

## 雨雾天气下光线散射效果的实时绘制\*

黄雷<sup>1,2</sup>, 王章野<sup>1+</sup>, 王长波<sup>1,3</sup>, 张鑫<sup>4</sup>, 彭群生<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

<sup>2</sup>(湖南大学 计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082)

<sup>3</sup>(华东师范大学 软件学院, 上海 200062)

<sup>4</sup>(浙江大学 数学系, 浙江 杭州 310027)

### Real-Time Rendering of Ray Scattering Effect under the Conditions of Rain and Fog

HUANG Lei<sup>1,2</sup>, WANG Zhang-Ye<sup>1+</sup>, WANG Chang-Bo<sup>1,3</sup>, ZHANG Xin<sup>4</sup>, PENG Qun-Sheng<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

<sup>2</sup>(School of Computer and Communication, Hu'nan University, Changsha 410082, China)

<sup>3</sup>(Software Engineering Institute, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

<sup>4</sup>(Department of Mathematics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-571-88206681 ext 525, E-mail: zywang@cad.zju.edu.cn, <http://www.cad.zju.edu.cn/home/zywang>

**Huang L, Wang ZY, Wang CB, Zhang X, Peng QS. Real-Time rendering of ray scattering effect under the conditions of rain and fog. *Journal of Software*, 2006,17(Suppl.):126-137. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/s126.htm>**

**Abstract:** This paper proposes a model of skylight and multiple particles under rainy and foggy circumstances and implements real-time rendering of atmospheric scattering in rain and fog scenes and rainbow. In addition, by analyzing the conventional equations of single scattering of point light source, real-time rendering of scattering effect is implemented due to non-isotropic light source. Finally, realistic rain and fog scenes are rendered under different conditions in real time.

**Key words:** rain and fog scenes; real-time rendering; atmospheric scattering; non-isotropic light source

**摘要:** 提出一种适用于雨雾天气的天空光照的多粒子散射模型,实现了雨雾场景中大气散射效果及雨后彩虹的真实感绘制.同时,通过对传统点光源单散射模型公式的解析简化,实现了各向异性光源散射效果的实时绘制.最终实时绘制出多种不同条件下真实感较强的雨雾场景.

**关键词:** 雨雾场景;实时绘制;大气散射;各向异性光源

自然场景的真实感绘制历来是计算机图形学研究的热点和难点之一,而雨雾天气又是自然场景中常见的情形.在计算机游戏动画、虚拟现实、飞行驾驶训练仿真、航海训练模拟、建筑设计与环境的评估、灾难救援、照明设计、工业污染检测、影视娱乐等方面都有着非常广泛的应用价值.

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60475013, 60603076 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2002CB312101 (国家重点基础研究发展规划(973))

Received 2006-03-15; Accepted 2006-09-11

雨雾天气条件下,大气中的各种粒子(空气分子,尘埃,雾粒子,雨滴)与光线产生交互作用,产生各种各样的雨雾场景.雨后彩虹、路灯周围的光晕、聚光灯、车灯发出的光束等都是与雨雾天气相关的特有的景象,光线散射是产生这些自然景象的最根本的原因.

与晴朗天气条件不同,雨雾天气条件下的光线散射机理更加复杂.在雨雾天气下,不同的空气质量,不同的光源照射,大气散射的成因及效果也是不同的.因此,现有方法很难逼真地模拟雨雾天气条件下的光线散射效果.

在光线散射模拟方面国内外已有一些研究工作,包括自然光的散射和人工光源的散射.自然光散射模型的研究始于20世纪80年代,1987年,Klassen等人<sup>[1]</sup>提出了简单的大气散射模型和多光谱散射模型,但这种方法计算不够精确,而且只适用于特定场景的绘制.1993年,Nishita等人<sup>[2]</sup>提出了考虑大气密度变化的元球模型来绘制大气散射效果.1996年,Nishita等人<sup>[3]</sup>考虑了更为精细的多散射模型来绘制天空的颜色.2000年,Dobashi等人<sup>[4]</sup>提出了一种简单、有效的方法来绘制云粒子散射形成的云层效果.2002年,Dobashi等人<sup>[5]</sup>提出使用图形硬件的方法来实现大气散射的实时绘制.2004年,Riley等人<sup>[6]</sup>提出了近似的多散射相位函数来绘制更精致的大气散射效果.

但这些工作都是基于晴朗天气的,均采用太阳光为光源.因此,无法适用于雨雾天气的情形.1990年,Kaneda等人<sup>[7]</sup>引用Nishita等人<sup>[8]</sup>提出的天空光照模型来进行雾场景的绘制,但该方法模型过于简单,没有考虑雨雾天气中大气粒子的特性,同时该方法非常耗时.1997年,Jackel等人<sup>[9]</sup>提出了多粒子模型方法,通过分段计算来绘制天空和彩虹场景.该方法采用太阳光作为直射光源,且彩虹与天空背景的融合上显得不够真实.吴春明等人提出基于辐射传输理论<sup>[10]</sup>和源于测量数据的解析模型的方法<sup>[11]</sup>来绘制大气效果,但这些方法需要绘制系统的支持和测量数据,不能应用到雨雾天气这种复杂的天气场景中.

早期的人工光源的散射模型研究始于1987年.Nishita等人<sup>[12]</sup>提出了考虑光照强度空间分布的点光源模型来绘制聚光灯、车灯光发出的光束.1998年,Jansen等人<sup>[13]</sup>提出了光子映射的方法进行改进,但这些方法都是基于光线跟踪和扫描线的算法,需要耗费大量的计算时间,无法达到实时.2000年,Dobashi等人<sup>[14]</sup>提出硬件加速的体绘制的方法来绘制光束,从而达到交互的绘制速度.2005年,Sun等人<sup>[15]</sup>提出了新的解析的方法,用直接的公式来模拟复杂的体散射,使人工光源散射模型的实时绘制成为可能.但该方法只实现了各向同性光源(点光源)的实时绘制,不适用于各向异性光源(如车灯,聚光灯等)的散射模型.

因此,目前尚无有效的方法来解决特定的雨雾场景中光线散射的实时绘制问题.本文基于雨雾天气条件下的大气物理特性,提出一种新的雨雾条件下的多粒子散射光照模型,并绘制出真实感较强的雨后彩虹场景.同时,对于各向异性光源的散射,采用新的解析简化方法,实现了雨雾动态场景的实时绘制.

