

基于体绘制的三维云可视化研究

蒋立辉¹,董要颖¹,庄子波¹,姚彬²

(1. 中国民航大学 民航气象研究所,天津 300300;

2. 总参通信训练基地,北京 102400)

摘要:为了模拟逼真的三维云场景,该文针对现有模拟三维云的光照模型实现复杂、计算耗时、不能充分展示三维云物理特性的问题,提出了一种基于体绘制技术的改进光照模型的方法。基本思想是采用体绘制技术,把三维云分成粒子集,引入光线投影算法,通过对现有的多次前向散射光照模型散射次数进行简化和散射分布进行改进,然后运用 VC++ 和 OpenGL 开发工具,直接从三维数据场中模拟光线在云内部与云中粒子相互作用的细节,实现了三维云的模拟。结果表明该方法实现简便,生成的三维云较好地展示了云的物理特性,达到了理想的可视化效果。

关键词:三维云绘制;多次散射;光照模型;光线投影

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)05-0079-04

Research of 3D Clouds Visualization Based on Volume Rendering

JIANG Li-hui¹, DONG Yao-ying¹, ZHUANG Zi-bo¹, YAO Bin²

(1. Civil Aviation Meteorological Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Zongcan Communication Training Base, Beijing 102400, China)

Abstract: In order to simulate the lifelike three dimensional cloud scene, at present, the existent three dimensional cloud simulation illumination model is confronted with the phenomena such as complexity in implementation, time consuming and not displaying the physical character of the cloud completely, so it presents a method of improved illumination model based on volume rendering. The basic idea of this method is to use the volume rendering, and divides the three dimensional cloud into particles, taking the ray-casting algorithm into account, through simplifying the scattering times and improving the scattering distribution of the current multiple forward light scattering illumination model, moreover making use of tools such as VC++ and OpenGL, visualizing the details of the interaction between the light and the particles in the clouds directly, finally creating lifelike three dimensional cloud. The result of the simulation shows that the method is simple in implementing and the result of the visualization can display the physical character of the cloud and get the perfect visual effect.

Key words: three dimensional cloud rendering; multiple scattering; illumination model; ray-casting

0 引言

云作为天气系统的一个组成部分,对天气变化有重要影响,而且云对飞行有一定的影响,尤其是在当前低空领域开放的情况下,低空云对飞行员的影响也是巨大的,有些云极具危险性,需要规避。在模拟飞行系统中,飞行员希望作为背景的云更具真实性、有一定空间特性,并希望能看到飞机穿越云时的真实场景。三维云的可视化是气象研究和模拟飞行中的重要组成部分,所以三维云的可视化问题受到越来越多的关注,也

成为计算机图形学研究的热点。但是,由于云的结构复杂、动力学特征变化不定以及光照效果特殊,使得人们很难用精确的方法及模型去描述它,更加不容易真实地展示三维云场景。

在过去的几十年中,研究人员先后提出了多种方法,以求解决三维云的模拟问题。Blinn^[1]在研究云对光的反射特性和透射特性的基础上提出了简单的光照模型进行云的三维模拟,该模型只考虑了云粒子对光的单次散射,忽略了多次散射效果,使其产生的三维云没有真实云银色的边缘;Harris^[2,3]等人在体素模型的基础上采用求偏微分方程来模拟云的动态效果,该模型解决了云的动态效果,但计算量比较大;Wang^[4]在粒子系统的基础上采用纹理贴图的方法对云进行模拟,该方法能模拟出比较真实的云,但是需要对大量的粒子进行计算,还要对纹理贴图进行处理,十分耗时;

收稿日期:2011-09-23;修回日期:2011-12-27

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB731800);中央高校基金项目(ZXH2010D020)

作者简介:蒋立辉(1964-),男,黑龙江人,教授,硕士研究生导师,研究领域为光电电子技术、图像处理与模式识别;董要颖(1986-),男,硕士研究生,研究方向为终端区复杂气象条件可视化。

Sabella^[5]为可视化三维标量场开发了一种密度发射体模型(density emitter object model),第一次考虑了粒子自身的光线发射,该方法对红外云层仿真有重要的意义,但该模型仍未考虑云粒子对光的多次散射效果;龚琳^[6,7]在基于计算机视觉和粒子系统的三维云模拟中,利用计算机视觉技术从现有的二维云图像中提取云的三维信息,再结合粒子系统填充三维空间,最后通过纹理映射和 Billboard 技术实现三维云的绘制;郝进亮^[7]在基于 3D 图形图像函数库 Direct3D 的基础上分别采用粒子系统建模和应用纹理动画技术对云进行模拟,实现了真实感强、渲染速度快的云层效果。

