

一个绘制大气介质效果的软件框架

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研究的一个热点和难点. 本文的主要目的就是从事辐射传输理论入手研究大气效果的图形学仿真技术. 基于一个扩展的 Path Tracer, 本文描述了一个完整的大气效果绘制的绘制框架. 这个基于光谱的绘制系统将随机行走从空间扩展到光谱, 可以处理介质参与的场景绘制, 并引入了解析的天空模型. 本文的最后描述了绘制实验系统.

关键词: 软件框架; 大气效果; 真实感绘制; 路径跟踪

中图分类号: TP391. 41 **文献标识码:** A **文章编号:** 03722112 (2004) 05073205

A Software Framework for Rendering Atmospheric Effect

WU Chunming, QIAN Hui, ZHU Miaoliang

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

Abstract: As an important phenomenon of outdoor scene, atmospheric degradation was paid increasing attention in the field of both computer vision and computer graphics. Based on the theory of Radiative Transfer, the paper is to explore the techniques of computer graphics relating to this phenomenon. Building on an extended path tracer, it describes an integrated rendering framework of atmospheric degradation, which makes the ray walk randomly both through the space of scene but the domain of spectrum. Also it introduces an analytic model of sky and the detail of implementation is described.

Key words: software framework; atmospheric effect; photorealistic rendering; path tracing

1 引言

自然光和大气成分的交互作用是真实感图形学要表现的一个重要的现象. 表现这种自然现象的技术被称为大气效果的绘制技术. 对大气效果绘制技术的发展历史, 常见的天空和太阳的模型, 和多种绘制方法的综述可以在文献[1]中找到.

大气效果的绘制技术包括以下两个方面: (1) 对不同大气条件下的天空和太阳的建模和绘制技术; 其实质是对不同大气条件下的户外光源的建模和绘制; 在一些特别的情况下, 光源的定义范围应该扩大到月亮、其他星体和户外的其他人工光源. (2) 不同大气条件对光传输产生影响的模型, 以及对不同大气条件下的户外场景中一般物体的绘制技术; 这里的光传输包括光源和户外场景物体之间, 以及各户外场景物体之间的光传输. 大气效果的绘制技术有非常广泛的应用领域, 主要有以下几类: (a) 虚拟战场技术等军事应用领域; (b) 飞行训练等驾驶训练中的仿真系统; (c) 建筑设计和环境的评估系统; (d) 照明设计; (e) 工业污染预测; (f) 商业娱乐系统.

因此一个表现大气存在的户外场景的绘制框架应该包含如图1所示的各相互关联的要素.

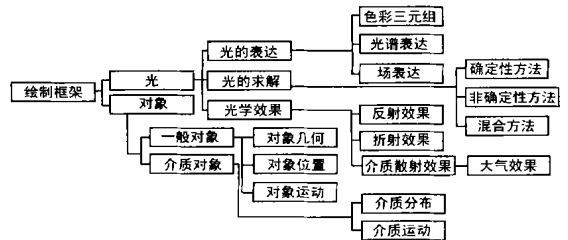


图1 一个绘制大气介质效果的软件框架

2 适合大气介质的光表达

Sun 将计算机图形学的绘制技术按照光的表达方法不同分成以下三种: (1) 基于场的绘制; (2) 基于色彩的绘制; (3) 基于光谱的绘制^[2]. 这种划分方法体现了不同的图形学绘制技术对光的表达方法. 基于场的绘制方法的理论基础是电磁场理论. 因为对计算需求大并且存在本质上的求解困难, 基于场的绘制方法很少能真正应用到复杂场景的真实感绘制中^[3]. 一些文献探讨了场的数值计算^[4,5]. 基于色彩的方法是使用最广泛的方法. 一个最好的例子就是光的 RGB 色彩表达. 由

于三个色彩分量并不真正代表一个物体的物理的反射情况, 基于色彩的绘制方法并不适用于追求物理正确的绘制. 基于光谱的绘制方法将光表达为具有某种频率的光线, 将不同频率的光的反射系数表达成波长的函数基本可以适用于各种更复杂的光照模型, 模拟不同的材质. 因为, 大气介质的散射和吸收是波长相关的, 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. 基于光谱的绘制的基本问题是如何表达光谱^[6~13]. 最简单的表达方法是点采样. 另一种使用的比较广泛的方法是将光谱表达为一组基函数的线性和.