## 1 雨雾条件下的大气散射模型

不同于晴朗天气,雨雾情况下通常没有直照的太阳光,而只有间接照射的天空光.下面分别讨论雨雾天气下的天空光散射模型和雨后彩虹模型.

### 1.1 考虑天空光照的雨雾多粒子散射模型

#### 1.1.1 雨雾天的大气粒子组成及散射特性

晴朗天气下大气的主要组成是各种大气分子和很微小的尘埃微粒,当光线与大气分子发生交互时,主要呈现Rayleigh散射的特性.

而在下雨天气,雨滴粒子的大小分布一般在0.1mm~3.5mm之间,Best等人<sup>[16]</sup>提出了不同降水量下的雨滴粒子大小分布规律.雨滴的密度随雨滴的大小呈指数规律递减,大雨滴在降雨中所占的比重很小,但在整个场景中仍占一定的量,且其呈现出更明显的散射效果.雨滴的大小相对于大气中的其他粒子很大,当光线与雨滴交互时,主要表现巨粒子散射所呈现出的几何光学特性.

雾主要是由悬浮在大气中的气溶胶粒子所形成的,气溶胶的粒子大小为零点几到几微米之间.小粒子的数浓度占的比重比较大.在不同季节、不同地区、不同的大气质量下,分布是不同的.姜忠等人<sup>[17]</sup>统计了北京市1998年~2001年气溶胶的平均数浓度谱.气溶胶的数浓度随着高度的增加呈指数递减,在2000m~2500m高度,

粒子浓度出现极小值,2500m~3500m 高度,粒子浓度随高度稍有增加.当气溶胶粒子与光线发生交互时,主要呈现微粒粒子的 Mie 散射特性.

日常看到的很多自然光和人工光现象都包含了大气散射效果.如太阳光穿过大气时及夜晚路灯发光都会与周围的大气粒子交互作用,产生散射现象.散射粒子的大小决定其散射特征.当粒子的尺度小于光线波长的十分之一时,主要表现出 Rayleigh 散射的特征.其散射光的强度与  $1/\lambda^4$  成正比,波长越小, Rayleigh 散射就越强.同时, Rayleigh 散射的散射光强朝各向分布较为平均.当粒子半径大于  $0.1\lambda$  时,需要引入 Mie 散射理论<sup>[18]</sup>来处理. Mie 散射向各方向散射不均匀,随着粒子半径的增大表现出明显的前向散射特性.

1.1.2 雨雾天的光照

雨雾天时,天空被云层所覆盖,太阳光受云层的吸收、反射、散射后被极大地削弱.此时,大气的光照主要受天空光所影响.因此,常用的平行光模型不能被用来进行雨雾散射效果的绘制.

引入 Nishita 等人<sup>[8]</sup>的天空光模型.将整个天空域看成发光源,按角度采样把整个天空域分割成若干个发光带,发光带的强度由采样线的强度确定.入射到大气中任意点  $p$  的光强是天空域各光带入射到  $p$  点的光强的积分和,公式如下:

$$I(s_i) = \sum_{i=1}^N W_i \int_0^\pi L(\alpha, \delta) \sin \alpha \exp(-t(s_i)) d\alpha \tag{1}$$

式中  $N$  表示发光带个数,  $W_i$  表示光带的角宽度,  $L(\alpha, \delta)$  表示天空光的强度,这里我们采用 CIE 全阴天光强分布模型:  $L(\theta) = L_z(1 + 2\cos\theta)/3$ ,  $L_z$  表示天空顶的光强与太阳在空中的高度有关,  $\theta$  表示发光源和天空顶的角度,天空光强分布在天空最强,向地平线方向则不断减弱.  $t(s_i)$  表示天空域中各个发光源到  $p$  点的光学深度.

天空光的计算非常耗时,为了简化起见,入射到空中的任意点的光强可以作为高度的函数,我们预先为每一高度计算出射光强,创建查找表,以便运算时调用.

1.1.3 雨雾天气的多粒子散射模型

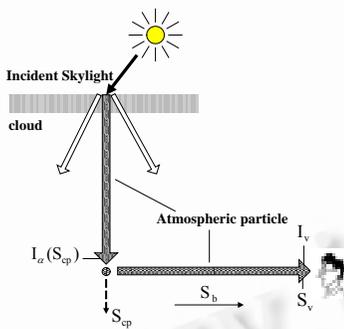


Fig.1 The path of a single beam from the light source to the viewer's eye  
图 1 光源从发光点散射到视点的路径

如前所述,雨雾天气条件下,各向漫射的天空光是大气散射的主要光源.同时,空气中包含多种不同类型的粒子.由于天空光的漫射,与大气粒子发生交互的光线来自各个方向,用传统的大气散射计算方法需要考虑空间光线的方向性,计算复杂.同时,各种粒子对光线散射的特性不同,传统的单一粒子模型不再适用,这里需要考虑雨雾天气下的多粒子与光线的交互作用,从而更加真实地模拟雨雾天气大气散射效果.

我们首先采用传统的大气散射公式建立精确的雨雾天大气散射模型.图 1 示例了天空域中的一条光线与视线方向一粒子交互,散射到视点的过程.视线方向上所接收的总散射光强是天空域各向光线与视线方向上所有粒子交互散射到视点的的光强和,如下式所示:

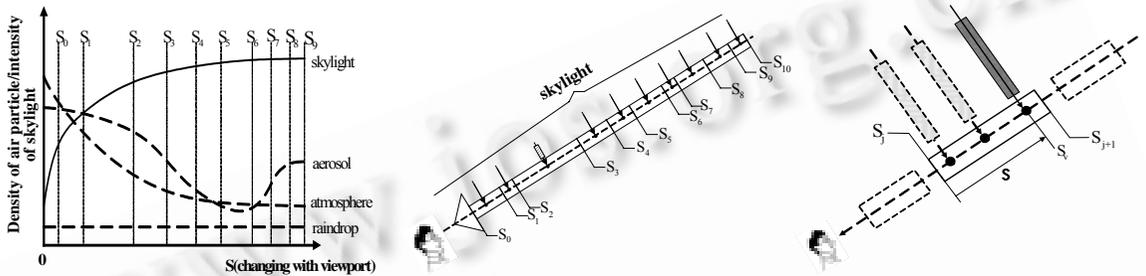
$$I_v = \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{s_{cp}=s}^{s_v} I_\alpha(s_{cp}) \sum_{i=0}^{N_s-1} (D_{\alpha,i}[\lambda, \theta] p_i(s_{cp})) \times \exp \left[ - \sum_{i=0}^{N_s-1} \gamma_i \int_{s_{cp}}^{s_v} p_i(s_b) ds_b \right] ds_{cp} d\alpha d\delta \tag{2}$$

