

大气效果绘制的若干问题研究

吴春明, 钱 徽, 朱淼良

(浙江大学计算机科学与工程学系, 浙江杭州 310027)

摘 要: 大气退化作为户外场景的一个标志成为计算机视觉和计算机图形学领域研究的一个热点和难点. 本文对天空模型、色彩的光谱表达和大气退化效果绘制等几个主要问题进行了探讨. 天空模型的选取是大气效果绘制的一个重要问题. 本文给出了几种典型的天空模型, 包括: 测量模型, 解析模型和直接计算模型; 本文还讨论了色彩的光谱表达和转换问题, 介绍了具体的转换方法. 本文最后提出了一个使用上述天空模型和色彩表达方法的扩展路径跟踪方法, 用以对大气效果进行绘制. 在实验部分, 本文给出了基于解析模型的天空和大气介质存在的场景的绘制效果.

关键词: 天空模型; 光谱绘制; 大气效果; 路径跟踪

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2005)08-1403-04

Some Problems about Rendering Atmospheric Effect

WU Chur ming, QIAN Hui, ZHU Miao liang

(Computer Science department of Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: As an important phenomenon of outdoor scene, atmospheric degradation was paid increasingly attention in the field of both computer vision and computer graphics. This paper discusses the conversion between the color triple and the spectrum, the sky model, and the rendering method of atmospheric effect. Building on an extended path tracer, this paper describes an integrated rendering framework of atmospheric degradation. Also in the experiment part, this paper puts forward the rendering results of sky and the foggy outdoor scene.

Key words: sky model; spectrum based rendering; atmospheric effect; path tracing

1 引言

大气介质的存在作为户外场景的一个标志成为计算机视觉领域和计算机图形学领域的一个研究热点和难点. 这项研究的意义首先体现在它对发展大气计算可视化具有深刻的意义. 其次, 对于各种虚拟实验平台, 它也有非常广泛的用途和技术价值. 大气退化研究帮助人们更广泛研究人与环境之间的关系, 帮助人们评估一定物理条件下的环境现象, 帮助人们进行逼真的虚拟训练. 这项研究也为基于计算机的娱乐和艺术带来新的视觉冲击.

本文的目的是构建一个随机的全局光照求解方法, 并对几个关键技术进行详细地讨论. 这些关键技术包括: (1) 天空模型; (2) 色彩三元到光谱表达的转换; (3) 大气效果的绘制方法.

2 天空模型和天空绘制

天空光照本质上说并不是一个直接的光源. 众所周知, 太阳是天空中的最主要的能量源. 由于地球大气的存在, 太阳辐射的能量不仅仅发生了量值的改变, 也发生了分布的改变. 正是由于散射大气介质的散射存在, 使得天空成了一个间接的光源. 因此白昼光可分为两个部分: 来自太阳的直接

光照和散射产生的天空光照.

天空光照计算是比较复杂, 可以分为三种计算模型: 测量模型, 解析模型和直接计算模型. 其中, 直接计算模型的特点是完全使用基于物理散射计算, 它首先需要对大气分层的完全知识, 其次由于散射模型的复杂性, 需要大量的计算开销. 因此, 虽然这个模型能将包括云雾等大气状况完全纳入计算框架, 但是, 除了那些专门绘制星球大气的绘制系统, 较少有绘制系统使用这样的模型. 测量模型的原理是直接对天空的辐射强度进行测量, 然后用测量得到的数据来恢复整个天空的光照. 显然, 这个方法需要测量数据, 也是一般的绘制系统不可能达到的. 解析模型来源于测量数据, 将测量数据用一个函数来模拟. 这个模型是使用最广泛的天空模型. 本节将重点探讨这个模型在绘制系统中的应用.

在大气光学领域, 还存在大量的天空光照的解析模型, 如 Harrison 模型, BRE 平均天空模型和 Nakamura 介质天空模型. Harrison 天空模型包含了两个光照分布: 晴朗和多云的情况^[4]. BRE 平均天空模型假定了一个平均的散射背景和直接的太阳光照, 这个模型来源于对东南英格兰的天空测量数据, 并且可以被用在室内的白昼光的计算^[5]. Nakamura 介质天空模型也是来源于大量的测量数据, 相对来说是比较准确的, 但是由于测量数据的地域性, 这个模型只能在世界的一部分地

收稿日期: 2004-12-14; 修回日期: 2005-05-06

基金项目: 国防科技预研跨行业基金(No. 98J4.6.1. JW0405)

区使用^[6].