3 大气介质条件下的光效果

人们通过视觉系统所看到的自然景物是景物表面的反射光在三维空间分布的结果. 对于自然景物必须考虑光线经过大气层所产生的影响. 一般来说, 大气粒子和光的交互可分为两个方面: 一方面, 粒子可以再辐射已经接受的能量(再辐射可以在所有方向上发生, 但通常在不同的方向上其辐射强度不同), 这个过程称为散射. 另一方面, 辐射能可以转变成其他形式的能量, 如热能、化学反应能或不同波长的辐射, 这些过程成为吸收. 众所周知, 可见光是一种电磁波, 波长约为 0.5 微米. 根据经典理论, 对于比波长小得多的粒子, 光和粒子的交互遵从 Rayleigh 散射定律. 但对于水汽粒子较为浓密的大气, 应该遵从 Mie 散射定律.

在所有前人的研究工作中, Perez 给出的辐射传输方程的基本形式最清晰^[14], 如式(1)~(5)所示. 式(1)~(5)给出的辐射强度的微分表达式. 其中 $k_t(x)$ 称为消光系数; $k_a(x)$ 称为吸收系数; $k_s(x)$ 称为散射系数; 式(1)很容易得出: 光的消减是由吸收和散射组成的. $g(x)$ 称为散射反照率, 是散射系数和总消光系数的比. $p(w_0, w_1)$ 是相函数, 表明特定入射方向 w_0 的光和特定出射方向 w_1 的光之间的比率关系. 入射或者其他转化增加的辐射强度用大写字母 J 表示, 出射辐射强度用大写字母 L 表示, 如果参数中没有方向参数, 则缺省为 w_0 方向. $J(x)$ 包含两个部分, 其中 $J_e(x)$ 是粒子自身的发射辐射强度 $L_e(x)$ 的贡献, 还有来自其他粒子的入射辐射强度共同的辐射贡献. 从式(1)~(5)可以看出, 光和粒子交互后强度有一个增量和一个减量. 增量包括粒子自发光和其他粒子的散射能量. 减量包括散射出去的和被吸收转化为其他能量形式的量.

$$\frac{dL(x)}{dx} = k_t(x)J(x) - k_t(x)L(x) \quad (1)$$

$$J(x) = J_e(x) + \frac{g(x)}{4P} \int Q L(x, w_i) p(w_0, w_i) dw_i \quad (2)$$

$$J_e(x) = (1 - g(x))L_e(x) \quad (3)$$

$$k_t = k_a + k_s \quad (4)$$

$$g(x) = k_s(x) / k_t(x) \quad (5)$$

对 $L(x)$ 解的形式如式(6)和式(7)所示. 其中 $S(x_0, x)$ 称为从 x 点到 x_0 点的传输系数, 也可以将表示两个端点的参数写成表示距离参数形式 $S(r)$, 其中 r 景物或光路最远点到视点的距离. 将式(6)分成减少的入射光强部分和介质产生的光强两个部分, 分别如式(8)和(9)所示. 这样, 根据式(2)和式

(6)可以得到式(10), 这个式子表达了场景中发出光的分布. 其中, $L_{ri}(x)$ 是背景辐射贡献, $L_m(x)$ 是介质的辐射贡献. 因此很明显, 在 x 点, 所有入射光贡献包含三个部分: (1) 自发光; (2) 来自背景物体的光; (3) 介质散射带来的光.