式中  $I_\alpha(S_{cp})$  表示从  $\alpha$  方向发射到  $S_{cp}$  位置处的天空光强,  $D_{\alpha,i}[\lambda, \theta]$  表示  $\alpha$  方向的相位函数,  $P_i(S_{cp})$  表示  $i$  粒子在  $S_{cp}$  位置处的密度,  $\gamma_i$  表示  $i$  粒子的散射系数,  $N_s$  表示在雨雾条件下大气中不同散射粒子的个数,包括不同大小的雨粒子、气溶胶粒子、大气分子等.内积分公式的前半部分表示  $\alpha$  方向处的天空光强与大气粒子交互后,散射到视线方向的强度,积分后半部分表示从  $S_{cp}$  到视点光强所受的能量衰减.外积分表示考虑天空域各向发射过来的光线.当  $N_s=1$  时,式(2)即回归为单粒子散射模型.

显然,式(2)无解析表达且计算非常耗时,因此需对该式进行简化.由于雨天天空的漫射性质,我们可以将天

空域中各个方向发射到任意点的光强看成一个整体,并引入前面提到的天空光模型,即可获得任意点的入射光强.由于该入射光强是天空域中各个方向发射出来的光线的集合体,从整体来看不具有方向性,所以在此可采用统一的相位函数.

同时,为避免视线方向上需要对每一粒子进行散射光强的计算,考虑到粒子浓度在一定区域内变化比较平缓,我们引入一个散射体的概念<sup>[9]</sup>,即按照视线方向上的粒子浓度和入射的天空光强分布对视线穿过的大气进行分段采样,每一段内的同类型粒子的浓度取该段内的平均数,可将它们看作一个整体.采样路径的分段大小要综合地考虑大气粒子浓度和入射的天空光强随高度而产生的曲线变化,使其在段中近似恒定,分段数可根据绘制的精度来调整,从而避免了沿视线方向的逐点采样.如图 2(a)所示,虚线和实线分别表示不同粒子的浓度,入射天空光强随高度变化的情况,我们可以把变化较缓的部分分割成一个区段,将它看作一个整体.



- (a) Dividing the particles into several scatter volume along the viewpoint direction
  - (b) Total incident light intensity of the observer eyes are the sum of the scattering intensity of sky light of each scattering volume
  - (c) Calculation of any scattering volume
- (a) 把视线方向的粒子分成若干个散射体      (b) 入射到人眼的总光强是各个散射体散射天空光到视点的光强和      (c) 任意一散射体的计算示意图

Fig.2 The simplified atmospheric scattering model when raining  
图 2 简化雨雾天的大气散射模型

经过以上简化后,我们可以把公式简化为

$$I_v = \sum_{j=0}^{N_{sv}} I_v^j \quad (3)$$

如图 2(b)所示,视线方向上散射到人眼的总光强是视线上  $N_{sv}$  个采样段中的粒子散射天空光到人眼的光强的集合.

现在我们来讨论其中的任一采样段  $I_v^j$  的散射光强计算,如图 2(c)所示.我们先考虑  $SV_j$  采样段散射天空光到  $S_j$  的光强:

$$I_s^j = \int_{s_j}^{s_{j+1}} I_\alpha^j(s_v) \sum_{i=0}^{N_s-1} D_i[\lambda] p_{i,j}(s_v) \exp\left[-\sum_{i=0}^{N_s-1} \gamma_i \int_{s_j}^{s_v} p_{i,j}(s) ds\right] ds_v \quad (4)$$

式中  $I_\alpha^j$  表示入射到  $S_v$  的天空光强,  $D_i[\lambda]$  表示天空光与  $i$  粒子交互的相位函数,  $N_s$  表示不同散射性质的粒子个数,  $p_{i,j}(S_v)$  表示在  $[S_j, S_{j+1}]$  采样段中  $i$  粒子的密度,  $\gamma_i$  表示  $i$  粒子的散射系数, 内积分取值  $S_j$  到  $S_v$  表示该段散射体引起的光强衰减, 外积分取值  $S_j$  到  $S_{j+1}$  从而获得第  $j$  采样段内所含粒子的散射光强.

由图 2(a)所示,在一个采样段中,  $p_{i,j}(S_v)$ ,  $I_\alpha^j(s_v)$  可以看成是常数,于是我们对公式(4)作如下简化:

$$I_s^j = I_\alpha^j \frac{1 - \exp[-(s_{j+1} - s_j) \sum_{i=0}^{N_s-1} p_{i,j} \gamma_i]}{\sum_{i=0}^{N_s-1} p_{i,j} \gamma_i} \times \sum_{i=0}^{N_s-1} p_{i,j} D_i[\lambda] \quad (5)$$

$I_s^j$  光强从  $S_j$  位置传输到视点位置还要经过采样路径  $SV_0$  到  $SV_{j-1}$  的衰减,于是天空光经  $SV_j$  采样段散射最终到达人眼的光强可表示为

$$I_v^j = I_s^j \exp\left[-\sum_{i=0}^{N_s-1} \gamma_i \sum_{j=0}^{N_j-1} p_{i,j}(s_{j+1} - s_j)\right] \quad (6)$$

其中  $N_j$  表示采样段的个数.当粒子密度固定(雨粒子)时, $\Sigma$ 中的  $p$  与采样段的高度无关.式(5)中的  $\sum_{i=0}^{N_s-1} p_{i,j} D_i[\lambda]$  可表示为  $\sum_{i=0}^{N_s-1} p_i D_i[\lambda]$ ,  $\sum_{i=0}^{N_s-1} p_{i,j} \gamma_i$  可表示为  $\sum_{i=0}^{N_s-1} p_i \gamma_i$ . 式(6)中的  $\sum_{j=0}^{N_j-1} p_{i,j} (s_{j+1} - s_j)$  可表示为  $p_i (s_{N_j} - s_0)$ .

将式(6)代入式(3),得到入射到人眼的光线总强度  $I_v$ .