Preeham 讨论了一个全气候的天空光照模型^[7], Perez 天空模型, 如式(1)所示. 这个模型是一个五参数模型. A, B, C, D 和 E 是五个日射参数. 这五个参数表示了不同的物理意义. 参数 A 决定了地平线的变暗 (> 0) 和变亮 (< 0), 从天顶到地平线的亮度变化梯度和这个参数成比例. 参数 B 决定了接近地平线的光照的梯度, 这个负值越大, 受到参数 E 影响的区域越大. 参数 C 决定了太阳方向附近区域的相对强度. 参数 D 决定了太阳方向附近区域的宽度, 这个负值越大, 参数 C 能影响的范围也越大. 参数 E 决定反向的散射强度.

$$L(\theta, \gamma) = L_Z \frac{(1 + A e^{-B \sec \theta}) \cdot (1 + C e^{D \gamma} + E \cos^2 \gamma)}{(1 + A e^B) \cdot (1 + C e^{D \theta_s} + E \cos^2 \theta_s)} \quad (1)$$

这个模型是一个全气候模型, CIE 的天空模型可以通过对五参数的不同取值来获得. 当 $A = -1, B = -0.32, C = 10, D = -3, E = 0.45$ 时, Perez 天空模型等价与 CIE 标准晴朗天空模型. Perez 详细讨论了如何对五参数进行取值^[8]. Perez 天空模型的一般计算步骤如下:

- step0: 选定日射参数, 天顶光照强度的 X, Y, Z 分量;
- step1: 选取一个方向;
- step2: 代入式(1)计算该点的 XYZ 色彩值;
- step3: 存贮计算结果;
- step4: 如果是最后一个方向, 进入 step5, 否则进入 step1;
- step5: 作 Tone Map;
- step6: 作 Gamma 矫正;

3 色彩三元到光谱表达的转换

大气介质的散射和吸收是与波长相关的, 使用基于光谱的绘制技术能最方便地完成各种和波长相关的计算. 其次, 色彩三元组并不表达光的真实的物理特性, 色彩三元组也不能用来表示一个反射系数, 或者一种物体的材料的光特性. 以光谱形式表达的光 L 和同样以光谱形式表达的反射系数 R 产生的色彩三元组如式(2)所示.

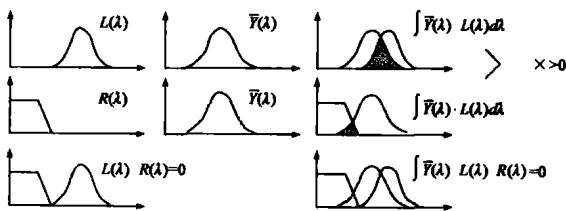


图 1 两种计算方法得到的不同结果

而传统的图形学方法, 采用色彩三元组来表示这个过程, 如式(3)所示. 如果这个反射系数只是对光的部分频率响应, 而光源发出的光恰好在响应区域之外, 问题就有可能发生. 以图 1 为例. 如果按照式(2)的方法计算光照射在材料上得到的 Y 值, 我们会得到一个为 0 的值. 但是按照传统的色彩三元组的处理方法, 如式(3)所示, 将得到一个大于 0 的值.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \bar{X}(\lambda) \\ \bar{Y}(\lambda) \\ \bar{Z}(\lambda) \end{bmatrix} \cdot R(\lambda) \cdot L(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \left[\int \begin{bmatrix} \bar{X}(\lambda) \\ \bar{Y}(\lambda) \\ \bar{Z}(\lambda) \end{bmatrix} \cdot L(\lambda) d\lambda \right] \times \left[\int \begin{bmatrix} \bar{X}(\lambda) \\ \bar{Y}(\lambda) \\ \bar{Z}(\lambda) \end{bmatrix} \cdot R(\lambda) d\lambda \right] \quad (3)$$

问题的原因在于色彩三元组不能用来表达一个物体的材料的反射特性. 假定一个色彩 m 元组的分量 b 可以从光谱 S 中得到, 如式(4)所示. 可以用式(5)来恢复光谱. 因此如果希望得到表达为色彩 m 元组的光照射到材料上得到一个表达为色彩 n 元组的光, 可以用式(6)计算. 其中反射系数如式(7)表达, 显然这不是一个色彩 n 元组, 也不是一个色彩 m 元组, 而是一个矩阵. 整个光照过程也可以用矩阵乘法来表示, 如式(8)所示.