$$L(x) = S(x_0, x)L(x_0) + \int_{x_0}^x S(u, x) k_t(u) J(u) du \quad (6)$$

$$S(x_0, x) = e^{-\int_{x_0}^x k_t(u) du} \quad (7)$$

$$L_{ri}(x) = S(x_0, x)L(x_0) \quad (8)$$

$$L_m(x) = \int_{x_0}^x S(u, x) k_t(u) J(u) du \quad (9)$$

$$J(x) = J_e(x) + \frac{g(x)}{4P} \int Q L_{ri}(x, w_i) p(w_0, w_i) dw_i + \frac{g(x)}{4P} \int Q L_m(x, w_i) p(w_0, w_i) dw_i \quad (10)$$

式(6)可以得到一个求取出射辐射度的算子形式, 如式(11). 因此, 在解这个辐射传输方程的时候, 可以分别解决背景辐射强度经过介质后衰减部分和各种辐射传输路径上的辐射强度增量.

$$L = SL_0 + T \# J \quad (11)$$

展开式(6)可以得到式(12). 在本文考虑的背景下, 可见光范围内, 空气中被激发离解的原子以及分子的发射, 与太阳的辐射相比, 一般是比较少的, 可以忽略气体介质自身的辐射效果. 因此可得式(13).

$$L(x) = S(x_0, x)L(x_0) + \int_{x_0}^x S(u, x) k_t(u) \# \left[J_e(u) + \frac{g(u)}{4P} \int Q L_{ri}(u, w_i) p(w_0, w_i) dw_i + \frac{g(u)}{4P} \int Q L_m(u, w_i) p(w_0, w_i) dw_i \right] du \quad (12)$$

$$\begin{aligned} L(x) &= S(x_0, x)L(x_0) + \int_{x_0}^x S(u, x) k_t(u) \# \left[\frac{g(u)}{4P} \int Q L_{ri}(u, w_i) p(w_0, w_i) dw_i + \frac{g(u)}{4P} \int Q L_m(u, w_i) p(w_0, w_i) dw_i \right] du \\ &= S(x_0, x)L(x_0) + \int_{x_0}^x S(u, x) k_t(u) \# \left[\frac{g(u)}{4P} \int Q [L_{ri}(u, w_i) + L_m(u, w_i)] p(w_0, w_i) dw_i \right] du \\ &= S(x_0, x)L(x_0) + \int_{x_0}^x S(u, x) \# \left[\frac{k_s(u)}{4P} \int Q [L_c(u, w_i)] p(w_0, w_i) dw_i \right] du \\ &= S(x_0, x)L(x_0) + \int_{x_0}^x S(u, x) J_c(u) du \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $L_c(u, w_i) = L_{ri}(u, w_i) + L_m(u, w_i)$, $J_c(u)$

$$= \frac{k_s(u)}{4P} \int Q [L_c(u, w_i)] p(w_0, w_i) dw_i.$$

在可见光范围内, 对于黑烟, 光衰减主要以吸收为主, 而对于水汽为主的大气微粒, 则主要受散射制约. 因此, 可以将式(7)改写为式(14). 如果, 大气中有 n 种不同的介质, 则可得

式(15).

$$S(x_0, x) = e^{-\int_{x_0}^x k_s(u) du} \quad (14)$$

$$S(x_0, x) = e^{-\int_{x_0}^x [k_{\neq 0}(u) + k_{\neq 1}(u) + k_{\neq n}(u)] du} \quad (15)$$

4 使用扩展的 Path Tracing 的光求解

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.因此,Kajiya 引入了一个无限的递归积分方程,如式(16)所示,称为绘制方程^[15].

$$L(x, \omega_x) = L_e(x, \omega_x) + \int_{\Omega_x} Q(y, \omega_y) f_r(x, \omega_y, \omega_x) |(\omega_y \cdot N_x)| d\omega_y \quad (16)$$

其中 $L(x, \omega_x)$ 是来自点 x 的 ω_x 方向的辐射强度,换句话说,假如 x 是空间中的看到的某个点,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. $L_e(x, \omega_x)$ 是在点 x 的 ω_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 ω_x 方向上的射出辐射强度.为了计算来自 y ,沿着 ω_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.