### 1.2 雨后彩虹模型

彩虹是雨后所特有的大气散射现象.雨后大气中充满着大量的水滴,太阳光与大气中的水滴粒子发生散射作用,由于 Mie 散射随散射角度呈不同散射强度分布的特性,在散射角为  $138^\circ$  和  $129^\circ$  时,太阳光中不同波长的光线依次出现峰值,形成虹和霓两个彩色带.虹和霓之间的区域散射强度出现低谷为亚历山大黑带.此外,虹和霓的色彩及宽度与降雨的大小有关.大雨过后,大气中大雨滴比较多,虹带就很窄,色彩也会很鲜明.相反,雨量不大时,大气中的小雨滴就比较多,虹带就很宽,色彩也比较黯淡.所以当小雨过后,因为大气中的雨滴太小,散射特征不明显,就不会出现彩虹.

对于雨后彩虹的绘制,我们可以采用与上一节中类似的方法.但这里入射光为平行的太阳光,散射强度与散射角相关.同时,我们考虑雨量和彩虹色彩宽度的关联性,粒子分布参数  $p_{i,j}(S_v)$  由雨粒子分布中所提到的分布特性决定.

将式(5)转化为

$$I_s^j = I_\alpha^j \frac{1 - \exp[-(s_{j+1} - s_j) \sum_{i=0}^{N_s-1} p_{i,j} \gamma_i]}{\sum_{i=0}^{N_s-1} p_{i,j} \gamma_i} \times \sum_{i=0}^{N_s-1} p_{i,j} D_i[\lambda, \theta] \tag{7}$$

这里,  $I_\alpha^j$  表示入射的太阳光强度,  $\theta$  表示太阳光与采样段粒子交互散射到视点的相位角.进而通过调整粒子分布参数  $p_{i,j}(S_v)$ ,可以得到不同降雨量后的彩虹效果.

雨后,因为雨水对于大气的洗涤,大气中尘埃等悬浮颗粒相对较少,这里我们主要考虑大气中的水滴对光线的散射.由于粒子对光线的散射特性与其自身的大小密切相关,所以精细地对大气中的水滴半径进行采样能够提高绘制效果,但同时需要大量的计算时间.为了平衡绘制效果和性能,我们对散射角为  $138^\circ$  和  $129^\circ$  的虹霓带边缘处采用更精细的采样,这样既能很好地实现彩虹与天空背景的无缝拼接,又能提高绘制的速度.同时,我们通过调整大气中水滴粒子的浓度值,来模拟水滴受太阳光照而逐渐减少的过程,从而真实地模拟了雨后彩虹由出现到消失的动态变化过程.

## 2 灯光散射模型

与雨雾天气条件下自然光的散射效果不同,雨雾场景中路灯、聚光灯更多地反映了人工光与雨雾粒子的交互作用.下面分别讨论路灯和聚光灯的散射模型.

### 2.1 各向同性点光源(路灯)散射模型

对于点光源的散射,传统上采用空间离散的体绘制方法<sup>[12]</sup>,即通过对照明空间的离散采样,采用预计算存储散射强度,并采用硬件加速等方法来加速绘制,但是这些方法必须先对空间采样,计算复杂,存储量大,无法达到实时的绘制速度,同时由于要进行预处理,常常只针对某一固定类型的粒子、场景和视点,不易交互改变条件参数来绘制新的效果.为此,我们引入一种新颖的解析方法来精确计算雨雾条件下的单次散射效果.

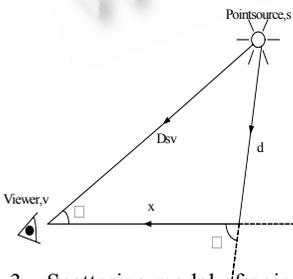


Fig.3 Scattering model of point light  
图3 点光源散射模型

如图3所示,点光源  $s$  发光强度为  $I_0$ ,与视点  $v$  相距  $D_{sv}$ ,与视线夹角为  $\gamma$ ,则人眼在视线方向上接收到的总光强是视线方向上的粒子散射光强之和.

我们给出标准的点光源散射公式为

$$L(\gamma, D_{sv}, \beta) = \int_0^\infty \beta k(\alpha) \frac{I_0 e^{-\beta l}}{d^2} e^{-\beta x} dx \quad (8)$$

式中 $\beta$ 表示大气粒子浓度, $k(\alpha)$ 是相位函数, $I_0/d^2$ 为点光源的发光特性,在整个光线传输路径  $d+x$  上光强呈指数衰减.

注意到该公式是不可解析计算的,需要用数值计算的方法,这必将耗费大量的计算时间,无法达到实时.

Sun 等人<sup>[15]</sup>考虑物理参数间的内在联系,通过一系列的参数替换,将上式变换为

$$L = A_0(D_{sv}, \gamma, \beta) \int_{\gamma/2}^{\pi/2} \exp[-A_1(D_{sv}, \gamma, \beta) \tan \varepsilon] d\varepsilon \quad (9)$$

式(9)可分解成两个部分:

(a) 依赖于场景中物理参数的可解析的数学表达式  $A_0, A_1$ .

$A_0(D_{sv}, \gamma, \beta), A_1(D_{sv}, \gamma, \beta)$  分别与物理参数  $D_{sv}, \gamma, \beta$  相关.

(b) 独立于物理参数的二维数值表.

$$F(u, v) = \int_0^v \exp[-u \tan \varepsilon] d\varepsilon.$$

该函数是不可解析的,但它是纯粹数值的(与具体的物理参数无关),所以可以通过预处理的方式,只需计算一次,将其保存到二维表中.

将(a),(b)两部分相结合,得到散射光强的计算公式:

$$L = A_0[F(A_1, \pi/2) - F(A_1, \gamma/2)] \quad (10)$$

这样,即用具体的解析表达式实现了复杂的体散射模型的实时绘制.

## 2.2 各向异性点光源(聚光灯)散射模型

上节实现了各向同性的点光源散射效果的实时绘制.但对于各向异性的光源(如聚光灯),其朝各个方向发出的光照强度并不是一致的,不能简单地把光源的发光强度看成是一个常量.故前面的方法就不再适用了.我们需要进行特殊的处理,以实现各向异性光源散射效果的实时绘制.

如图 4 所示, $A$  为点光源,在圆锥体  $ACE$  中发光,中心轴  $AD$  处光强最强,发光强度随着发射光线方向与中心轴  $AD$  的夹角的增大而逐渐递减为 0(如  $AC, AE$  处),从而增加了散射光计算的复杂性.同时,因为各向异性光源只在圆锥体内发光,所以在进行散射光强计算时需要考虑照明范围.

