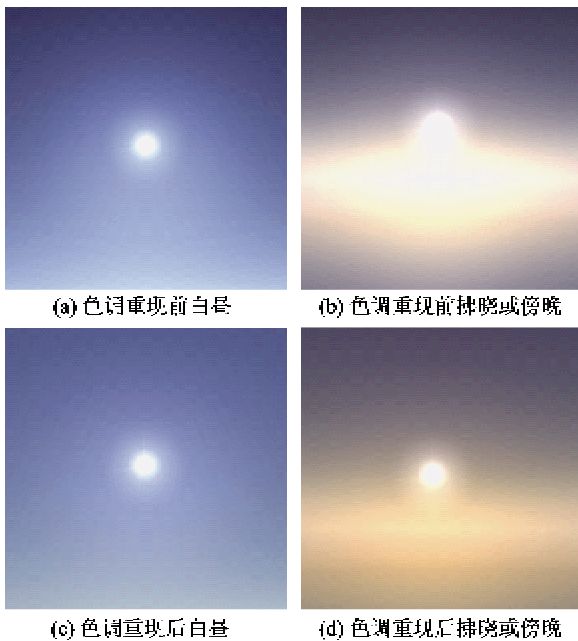


图 2 色调重现前后效果对比

人眼在低照度环境下难以分辨色彩,这种现象称为暗视,暗视是人眼中杆细胞的特性,文献[9]根据对夜景图像的统计提出了一对基准值 $(x_b, y_b) = (0.25, 0.25)$ 。假定存在一个值 $s \in [0,1]$, 用于表示暗视的程度,当 $s = 0$ 时,为完全暗视, s 在 $0 \sim 1$ 之间时为半暗视,半暗视所对应的辉度范围约为 $0.01 \text{cd/m}^2 \sim 4 \text{cd/m}^2$,具体表征为

$$s = 0 \quad (\log_{10} Y < -2)$$

$$s = 3 \left(\frac{\log_{10} Y + 2}{2.6} \right)^2 - 2 \left(\frac{\log_{10} Y + 2}{2.6} \right)^3 \quad (-2 < \log_{10} Y < 0.6)$$

$$s = 1 \quad (\text{其他}) \quad (20)$$

此时有:

$$x = (1 - s)x_b + sx$$

$$y = (1 - s)y_b + sy \quad (21)$$

$$Y = 0.4468(1 - s)V + sY$$

式中, x, y, Y 为定义在 xyY 颜色空间中的颜色信息, V 为暗视时的辉度, 0.4468 为一均匀白色区域的辉度由 Y 到 V 时的比率。考虑暗视前后的渲染结果如图 3 所示,考虑暗视后的夜空明显少了颜色信息。

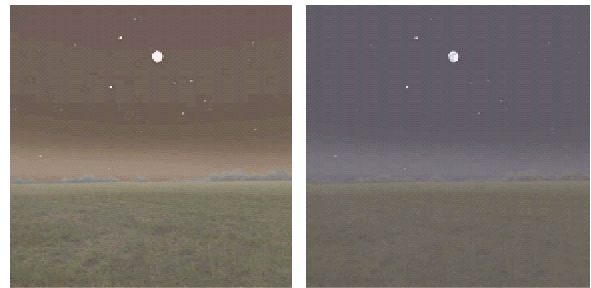


图 3 考虑暗视前后效果对比

4 渲染的实现与仿真

天空的几何模型常见的有天空包围盒、包围球以及天空穹顶等,这些模型在计算光照时不够均匀,本文提出了一种基于观察窗口的均匀几何模型,给定窗口的初始位置 (x_0, y_0) , 窗口宽度和高度为 (w, h) , 设投影矩阵为 M_{proj} , 则窗口上一点 (x, y) 在三维空间的坐标为

$$P = M_{proj}^{-1} \left(\frac{2(x - x_0)}{w} - 1.0, \frac{2(y - y_0)}{h} - 1.0, 1.0 \right) \quad (22)$$