考察绘制方程,从一个面元上出射的光强包括这个面元的自发光和射入到这个面元上的光的反射.一般的辐射传输方程的出射形式,也可以用大致的形式来解释,如式(10)所示.如果将 x 理解为点,那么这个式子可以理解为:从一个点出射的光等于这个点的自反射光强,其他的点射入到这个体元后的散射光,和其他的背景光射入到这个体元后的散射光.实际上辐射传输方程已经包含了式(16)表达的意义.

绘制方程是一个第二类的 Fredholm 积分.可以用 Monte Carlo 方法来解决,经典的求解方法为 Path Tracing.绘制过程采用下一事件估计和重要采样来减少计算量.Lafortune 对此有很深入的讨论^[16].根据 Path Tracing 方法,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(17)来表示计算的路径构成.

$$3 L(x, \omega_x)_{path} = \int_{i=0}^1 \left[\int_{j=0}^i K(j) \right] L_e(E_i, \omega_{\neq i}) \quad (17)$$

其中:

$$K(j) = \begin{cases} S(x_{j-1}, x_j) \frac{f_r(x_{j-1}, \omega_{j-1}, \omega_j) |(\omega_{j-1} \cdot N_{j-1})|}{P_j(E_j)}, & \text{event = surface-reflecting} \\ S(x_{j-1}, x_j) \frac{8(x_j) p(\omega_{j-1}, \omega_j)}{4 P_j P_j(E_j)}, & \text{event = volume-scattering} \\ 1, & j = 0 \end{cases}$$

实际上,存在大气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.散射事件和一般的反射事件并不相同.本文中,因为空间并没有显式地离散化为体元.因此,光线不可能获得体元的交点.因此,在计算物体表面的反射事件之前,须要根据散射系数来确定散射事件的发生.如果有散射事件发生,从起点开始,确定光线方向上的一个随机点作为光线的交点.随机找到一个新的方向,射出新的光线,递归的求取光的强度,根据求得的光强,首先计算散射的量值,然后计算从交点到起点的消光量值.

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求取 N 次大气介质的散射,如图 2 所示,其中 $N=2$.

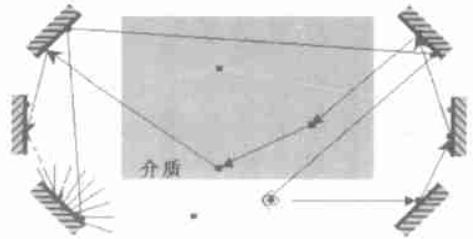


图 2 介质存在的 Path Tracing 的示意图

这种方法在实践中一般只适用于那些散射性质的稀薄大气,对于云这样的高反照率的大气,最好的办法还是显示地将空间离散成体元.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.

当须要将光谱计算引入整个计算框架时,路径的构造也不会发生本质的变化.变化之处在于,对体元进行重要采样要根据散射的性质作出变化.另外一个变化是,最终的表达式多了一重对色彩三元组的积分.绘制方程的波长形式如式(18)所示.最终的计算表达式为式(19).

$$L(x, \omega_x) = L_e(x, \omega_x) + \int_{\Omega_x} Q(y, \omega_y) f_r(x, \omega_y, \omega_x) |(\omega_y \cdot N_x)| d\omega_y \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_K^X(K) \left[L_e(x, \omega_x) + \int_{\Omega_x} Q(y, \omega_y) f_r(x, \omega_y, \omega_x) |(\omega_y \cdot N_x)| d\omega_y \right] dK \\ k_K^Y(K) \left[L_e(x, \omega_x) + \int_{\Omega_x} Q(y, \omega_y) f_r(x, \omega_y, \omega_x) |(\omega_y \cdot N_x)| d\omega_y \right] dK \\ k_K^Z(K) \left[L_e(x, \omega_x) + \int_{\Omega_x} Q(y, \omega_y) f_r(x, \omega_y, \omega_x) |(\omega_y \cdot N_x)| d\omega_y \right] dK \end{bmatrix} \quad (19)$$