按照 Nishita 等人<sup>[12]</sup>的想法,我们提出了各向异性光源的光强分布表达式  $I(\theta) = I_0 \{ (1-q)(\cos \theta - \cos A) / (1 - \cos A) + q \}$ ,  $I_0$  为中心光轴的发射光强,  $\theta$  为发射光线与中心轴偏转角,  $A$  为发光的最大圆锥角,  $q$  为控制边缘柔和系数,在此我们取  $q=0$ ,光强柔和递减.

如图 4 所示,我们给出各向异性光源的散射光强表达式:

$$\begin{aligned} L(\theta, D_{sv}, \beta, r^*) &= \int_{\overline{BL}}^{\overline{BN}} \beta k(\alpha) \frac{I_0 (\cos \theta - \cos A) e^{-\beta l}}{d^2 (1 - \cos A)} e^{-\beta x} dx \\ &= \int_{\overline{BL}}^{\overline{BN}} \beta k(\alpha) \frac{I_0 \cos \theta e^{-\beta l}}{d^2 (1 - \cos A)} e^{-\beta x} dx - \int_{\overline{BL}}^{\overline{BN}} \beta k(\alpha) \frac{I_0 \cos A e^{-\beta l}}{d^2 (1 - \cos A)} e^{-\beta x} dx = L_1 - L_2 \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $I_0(\cos \theta - \cos A) / (1 - \cos A)$  为发射光强(随发光方向与中心轴的夹角发生变化),  $\overline{BL}$  及  $\overline{BN}$  确定照明范围(可由几何关系求得),在视线  $BN$  方向上,只有  $LN$  段间的大气粒子与光线进行散射.同时,我们设定几个参数表示视线与发光体的角度关系,定义如下:  $ABH=a, ABD=r, ABN=r^*, HBN=q$ .其他参数的物理含义与上节相同.我们可以看到,  $L_2$  式中的光强为常数,可用上一节的方法进行计算,我们把注意力放到  $L_1$  的计算上,即

$$L_1(\theta, D_{sv}, \beta, r^*) = \int_{\overline{BL}}^{\overline{BN}} \beta k(\alpha) \frac{I_0 \cos \theta e^{-\beta l}}{d^2 (1 - \cos A)} e^{-\beta x} dx \quad (12)$$

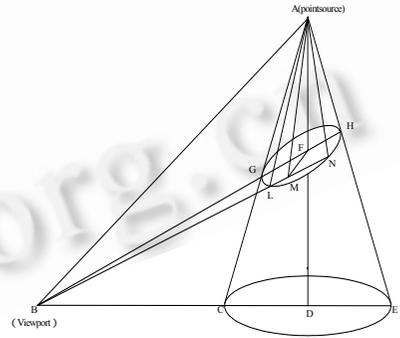


Fig.4 Scattering model of spot light  
图 4 聚光灯散射模型

根据余弦定理,可得

$$d = \sqrt{D_{sv}^2 + x^2 - 2xD_{sv} \cos r^*} \quad (13)$$

基于图 4 所示,几何关系可得  $\cos\theta$  的表达式:

$$\cos\theta = \frac{D_0 - 2xD_1}{2d \sin\alpha} \quad (14)$$

式中:

$$D_0 = D_{sv} \left[ \cos(\alpha - r) + \frac{\sin^2 \alpha}{\cos(\alpha - r)} - \frac{\cos^2 r}{\cos(\alpha - r)} \right], \quad D_1 = \cos r^* \cos(\alpha - r) - \cos r \cos q.$$

同时,把相位函数  $k(\alpha)$  归一到  $1/4\pi$ (此方法也能扩展到一般的相位函数表达式,见文献[15]),代入式(14),则式(12)变为

$$L_1(\theta, D_{sv}, \beta, r^*) = \frac{\beta I_0 D_0}{8\pi \sin\alpha(1 - \cos A)} \int_{\overline{BL}}^{\overline{BN}} \frac{e^{-\beta d}}{d^3} e^{-\beta x} dx - \frac{\beta I_0 D_1}{4\pi \sin\alpha(1 - \cos A)} \int_{\overline{BL}}^{\overline{BN}} \frac{x e^{-\beta d}}{d^3} e^{-\beta x} dx \quad (15)$$

显然,我们只需要求解出上式即可得到任意位置的光线强度,但是上式是不可解析的.如何求解上式,一种最直观的想法是把上述表达式分解为两个表达式,一个是与物理参数有关的可解析的表达式,另一个是独立于物理参数的二维数值表,这样就可以直接求出上式的值,而不必沿袭传统的体绘制方法.

对此,我们先用表达式  $t = \beta x, T_{sv} = \beta D_{sv}$  来替换积分式,这样做消除了  $\beta$  与距离间分离的依赖关系,在一定程度上降低了复杂度,然后我们再用  $z = t - T_{sv} \cos r^*$  来替换,可得:

$$L_1 = A_0(T_{sv}, r^*, \beta) \int_{\sin \left[ \arctg \left( \frac{\beta \overline{BN} - T_{sv} \cos r^*}{T_{sv} \sin r^*} \right) \right]}^{\sin \left[ \arctg \left( \frac{\beta \overline{BL} - T_{sv} \cos r^*}{T_{sv} \sin r^*} \right) \right]} e^{-A_2(T_{sv}, r^*) \frac{1+x}{\sqrt{1-x^2}}} dx + A_1(T_{sv}, r^*, \beta) FL \quad (16)$$

其中

$$A_0(T_{sv}, r^*, \beta) = \frac{\beta^3 I_0 D_0 e^{-T_{sv} \cos r^*}}{8\pi \sin\alpha T_{sv}^2 \sin^2 r^* (1 - \cos A)} - \frac{\beta^2 I_0 D_1 \cos r^* e^{-T_{sv} \cos r^*}}{4\pi \sin\alpha T_{sv} \sin^2 r^* (1 - \cos A)} \quad (17)$$

$$A_1(T_{sv}, r^*, \beta) = \frac{\beta^2 I_0 D_1 e^{-T_{sv} \cos r^*}}{4\pi \sin\alpha T_{sv} \sin r^* (1 - \cos A)} \quad (18)$$

$$A_2(T_{sv}, r^*) = T_{sv} \sin r^* \quad (19)$$

式中  $FL$  是一个条件积分,具体形式可参见附录.