文中针对现有的模拟三维云的光照模型实现复杂、计算耗时、不能充分展示三维云物理特性的问题,提出了一种基于体绘制技术的改进光照模型的方法,采用体绘制技术^[8],把三维云分成体素集,引入光线投影算法^[8],通过对现有的多次前向散射光照模型散射次数进行简化和散射分布进行改进,然后运用 VC++ 和 OpenGL 开发工具,直接从三维数据场中模拟光线在云内部与云中粒子相互作用的散射、衰减等细节,实现了三维云的模拟。结果表明:改进后的光照模型容易实现,计算量降低,生成的三维云能较好地展示云的物理特性,达到了理想的可视化效果。

1 基本原理

在自然环境中,射入到云的光线主要是太阳光,由于太阳到云的距离很远,可以认为有一束平行光入射到云中。云的基本组成粒子^[9]一般是小水滴、冰晶、雪和霰,当一束光入射到云中时会与云中粒子发生两种不同的相互作用,一是云中粒子吸收入射光线的能量将其转化为自身的能量,二是将入射光线散射到任意方向,而且各方向上的能量分布不同。云中粒子与光线相互作用使得穿过云的光线发生变化,一方面通过对光的吸收使得光线强度减弱,另一方面通过对光线的散射使光线的入射路径发生变化,将其转换成具有一定发射角的发射光线。

一束入射方向为 w 的光线在穿过三维云时,云中粒子点 p 处受到的光照强度为 $I(p, w)$,这个过程会因为云中粒子的吸收和散射使光强减弱,同时也会因为粒子间的相互散射而增强。由此可以得到 p 处粒子的光照强度如下:

$$I(p, w) = I_0(w) e^{-\int_0^D \tau(t) dt} + \int_0^D g(x, w) e^{-\int_0^x \tau(t) dt} dx \quad (1)$$

其中: $I_0(w)$ 是云边缘处在 w 方向上的入射光强; $\tau(t)$ 是光强在云内深度 t 处的衰减吸收; D 是云粒子 p 在云内沿着光的传播路径上的深度值。

$$g(x, w) = \int_{4\pi} r(x, w, w') I(x, w') dw' \quad (2)$$

上式表示从 w 方向的入射到点 x 处的光线被云中粒子散射后到达 w' 的光强, $r(x, w, w')$ 是一个散射函数表达式,它对点 x 处接受的散射光线所占比例起决定作用。 $r(x, w, w')$ 可以扩展为:

$$r(x, w, w') = a(x) \tau(x) p(w, w') \quad (3)$$

式中 $a(x)$ 是点 x 处介质的反照率, $p(w, w')$ 是相位函数。

2 云的散射光照模型

2.1 现有模型

云的散射光照模型根据光线与云中粒子相互作用的关系,一般可以分为单次散射和多次散射光照模型。当只考虑指向视点的方向的散射时称之为单次散射光照模型;考虑所有方向上的光线对所有云粒子的连续散射时称之为多次散射光照模型^[10]。由于多次散射光照模型在物理特性上更具精确性,考虑到要可视化真实的三维云,利用多次散射光照模型进行云的可视化更具说服力。那么可以根据(1)式并利用黎曼和可得到光的近似传播公式:

$$I_p = I_0 \cdot \prod_{j=1}^N e^{-\tau_j} + \sum_{j=1}^N g_k \prod_{k=j+1}^N e^{-\tau_k} \quad (4)$$

式中 I_p 是 p 处粒子的光照强度; I_0 是云的边界处入射光的强度。可以从公式本身看该表达式,即入射光线沿一定入射方向进入云中,到达任一云粒子 p 的光强都是由 N 条散射路径叠加而成的。另外,物理上常用相位函数 $P(w, w')$ (其中, w 和 w' 分别为入射光线和散射光线的方向)来计算粒子间的多次散射,它决定了指定入射光线方向上的散射分布。因此,在利用多次散射光照模型的情况下,必须考虑相位函数,用以描述入射光线的散射分布情况。经大量的实验证明有 90% 的光线散射角度在小于等于 10 度范围之内,可以认为前向散射占主要成分。若想要得到精确的结果,就要考虑所有方向上的散射,那么势必会以牺牲计算时间为代价。因此在计算云的多次散射时,可以只考虑那些入射光线主要集中在前方范围的前向多次散射。