因此,介质参与的场景对积分的主估计子如式(20)所示.因此这个路径不仅是对散射空间的方向采样的结果,也是对光谱分布的采样结果.

$$\begin{aligned} \left\{ \begin{array}{l} X \\ Y \\ Z \end{array} \right\}_{\text{path}} &= k \# \begin{bmatrix} \overline{x_k} L_k(x, (x)4_{\text{path}}) \\ p(x_k) \\ \overline{y_k} L_k(x, (x)4_{\text{path}}) \\ p(y_k) \\ \overline{z_k} L_k(x, (x)4_{\text{path}}) \\ p(z_k) \end{bmatrix} \\ &= k \# \begin{bmatrix} \frac{\overline{x_k} \sum_{i=0}^l \left[\prod_{j=0}^i K(j) \right] L_{e\#k}(E_i, (x\#i))}{p(x_k)} \\ \frac{\overline{y_k} \sum_{i=0}^l \left[\prod_{j=0}^i K(j) \right] L_{e\#k}(E_i, (x\#i))}{p(x_k)} \\ \frac{\overline{z_k} \sum_{i=0}^l \left[\prod_{j=0}^i K(j) \right] L_{e\#k}(E_i, (x\#i))}{p(x_k)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

5 天空的表达

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。解析模型有两个优点:(1)存储的数据少,只需要存储解析表达式的参数;(2)计算简单。相对与直接计算模型,解析模型的计算开销是很小的;许多图形学研究都使用了解析模型^[17, 18]。一些著名的绘制软件,如 *Radiance*, 提供了使用解析模型的方便方法。本文描述的软件框架采用和 *Precham* 相同的 *Perez* 天空模型^[9]来完成天空光照计算。更多的文献可以从 *Roy* 等人的关于天空光谱应用的报告中得到^[20]。

6 实验

本文实验工作建立在一个 *Ray/Path Tracing* 绘制实验系统之上。这个系统分为六个模块:绘制器模块,天空模块,场景对象模块,色彩和光谱模块,数学模块和图像模块。绘制器模块主要处理对场景的绘制,提供一个大气环境下的场景的绘制引擎。绘制器模块的功能包括了对相机模型的处理, *Ray Tracing*, 作下一事件预测的 *Path Tracing*, 处理介质的 *Path Tracing*。天空模块主要处理绘制场景中需要的天空光强。该模块的功能包括天空光强的计算,光强采样数据存储,特定方向的天天空光强数据重构。场景对象模块主要处理场景中非介质对象的几何造型和光线交互。该模块提供了几种简单的几何对



图3 Path Tracer 产生的三个平台的有雾场景的图像

象,包括三角面,球体,平面, *Height Field*。色彩和光谱模块主要处理各种色彩三元组之间的变换和色彩三元组和光谱采样之间的变换。数学模块主要处理相关的数学运算,包括矩阵运算,简单的向量运算,随机数生成。图像模块主要用来存储和显示计算结果,还包括 *Tone map*, *Gamma* 校正等图像运算。

实验设计了一个小的户外场景。有天空,一个地平面,一个有木纹纹理的地板,一组平台。图3展示了该场景的绘制。

7 总结

大气环境最显著的特征是介质的存在。因此,绘制系统必须处理大气介质和光的交互。本文首先概要讨论了在大气环境下的绘制的意义和主要要素,然后从光的表达,光的效果,光的求解三个角度讨论了绘制大气介质的软件框架。并介绍了天空模型。本文的实验展示了场景的绘制。