尽管式(16)看起来仍然很复杂,但是这其实已经是一个很简单的形式了,因为我们已经将大部分物理因子从被积函数中有效地分离出来,更重要的是,  $A_0, A_1, A_2$  是与  $x$  无关的,所以在被积函数中  $A_2$  可被视为常数.

我们设定如下的几个特殊函数来替代式(16)中不可解析的积分式:

$$\begin{aligned} F_0(u, v) &= \int_0^v \exp(-utg\varepsilon) d\varepsilon, & F_1(u, v) &= \int_0^v \exp\left(-u \frac{1+\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}\right) d\varepsilon, \\ F_2(u, v) &= \int_1^v \exp\left(-u \frac{1-\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\varepsilon}\right) d\varepsilon, & F_3(u, v) &= \int_1^v \exp\left(-u \frac{1+\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\varepsilon}\right) d\varepsilon \end{aligned} \quad (20)$$

这 4 个函数虽然是不可解析的,但它们是纯粹数值的(与具体的物理参数无关).可以证明这 4 个函数的取值是平滑的、有界的,所以可以通过预处理的方式,只需计算一次,将其保存到二维表中绘制时实时调用即可.

综上所述,我们把一个看起来计算量很大的各向异性光源单散射公式(11)转换成一个与场景中物理参数相关的可解析的公式和一个不可解析的独立于物理参数的二维数值表.从而实现了复杂的各向异性光源单散射效果的实时计算.可以看到,我们的方法能够应用到各种场景,可实时地变换视点、光照和大气粒子浓度.

### 3 光线散射效果的绘制

本节介绍基于人眼的衍射效果及绘制流程。

#### 3.1 基于人眼衍射的光线绘制

人眼由于瞳孔和眼睫毛的特殊结构,在接收强光(如路灯光,车灯光)时,在视觉系统中也会产生圆孔衍射和光栅衍射效果,形成我们平时所能看到的路灯周围的光晕和光芒。因此,在光线效果的绘制中,增加衍射效果能够有效地提高场景的真实感。

Nakamae 等人<sup>[19]</sup>模拟了车灯的衍射效果,但是他们没有考虑人眼对于衍射光的分辨能力。当我们观察车灯时,两个前向车灯发光,同时在人眼中产生衍射效果,当车距离视点很远时,我们只能看到一个很大的圆形光亮斑,当车向视点方向驶来时,光亮斑逐渐变成椭圆形,最后分成两个可分辨的光亮斑。根据 Rayleigh 判据可用来解释这个现象:一个发光点的衍射斑中心恰好与另一个发光点的衍射斑边缘(第一衍射极小)相重合时,恰好可以分辨两物。此时两个发光点(两个前向灯)对人眼中心所张的角  $\delta$  称为最小分辨角,  $\delta=1.22\lambda/D$ ,  $\lambda$  为发射光的波长,  $D$  为瞳孔的直径。发光点与人眼中心的张角决定了衍射光斑的光能分布,我们根据车和视点以及两车灯之间的距离,可实时计算出衍射光强的分布叠加,从而绘制出逼真的车灯衍射效果。

#### 3.2 绘制流程

由于雨雾天气散射效果与周围环境关系很大,因此我们绘制时也要使雨与其他景物无缝拼接,逼真自然。这里,我们采用整体绘制的方法。

建立三维场景,包括建筑、田野、公路、路灯等模型。在金辉等人<sup>[20]</sup>和罗维佳等人<sup>[21]</sup>提出的关于雨的建模和绘制方法的基础上,采用粒子系统来建立雨的形态,并考虑了雨滴的物理特征,模拟了不同雨量下的雨滴大小分布,下落终速度以及风速对于雨滴的影响。因为考虑到绘制的实时性,野外的树、房屋场景用 billboard 技术来实现。天空光采用标准的 CIE 全阴天模型进行绘制。交互地改变天气条件,包括雨的大小、风速、光源位置等,就可以绘制出不同条件下的雨雾场景,并能够交互地在场景中进行漫游观察。本文未考虑雨滴与地面景物的交互(如房屋、树木被雨打湿的过程),但为保证整体效果的逼真,采用了动态纹理的方法来近似地模拟,实现整体效果的和谐。同时,根据人体视觉理论,人眼对图像中等亮度区域的灰度变化较为敏感,而对高亮度及低亮度区域的灰度变化不大敏感这一特性,我们采用类似于双对数的曲线代替传统的线性变换来进行能量亮度转换,模拟出散射效果更加逼真,更加符合人眼视觉特性的画面。

## 4 结 论

依据上面的模型,我们可以计算出雨雾天气下天空光漫射的雨雾场景及雨后彩虹、路灯照射的雨雾场景和聚光灯照射下的粒子散射效果。同时,我们在浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室的 PIV2.4GHZ,1.0GB 内存,NVIDIA GeForce FX5200 显卡的高档微机上实现了雨雾天气下不同光线散射场景的实时绘制。

图 5 绘制的是晴朗天气和雨雾天气下白天光线散射的动态漫游效果。(a)为晴朗天气,场景受太阳光直射,这时大气中的粒子含量很少,散射效果很弱,大气能见度很高。(b)为大雨时的光线散射效果,这时雨量和雾气都很大,在天空光与雨雾中多粒子散射的作用下,场景呈现出雾蒙蒙的感觉,雨滴和雾滴的光线散射强度也很好地表现出来,整个场景能见度很低。(c)和(d)为小雨时的光线散射效果,天空飘着微微细雨,场景蒙上了一层薄雾,同时可以在场景中实时漫游。图 6 是用同一方法模拟的晴朗天气和雨雾天气下夜晚光线散射效果。(a)为晴朗天气,路灯发出的强光在人眼中产生衍射的效果形成路灯周围的光晕,塔吊射出的光照没有形成光束。(b)为大雨时的光线散射效果,在路灯光与大气粒子的散射作用下,路灯周围出现朦胧的光线散射效果,同时因为雨雾天的夜晚只有路灯光的作用,所以只有路灯周围的雨滴受光线散射的作用易被人眼所观察到,随着视点的移动,雨滴的散射作用可实时绘制。(c)为小雨时的光线散射效果,雨量、路灯和塔吊周围的散射效果都相对减弱。图 7(a)和(b)分别是大雨和小雨后的彩虹效果。大雨过后大气中的大水滴含量多,形成的虹霓带色彩鲜艳,带宽比较窄。而小雨后因

为大气中小水滴的作用,彩虹的颜色黯淡,带相对较宽,竟已经基本看不到了.图 8 是前后两个聚光灯与大气粒子散射的效果.(a)为没有雾的效果,此时散射光线不明显.(b),(c),(d)分别是大气浓度指数为 0.01,0.02,0.04 的光线散射效果,我们可以看到,随着大气浓度的增加,光线散射效果逐渐增强.