对 P 进行归一化后即视为视点到该点的方向向量,本文的光照模型包括大量的余弦计算,通过求取两个单位向量的点积实现余弦计算,可以大大提高运算速度。

除了光照计算外,在进行色调重现时,需要通过真实场景的辉度 L_w 最终得到色调重现操作符 n 。本文通过将天空的辉度渲染至一张浮点格式的纹理,对该纹理的纹素(texel)求平均值,并用该平均值作为 L_w , 得到了较好的渲染效果。

太阳、地球与月球之间的位置关系随着时间的

变化是不断变化的,三者之间位置的变化对于天空的渲染结果至关重要,本文采用 IMCCE 的 VSOP87 模型计算三者的运动,该模型可以对太阳系各天体的运行轨道进行较准确的模拟。

银河系是夜空中最明亮的星系之一,包括数以亿计的星体,文献[21]提供了 $360^{\circ} \times 180^{\circ}$ 全景图,本文采用修改后的图片来对银河系渲染。其它星体采用耶鲁星表,该星表包括了 9000 多个星等为 +6.5 以上的星体,囊括了肉眼能够看到的全部星体,星表还给出了基于 EPOCH J2000.0 球形轨道坐标。

采用本文的方法,在 GPU 上实现了天空光照的计算及色调重现,在实验用 PC(Pentium D 3.0 Ghz, 1 GB 内存, NVidia GTX260 + 显卡,分辨率 1280×1024) 上,渲染白天场景的平均帧率达到了 210 帧,夜空的渲染帧率达到了 320 帧,完全满足实时渲染的要求。本文的算法包括大量的指数和三角函数等运算,能够取得高的渲染帧率主要得益于 GPU 的强大运算能力以及本文提出的天空几何模型。

本文的算法已成功应用于某直升机模拟器,渲染结果如图 4 所示,其中图 4(a)、(b) 关闭了地形渲染。

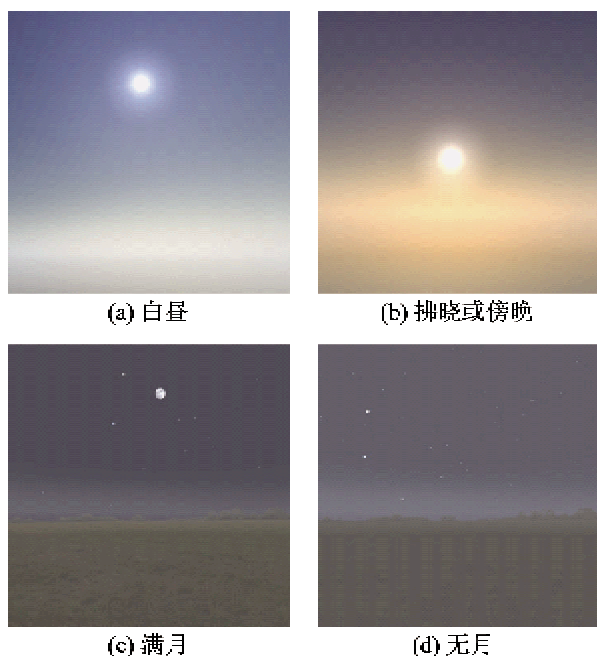


图 4 渲染结果

5 结 论

本文对真实感天空的实时渲染进行了研究,所做的主要工作包括:(1)基于分析模型建立了天空

的光照计算模型,并对夜空中特有的光源进行了分析,采用平均值计算星光等的贡献;(2)采用色调重现算法实现了天空的真实感渲染,并考虑人眼的暗视现象;(3)提出了基于观察窗口的天空几何模型,通过预先计算方向向量,可以大幅提高余弦计算的速度。实验结果表明,本文的方法能够对天空进行实时渲染,并取得较好的真实感。