$$b_i = \int B_i(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda, \quad i = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$S(\lambda) = \sum_{i=1}^m b_i \cdot B_i(\lambda) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} c_j &= \int C_j(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda \\ &= \int C_j(\lambda) \cdot \left[\sum_{i=1}^m b_i \cdot B_i(\lambda) \right] \cdot R(\lambda) d\lambda \\ &= \sum_{i=1}^m b_i \cdot \int C_j(\lambda) \cdot (B_i(\lambda)) \cdot R(\lambda) d\lambda \\ &= \sum_{i=1}^m b_i \cdot r_{i,j}, \quad j = 1 \dots n \end{aligned} \quad (6)$$

$$r_{ij} = \int C_j(\lambda) \cdot B_i(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda, \quad i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ M \\ \dots \\ c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & O & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & O & \dots \\ M & \dots & M & \dots \\ \dots & \dots & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

从色彩三元组到光谱的转换可以表达为式(9), 其中, A 是由色彩匹配曲线的采样构成的矩阵. 式(9)是一个变量数目远远大于方程数目的方程组. 给定一个色彩三元组, 可以从这个方程组中得到多个解. 这些解称为条件等色 (metamer), 指光谱结构不同而看上去完全相同的颜色. 因此, 如何从这些条件等色中选取适合的颜色是色彩三元组到光谱转化的关键问题.

$$A \times S = c \quad (9)$$

Smits 认为对于一个对象的材料反射属性基本上是平滑的^[1]. 他认为以前的方法没有考虑到反射的属性. 一个方法是用 RGB 三个分量的光谱分布组合成光谱, 这个方法的问题在于可能是某些波长上的反射系数大于 1. 并且, 白色的表示不是一个常量, 可能有很多种变化^[2]. 另一种可用的方法也是基于 RGB 分量的, 用三个基于 RGB 分量的光谱分布的平滑的函数来组合出光谱分布. 这个方法的问题在于, 可能在光谱上产生负的区域^[2,3].

4 大气介质的绘制方法

对场景中的物体来说, 光源是光分布的实际能量提供者. 但是, 当计算某一表面的入射辐射度时, 仅考虑直接来自光源的贡献是不完整的. 因为入射辐射度包含两个部分:

- (1) 光源的直接贡献;
- (2) 场景中其他非光源物体的贡献;

尽管光源的直接贡献是入射辐射强度中的一个非常有意义的部分, 还是应该将场景中其他物体的贡献包含进入射光, 而不是仅仅用一个环境光来表示.

这些场景中其他非光源物体称为间接发光体. 理论上, 可以使用这些间接发光体的 BRDF 来对所有贡献求和. 作为 BRDF 的输入, 间接发光体上的点所出射的光本身也是分布在半球的面上所有方向的射入光出射产生, 其自身潜在的也是光源贡献和间接发光体贡献的组合. 因此, Kajiya 引入了一个无限的递归积分方程, 如式 (10) 所示, 称为绘制方程^[9].

$$L(x, \Theta_x) = L_e(x, \Theta_x) + \int_{\Omega_x} L(y, \Theta_y) f_r(x, \Theta_y, \Theta_x) | \Theta_y \cdot N_x | dv_y \quad (10)$$

其中 $L(x, \Theta_x)$ 是来自点 x 的方向的辐射强度, 换句话说, 假如 x 是空间中的我们看到的某个点, 这样, 这个方程表达了从这个点在视点方向上来的辐射强度, 也就是我们想计算的辐射强度. $L_e(x, \Theta_x)$ 是在点 x 方向发射的表面辐射强度. 假如讨论的表面不是一个发光体, 这个值是零. 方程的积分部分表现了二次发光体的辐射强度贡献. 这是一个在 x 点的半球的所有方向的积分, 记作 Ω_x . 这个部分表现了所有可能的射入方向, 对于所有的需要计算点, 最终的辐射强度是它们的总和. 使用表面的 BRDF 来计算在 Θ_x 方向上的射出辐射强度. 为了计算来自 y , 沿着 Θ_y 方向的输入辐射强度, 需要解一个和以上的积分方程同样的积分方程, 这样, 整个过程是递归的.