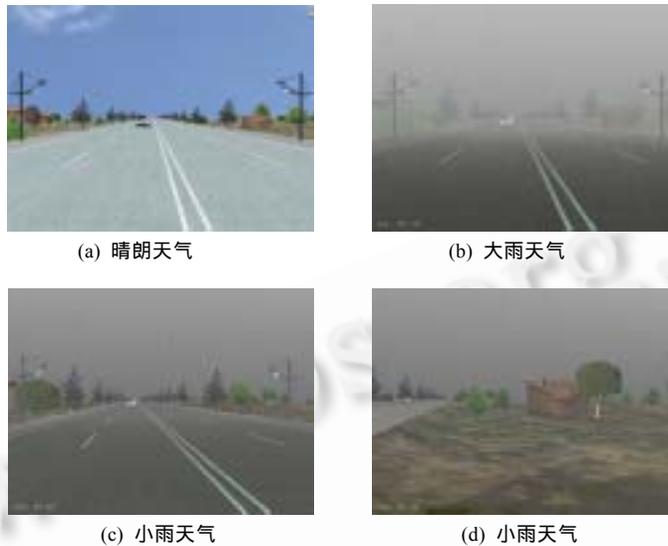


Fig.5 Dynamic raining scene with different scattering effect in daytime

图 5 白天晴朗天气和不同雨雾天气下光线散射场景漫游



Fig.6 Dynamic raining scene with different scattering effect in night

图 6 夜晚晴朗天气和不同雨雾天气下光线散射场景漫游



Fig.7 Rainbow with different rainfall

图 7 不同雨量后的彩虹效果

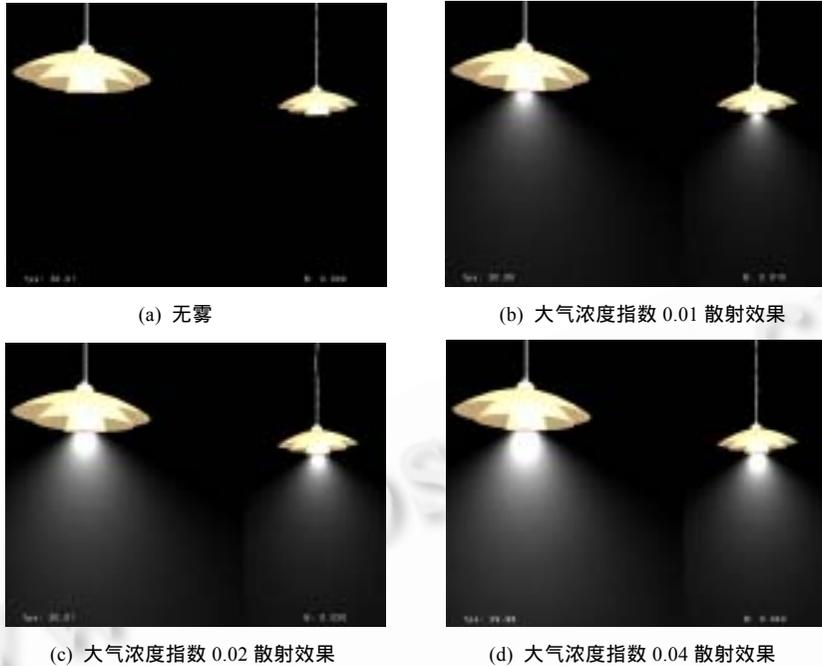


Fig.8 Scattering effect of non-isotropic light source with different intensity of atmosphere

图 8 各向异性光源在不同大气粒子浓度下散射

## 5 总结与展望

本文提出一种考虑雨雾天气下自然光和人工光散射的光照模型.基于雨雾场景中大气粒子的特性,模拟了不同时刻、不同光源、不同大气浓度下的不同光线散射效果,实现了白天雨场景中雨雾散射效果、雨后彩虹、晚上雨场景中路灯引起的雨雾散射效果,以及聚光灯形成的光束效果,并通过对以上散射计算公式的简化,达到了实时绘制的效果.

与以往的工作相比,本文有如下创新之处:

- (1) 提出了考虑无太阳光直射时的天空光多粒子散射模型,首次实现了雨雾动态场景中大气散射效果的实时绘制.
- (2) 对于传统的点光源单散射模型公式进行解析简化,实现了各向异性光源散射效果的实时绘制.
- (3) 通过对彩虹带边缘水滴分布采用密集采样,使绘制出的彩虹带和天空背景很好地实现了无缝拼接,效果较 Jackel 等人<sup>[9]</sup>的工作有较大的改善,同时也提高了绘制速度.

光线散射效果是雨雾场景真实感绘制中最主要也最为复杂的,本文为今后逼真地模拟雨雾天场景奠定了重要的基础.在今后的工作中,将采用 GPU 加速的方法进一步提高绘制的速度,并考虑地面的光线反射,雨滴在地面微小水坑的浸透吸收及沉积而造成的湿润效果,以更加逼真地实时绘制雨雾的动态场景.

## References:

- [1] Klassen RV. Modeling the effect of atmosphere on light. ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), 1987,215-237.
- [2] Nishita T, Shirai T, Tadamura K, Nakamae E. Display of the earth taking into account atmospheric scattering. ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), 1993,175-182.
- [3] Nishita T, Dobashi Y, Nakamae E. Display of clouds taking into account multiple anisotropic scattering and sky light. ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), 1996,379-386.