本文仅实现了晴天天空的渲染,没有考虑阴天、云层以及存在大气污染等情况,这是下一步需要完成的工作。

参考文献

- [1] Nishita T, Sirai K, Tadamura K, et al. Display of the earth taking into account atmospheric scattering. In: Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, New York, USA, 1993. 175-182
- [2] Nishita T, Dobashi Y, Kaneda K, et al. Display method of the sky color taking into account multiple scattering. In: Proceedings of the 4th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, New York, USA, 1996. 117-132
- [3] Dobashi Y, Nishita T, Kaneda K, et al. A fast display method of sky color using basis functions. *Visualization and Computer Graphics*, 1997, 8(2): 115-127
- [4] Riley K, Ebert D, Kraus M, et al. Efficient rendering of atmospheric phenomena. In: Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering, Norrköping, Sweden, 2004. 375-386
- [5] Lintu A, Hafer J, Magnor M. Realistic solar disc rendering. In: Proceedings of the 13th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Plzen, Czech Republic, 2005. 79-86
- [6] O'Neil S. Accurate Atmospheric Scattering. *Pharr M. GPU Gems 2*. Boston: Addison-Wesley, 2005. 253-268
- [7] Bruneton E, Neyret F. Precomputed Atmospheric Scattering. *Computer Graphics Forum*, 2008, 27(4): 1079-1086
- [8] Hafer J, Magnor M, Seidel H P. Physically-based simulation of twilight phenomena. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2005, 24(4): 1353-1373
- [9] Jensen H, Premoze S, Shirley P, et al. Night rendering [Report]. Technical Report UUCS-00-016, University of Utah, Computer Science Department, 2000. 1-10
- [10] Jensen H, Durand F, Stark M, et al. A physically-based night sky model. In: Proceedings of the 20th Annual

- Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, New York, USA, 2001. 399-408
- [11] Perez R, Seals R, Michalsky J. An all-weather model for wky luminance distribution-preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 1993, 50(3): 235-245
- [12] CIE S 011/E:2003/ISO 15469:2004(E). Spatial distribution of daylight-CIE standard general sky [Standard]. Second edition, 2004
- [13] Preetham A J, Shirley P, Smits B E. A practical analytic model for daylight. In: Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, New York, USA, 1999. 91-100
- [14] Hoffman N, Preetham A J. Rendering Outdoor Light Scattering in Real Time. In: Proceedings of the Game Developer Conference, San Jose, USA, 2002. 85-89
- [15] Nielsen R S. Real Time Rendering of Atmospheric Scattering Effects for Flight Simulators: [Master dissertation]. Lyngby: Technical University of Denmark, 2003
- [16] Zotti G, Wilkie A, Purgathofer W. A critical review of the Preetham skylight model. In: Proceedings of the 15th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Plzen, Czech Republic, 2007. 23-30
- [17] Schaefer B E. To the Visual Limits. *Sky & Telescope*, 1998, 95(5): 57-60
- [18] Tumblin J, Rushmeier H. Tone reproduction for realistic images. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1993, 13(6): 42-48
- [19] Devlin K, Chalmers A, Wilkie A, et al. Star: Tone reproduction and physically based spectral rendering [Report]. State of the Art Reports, Eurographics 2002. 101-123
- [20] Larson G W, Rushmeier H, Piatko C. A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1997, 3(4): 291-306
- [21] Mellinger A. 360°x180° all-sky panorama. <http://canopus.physik.uni-potsdam.de>; University of Potsdam, 2011

Realistic sky rendering In real-time

Wang Gang*, Ji Zhenzhou*, Zhang Zexu**

(* School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(** Deep Space Exploration Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150008)

Abstract

This paper presents an effective method to render realistic sky in real-time. It is described below: Firstly, a sky light computation is achieved by using the analytic sky model, in which day and night changes are taken into account and light sources at night such as moonlight, starlight, zodiacal light and airglow are analyzed. Secondly, tone reproduction is employed to render realistic sky. The scotopic phenomenon is simulated to further get the night rendering realistic. Finally, the viewport-based sky geometry model and the rendering method for galaxy and stars are presented. The real-time rendering for the above algorithms was achieved by a graphics processing unit (GPU). The proposed method is suitable for rendering of outdoor scenery, which has been applied to a helicopter flight simulator successfully.

Key words: sky model, tone reproduction, geometry model, real-time rendering