绘制方程是一个第二类的 Fredholm 积分. 可以用 Monte Carlo 方法来解决. 经典的对绘制方程的求解方法是 Path Tracing. 在实际工作中, 纯粹的 Path Tracing 的计算需求很高. 大多数实际的 Path Tracing 使用了下一事件估计和, 重要采样的原理. 在绘制过程中, 重要采样的目的是使那些对积分具有更大影响的方向更多地被采样. Lafortune 对此有很深入的讨论^[10].

实际上描述大气介质和光交互的辐射传输方程已经包含了式 (10) 表达的意义. 因此, 如果将整个场景的介质离散成小的体元, 存在大气介质的场景中的绘制过程可以用式 (11) 来表示计算的路径构成.

$$\langle L(x, \Theta_x) \rangle_{\text{path}} = \sum_{i=0}^{\infty} \left[\prod_{j=0}^i \bar{K}(j) \right] L_e(\xi_i, \Theta_{x_i}) \quad (11)$$

其中:

$$\bar{K}(j) = \begin{cases} \tau(x_{j-1}, x_j) \frac{f_r(x_{j-1}, \Theta_j, \Theta_{j-1}) | \Theta_j \cdot N_{j-1} |}{p_j(\xi_j)}, & \text{event = surface-reflecting, } j \neq 0 \\ \tau(x_{j-1}, x_j) \frac{\Omega(x_j) p(w_{j-1}, w_j)}{4\pi \cdot p_j(\xi_j)}, & \text{event = volume-scattering, } j \neq 0 \\ 1, & j = 0 \end{cases}$$

实际上, 存在介质的路径和传统路径的差别在于增加了一种

散射事件, 不仅仅是原来的物体对象表面的各种反射.

考虑到实际计算平台的计算能力限制, 我们可以限制大气介质散射的层数, 在两个反射之间最多取 N 次大气介质的散射. 这种方法在实践中一般只适用于稀薄大气, 对于云这样的高反照率的大气, 最好的办法还是将空间离散成体元. 这样就可以直接和光线求交, 得到交点. 从而也能纳入本论文所讨论的绘制框架之中.

在大气绘制中使用 Path Tracing 具有五个优点. 首先, 存在大气介质的场景是室外场景, 由于绘制过程中将天空看作一个巨大的间接光源, 相对来说, Path Tracing 适合处理那些光源比较大的场景. 其次, 采用 Path Tracing 无须显式的对整个场景进行空间的离散. 采用 Path Tracing 不仅可以方便地处理各向同性的散射, 还可以很好地处理各向异性的散射; 使用 Path Tracing 也同样可以很方便地处理不同均匀的介质分布. 最重要的一点, 采用 Path Tracing 还可以自然地使用基于光谱的绘制方法, 虽然, 由于引入了波长, 积分公式增加了一个维度, 但是却不会增加 Monte Carlo 方法的复杂性. 最后, Monte Carlo 方法自身的特点决定了 Path Tracing 方法在求解复杂的物理空间中的部分点时, 比确定性的方法更有利.

5 实验

本节的绘制实验设计了一个小的户外场景. 其中, 色彩表达使用了第 3 节中描述的方法(式(9)). 实验系统利用平均介质散射系数概率决定是否进入大气散射事件, 如果平均介质散射系数为 0, 则相当于没有大气介质的情况. 实验还使用大气介质散射次数来规定计算大气散射的次数. 如果, 只考虑两次以下的大气介质散射, 可以将大气散射次数设置为 2. 这样做的原因是考虑到两个因素. 首先, 大多数的计算平台的计算能力有限. 其次, 对于一般的大气退化, 两次散射已经足够了. 图 6 是一个有雾的场景绘制.