- [4] Dobashi Y, Kaneda K, Yamashita H, Okita T, Nishita T. A simple, efficient method for realistic animation of clouds. ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), 2000,19-28.
- [5] Dobashi Y, Nishita T, Yamamoto T. Interactive rendering of atmospheric scattering effects using graphics hardware. In: Proc. of the Graphics Hardware. 2002. 99-108.
- [6] Riley K, Ebert D, Kraus M, Tessendorf J, Hansen C. Efficient rendering of atmospheric phenomena. In: EuroGraphics Symp. on Rendering. 2004. 75-386.
- [7] Kaneda K, Okamoto T, Nakamae E, Nishita T. Photorealistic image synthesis for outdoor scenery under various atmospheric condition. The Visual Computer, 1991,7(5):247-258.
- [8] Nishita T, Nakamae E. Continuous tone representation of three-dimensional objects illuminated by sky light. Computer Graphics, 1986,20(3):125-132.
- [9] Jackèl D, Walter B. Modeling and rendering of the atmosphere using Mie-scattering. Computer Graphics Forum, 1997, 16(4):201-210.
- [10] Wu CM, Qian H, Zhu ML. A software framework for rendering atmospheric effect. Acta Electronica Sinica, 2004,32(5):735-739 (in Chinese with English abstract).
- [11] Wu CM, Qian H, Zhu ML. Some problems about rendering atmospheric effect. Acta Electronica Sinica, 2005,33(8):1403-1406 (in Chinese with English abstract).
- [12] Nishita T, Nakamae E. A shading model for atmosphere scattering considering luminous intensity distribution of light sources. Computer Graphics, 1987,21(3):303-310.
- [13] Jansen HW, Christensen PH. Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps. ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), 1998,311-320.
- [14] Dobashi Y, Yamamoto T, Nishita T. Interactive rendering method for displaying shafts of light. In: Proc. of the Pacific Graphics 2000. 2000. 31-37.
- [15] Sun B, Ramamoorthi R, Narasimhan SG, Nayar SK. A practical analytic single scattering model for real time rendering. ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), 2005,1040-1049.
- [16] Best AC. The size distribution of raindrops. Quarterly Journal of the Royal Meteorological, 1950,76(16):16-36.
- [17] Jiang Z, Shi GY, Chen HS. Analysis on aerosol concentration of Beijing during 1998-2001. Climatic and Environmental Research, 2003,8(4):495-502 (in Chinese with English abstract).
- [18] Laven P. Simulation of rainbows, coronas and glories using Mie theory and the Debye series. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2004,257-269.
- [19] Nakamae E, Kaneda K, Okamoto T, Nishita T. A lighting model aiming at drive simulators. Computer Graphics, 1990,24(4): 395-404.
- [20] Yu JH, Yin XQ, Peng QS. A rain model for cartoon animation. Journal of Software, 2002,13(9):1881-1886 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/1881.pdf>
- [21] Luo WJ, Du JK, Xie SP. Real-Time simulation of rain in 3D terra in scene based on particle systems. Journal of Image and Graphics, 2004,9(4):495-500 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献:

- [10] 吴春明,钱徽,朱森良.一个绘制大气介质效果的软件框架.电子学报,2004,32(5):735-739.
- [11] 吴春明,钱徽,朱森良.大气效果绘制的若干问题研究.电子学报,2005,33(8):1403-1406.
- [17] 姜忠,石广玉,陈焕森.北京市 1998-2001 年大气气溶胶粒子数浓度分析.气候与环境研究,2003,8(4):495-502.
- [20] 于金辉,尹小勤,彭群生.卡通动画雨模型.软件学报,2002,13(9):1881-1886. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/1881.pdf>
- [21] 罗维佳,都金康,谢顺平.基于粒子系统的三维场地降雨实时模拟.中国图像图形学报,2004,9(4):495-500.

附录

1. 当  $\arctg\left(\frac{\beta\overline{BL}-T_{sv}\cos r^*}{T_{sv}\sin r^*}\right) \leq 0, \arctg\left(\frac{\beta\overline{BN}-T_{sv}\cos r^*}{T_{sv}\sin r^*}\right) < 0$  时,  $FL$  表示为

$$\int_{\cos\left(\arctg\left(\frac{\beta\overline{BL}-T_{sv}\cos r^*}{T_{sv}\sin r^*}\right)\right)}^{\cos\left(\arctg\left(\frac{\beta\overline{BN}-T_{sv}\cos r^*}{T_{sv}\sin r^*}\right)\right)} e^{-T_{sv}\sin r^* \frac{1-\sqrt{1-x^2}}{x}} dx .$$

2. 当  $\arctg\left(\frac{\beta\overline{BL}-T_{sv}\cos r^*}{T_{sv}\sin r^*}\right) > 0, \arctg\left(\frac{\beta\overline{BN}-T_{sv}\cos r^*}{T_{sv}\sin r^*}\right) < 0$  时,  $FL$  表示为

$$\int_{\cos\left(\arctg\left(\frac{\beta\overline{BL}-T_{sv}\cos r^*}{T_{sv}\sin r^*}\right)\right)}^1 e^{-T_{sv}\sin r^* \frac{1-\sqrt{1-x^2}}{x}} dx + \int_1^{\cos\left(\arctg\left(\frac{\beta\overline{BN}-T_{sv}\cos r^*}{T_{sv}\sin r^*}\right)\right)} e^{-T_{sv}\sin r^* \frac{1+\sqrt{1-x^2}}{x}} dx .$$

3. 当  $\arctg\left(\frac{\beta\overline{BL}-T_{sv}\cos r^*}{T_{sv}\sin r^*}\right) > 0, \arctg\left(\frac{\beta\overline{BN}-T_{sv}\cos r^*}{T_{sv}\sin r^*}\right) \geq 0$  时,  $FL$  表示为

$$\int_{\cos\left(\arctg\left(\frac{\beta\overline{BL}-T_{sv}\cos r^*}{T_{sv}\sin r^*}\right)\right)}^{\cos\left(\arctg\left(\frac{\beta\overline{BN}-T_{sv}\cos r^*}{T_{sv}\sin r^*}\right)\right)} e^{-T_{sv}\sin r^* \frac{1+\sqrt{1-x^2}}{x}} dx .$$



黄雷(1982 - ),男,浙江宁波人,硕士生,主要研究领域为计算机真实感图形,虚拟现实.



张鑫(1983 - ),男,博士生,主要研究领域为计算机真实感图形.



王章野(1965 - ),男,博士,副教授,主要研究领域为计算机真实感图形,红外成像仿真,多光谱信息融合,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,红外成像仿真,多光谱信息融合,计算机动画,科学信息可视化.



王长波(1976 - ),男,博士,讲师,主要研究领域为数字娱乐,计算机游戏设计,虚拟现实,计算机真实感图形,多媒体技术.