参考文献:

- [1] 钱徽,朱森良. 大气效果的绘制技术综述[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2002, 14(5): 1- 8.
- [2] 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.
- [3] Glassner A S. Principles of Digital Image Synthesis[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1995.
- [4] Bahar E. Review of the full wave solutions for rough surface scattering and depolarization: comparisons with geometric and physical optics, perturbation, and two scale hybrid solutions[J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92(C5): 5209- 5224.
- [5] Steele C W. Numerical Computation of Electric and Magnetic Fields [M]. New York: Chapman & Hall, 1997.
- [6] Cook L R, Torrance K E. A reflection model for computer graphics[J]. ACM Transactions on Graphics, 1982, 1(1): 7- 24.
- [7] Hall R A, Greenberg D P. A testbed for realistic image synthesis[J]. IEEE Computer Graphics & Appl, 1983, 13(6): 10- 20.
- [8] Roy A H. Illumination and Color in Computer Generated Imagery[M]. New York: Springer-Verlag, 1989.
- [9] Meyer G W. Wavelength selection for synthetic image generation[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing 1988, (41): 57- 79.
- [10] Geist R, Heim O, Junkins S. Color representation in virtual environments[J]. Color Res, 1996, 21(2): 121- 128.
- [11] Raso M, Fournier A. A piecewise polynomial approach to shading using spectral distributions[J]. Proceedings of Graphics Interface, 1991: 40- 46.
- [12] Peercy M S. Linear color representations in full spectral rendering[A]. Computer Graphics, James T. Kajiya, Proceedings Of SIGGRAPH 93 [C]. New York: ACM Press, 1993. 191- 198.
- [13] Peercy M S, Baum D R, Zhu B M. Linear color representations for efficient image synthesis[J]. Color Res, 1996, 21(2): 129- 137.
- [14] Perez F, Pueyo X, Sillion F X. Global illumination techniques for the simulation of participating media[A]. Julie Dorsey, Philipp Slusallek, Rendering Techniques 97. Proceedings of Eurographics Workshop [C].

St. Etienne, France: Springer, 1997. 309- 320.

- [15] Kajiyama J T. The rendering equation[J]. Computer Graphics, 1986, 20(4): 143- 150.
- [16] LaFortune E P, Willems Y. Rendering participating media with bidirectional path tracing[A]. Xavier Pueyo, Peter Schröder, Rendering Techniques. 96, Proceedings of Eurographics Workshop[C]. Porto, Portugal: Springer, 1996. 91- 100.
- [17] Dobashi Y, Kaneda K, Nakashima T, Yamashita H, Nishita T, Tadamura K. Skylight for interior lighting design[J]. Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS94), 1994, 13(3): 85- 96.
- [18] Preetham A J, Shirley P, Smit's B. A practical analytic model for daylight[A]. Alyn Rockwood, Proceedings of ACM SIGGRAPH. 99[C]. New York: ACM Press, 1999. 91- 99.
- [19] Perez R, Seals R, Michalsky J, Ineichen P. An all weather model for sky luminance distribution[J]. Solar Energy, 1993, 50: 235- 245.
- [20] Roy G G, Ruck N, Reid G, Winkelmann F C, Julian W. The Development of Modeling Strategies for Whole Sky Spectrums under Real Conditions for International Use[R]. Sydney: University of Sydney, Murdoch University, 1995.

作者简介:



吴春明 男, 1967 生于浙江萧山, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能机器人体系结构, 计算机图形学仿真技术, 人工智能, 图像处理等.
Email: wuchunming@cs.zju.edu.cn.



钱 徽 男, 1974 年生于浙江金华, 博士, 主要研究领域为计算机图形学, 计算机视觉、人工智能.

朱淼良 男, 1946 年生于浙江桐乡, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为计算机视觉、智能机器人和人工智能.