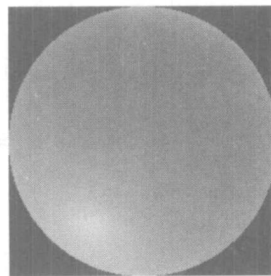


图 2 一个浊度为 2.5 的 Perez 天空

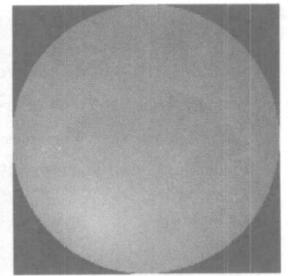


图 3 一个浊度为 9.0 的 Perez 天空

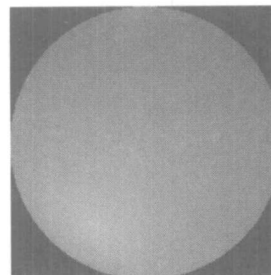


图 4 一个浊度为 11.0 的 Perez 天空

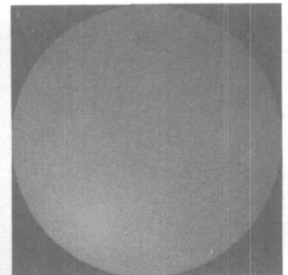


图 5 一个浊度为 12.0 的 Perez 天空

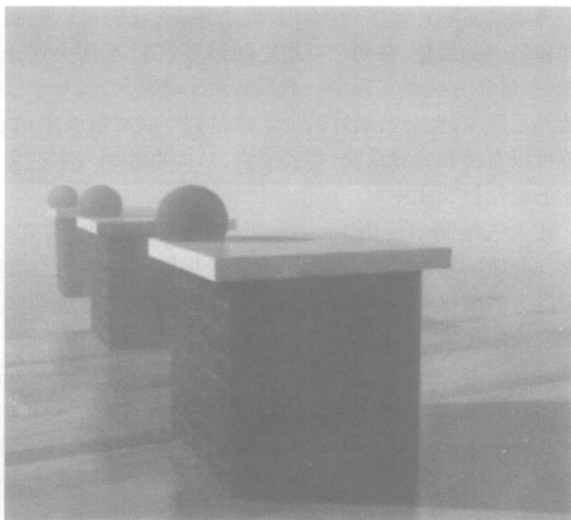


图 6 Path Tracer产生的有天空光照的有雾场景的图像

本节的实验使用第 2 节描述的算法, 展示一个 Perez 天空的绘制结果. 本实验将一个天穹映射到一个圆上. 该图的几何意义可以解释为当仰视天空, 头朝向南方, 视线的方向指向天顶时得到的天空图景. 实验结果如图 2~ 5.

6 总结

本文主要讨论了天空的绘制问题, 介绍了各种天空的解析模型. 色彩三元组和光谱之间的转化问题也在本文中进行了讨论. 本文的另一个重点是讨论大气介质存在条件下的绘制, 提出了一个完整的绘制框架. 实验给出了一个实现 Perez 天空的实验, 显示了不同浊度下的天空的景象, 给出了大气介质存在的场景的绘制效果.

参考文献:

- [1] Smits B. An RGB to spectrum conversion for reflectances [J]. Journal of Graphics Tools, 1999, 4(4): 11- 22.
- [2] Andrew S Glassner, Principles of Digital Image Synthesis [M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1995.

- [3] Sun Y, Fracchia F D, Calvert T W, Drew M S. Deriving spectra from colors and rendering light interference [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1999, 19(4): 61- 67.
- [4] Harrison A. Directional luminance versus cloud cover and solar position [J]. Solar Energy, 1991, 46(1): 13- 20.
- [5] L'at lefair P. The Luminance distribution of an average sky [J]. Lighting Research and Technology, 1981, 13(4): 192- 198.
- [6] Nakamura H, Oki M, Iwata T. Mathematical description of the intermediate sky [J]. 21st CIE Session Proceedings, Venice [C]. La Scientifica, 1987. 230- 31.
- [7] Preetham A J, Shirley P, Smits B. A practical analytic model for daylight [A]. ACM SIGGRAPH' 99 Proceedings [C]. Los Angeles, CA, 1999. 91- 100.
- [8] Perez R, Seals R, Michalsky J, Ineichen P. An all weather model for sky luminance distribution [J]. Solar Energy, 1993, 44: 271- 289.
- [9] Kajiyama J T. The rendering equation [J]. Computer Graphics, 1986, 20(4): 143- 150.
- [10] Lafortune E P, Willems Y. Rendering participating media with bidirectional path tracing [A]. 6th EUROGRAPHICS Workshop on Rendering [C]. New York, NY: Springer Verlag, 1996. 91- 100.

作者简介:



吴春明 男, 1967 年出生于浙江萧山, 博士, 浙江大学计算机学院副教授. 主要从事人工智能、智能机器人技术及计算机网络等领域方向的科学研究工作. E-mail: wuchunming@cs.zju.edu.cn.



钱 徽 男, 1974 年出生于浙江金华, 2002 年获浙江大学计算机学院博士学位, 现为浙江大学计算机学院讲师, 主要研究方向为智能机器人、图像处理.