由于在云粒子间的多次散射中,前向散射占主要地位,因此, M. J. Harris^[1,2] 在单次散射的基础上,提出了多次前向散射的光照模型,而且他提出的多次前向散射光照模型只考虑入射光线方向上一定角度内的散射效应,这样做好处是既压缩了部分运算量,又考虑了大部分散射。

该模型的优点在于:首次考虑了高反照率云的多次散射效果,使云的模拟效果逼真;不足表现在:

(1) 虽然在比较小的前向立体角 r 内考虑散射,但是要计算该角度内所有方向的散射,计算仍非常费时;

(2) 相位函数的变化。一般都选用简单的瑞利散射^[11]函数 $p(\theta) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \theta)$ 来指定入射光线的散射分布, θ 为入射光线与散射光线的夹角。但是随着云中粒子的变化, 粒子与光线相互作用所产生的散射分布所遵循的相位函数也不相同。因此, 只运用简单的瑞利散射函数作为相位函数不能全面地展示云中粒子对光线的散射效应。

2.2 模型的改进

鉴于多次前向散射的两个不足之处, 文中所做的改进主要体现在对散射次数进行简化和相位函数的优化。

(1) 散射次数的简化。

在三维云可视化的一个云粒子样本中, 云粒子与光线及粒子间相互散射本该有 N 次, 因此要计算出所有的散射路径及散射能量需要很大的计算量。由实验和分析显示, 对于具有高反照率的云粒子, 所有的散射方向中, 前向散射占主要地位, 而且散射能量中绝大部分都集中在前两次散射中, 第四次散射之后, 光线强度就已经很微弱, 之后的散射路径及散射能量可以忽略。因此, 文中只计算发生在光源方向上的前四次前向散射, 即令(4)式中 $N=4$, 可得 $w=l$, $w'=-l$, 且假设式(3)中前向散射发生在很小的立体角 r 内, 由于角度很小, 因此式(3)可以简化为:

$$g(x, l) = r(x, l, -l)I(x, -l)r/4\pi \quad (5)$$

(2) 相位函数的优化。

相位函数对三维云可视化的光照渲染非常重要, 仅仅用简单的瑞利散射, 会忽略很多粒子的散射分布, 使得到的结果不精确。由于粒子散射的性质主要依赖于粒子的形状和大小, 云中所包含的粒子的形状和大小各不相同, 各种粒子散射分布所依赖的相位函数也不相同。以粒子的半径来划分, 当粒子半径远小于入射光线波长时, 该粒子的散射分布由瑞利散射函数控制, 若粒子的半径接近于入射光线波长时, 该粒子的散射分布由米氏散射^[12]函数控制。由于组成云的粒子一般包括水滴、冰晶、雪和霰, 因此, 文中以粒子半径为标准, 将这些粒子分属于不同的类, 把控制这些粒子散射分布的两种相位函数结合起来, 以各种粒子的散射系数与所有粒子散射系数和的比作为该类粒子的权重线性组合^[13]起来表示云中粒子的散射分布。相位函数表达式如下:

$$F(\theta) = \frac{\sum \beta_i F_i(\theta)}{\sum \beta_i} \quad (6)$$

式中, β_i 为不同类别粒子的散射系数, θ 是光线入射方向与散射方向的夹角, $F_i(\theta)$ 为不同类别粒子的所依赖的相位函数。(5)式综合考虑了云中不同粒

子的散射分布, 因此, 更符合真实云粒子与光线的相互作用, 运用它能得到更好的视觉效果。

通过对现有多次前向散射光照模型的简化和改进, 得到最终的到达视线的光照模型为:

$$I(p, w) = I_0(w) e^{-\tau(t)} + \int_{t=0}^S [\beta a(x) e^{-\tau(t)} \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} F(\theta) I(w, w') dw'] dt \quad (7)$$

(7)式中, $I_0(w)$ 是云边缘处在 w 方向上入射光强; $\tau(t)$ 是光强在云内深度 t 处的衰减吸收; β 为散射系数; S 为粒子点 p 到视线的光深。通过式(6)将云中粒子所包含的信息转换为可视化中所需要的不透明值和颜色值, 再通过下述算法得以实现。

3 实现过程

3.1 文中算法

文中采用光线投射算法(Ray-Casting)来实现云的三维可视化, 这对于上述光照模型来说是一个很好的表达。算法原理为: 首先根据数据点值对每一数据点赋以不透明值和颜色值, 再根据各数据点的梯度及光照模型计算出各数据点的光照强度, 然后根据设定的光线入射方向, 发出入射光线, 在该光线穿过三维数据场时取若干等距采样点, 根据前面赋予每一数据点的不透明值和颜色值做三维线性插值, 依次求出每一个采样点的颜色及不透明度进行组合, 从而计算出数据场数据值在屏幕上的显示颜色。算法原理如图1所示。

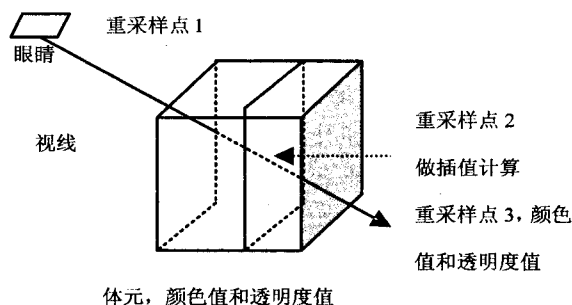


图1 光线投射原理

3.2 算法实现过程

三维云光照模型的实现可分为入射光线的预处理和可视化两个阶段, 即先从入射光的方向计算每个云粒子与入射光相互作用后的光强, 再将计算得到的光强从视点方向可视化出云中粒子。在预处理时, 按距离光源的远近进行排序, 由光线投射原理对分布在体素中的粒子进行重采样和插值, 计算出将要可视化粒子的光强。可视化处理时, 相位函数的调整是关键, 它控制着云粒子的不透明度和颜色值, 然后通过光线投影算法计算出数据场中各个云粒子在屏幕上的显示颜色, 从而可视化出三维云。三维云的光照模型实现过

程如下:

(1) 预处理。

Prep ()

{ 根据云粒子距离入射光线的远近进行处理, p_k 为云粒子;

$l = \text{light. pos} - p_k. \text{pos};$

$w = l;$

$i_k =$ 云粒子与光源远近方向分配的不透明值;

$i_k = i_k * \text{light. color};$

$p_k. \text{color} = a_k \tau_k i_k r / 4\pi;$

$p_k. \text{alpha} = 1.0 - e^{(-\tau_k)};$

}

(2) 可视化。

Render p ()

{ 根据云粒子距离视点的远近进行处理

$w = p_k. \text{pos} - \text{view. pos};$

$p_k. \text{color} = p_k. \text{color} + \text{phase}(w, w');$

}

在可视化过程中,用 $p_k. \text{color}$ 和 $p_k. \text{alpha}$ 可视化云中粒子。然后利用光线投射算法由后向前,计算光线采样点处的光强,累积计算该光线出入到视点处的光强,即该体素中粒子的颜色值和不透明度,依次处理直至完成体素中所有粒子点的颜色值和不透明度的计算。为了更好地可视化云的效果,控制云团边缘的不透明度比中心的不透明度高,这样在云团中心云粒子集中的地方颜色呈现亮白色。

4 实验结果及分析

为了测试经过简化和改进的多次前向散射光照模型的有效性,在图形工作站上利用 VC++ 编程对静态的云进行可视化处理,三维可视化部分通过 OpenGL 函数实现。OpenGL 与硬件、操作系统等的操作无关,通过 OpenGL 函数编写的可视化程序可在不同的系统间移植。因此文中采取 OpenGL 函数库在图形工作站上容易实现三维云光照模型建模、光线投影映射及融合等功能,大大减轻了三维可视化部分的工作难度。文中所使用的数据为 WRF (the weather research and forecasting) 模式下的数值模拟数据,考虑了光线穿过云时与云粒子的相互作用及真实的入射方向,利用改进的三维云多次前向散射光照模型及对三维云物理属性简化处理,其效果如图 2 所示,整个单体云团显得更加明亮,并且和真云一样具有银色的边缘。而单次散射模型如图 3 所示,使整个云团显得暗淡,不够真实。图 4 和图 5 分别展示了多次前向散射模型和单次散射模型下带状积云效果,很明显多次前向散射三维可视化效果更加逼真。

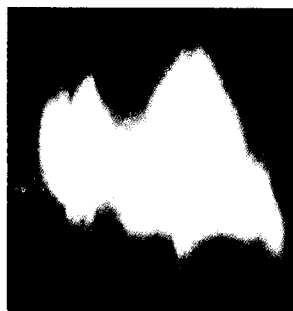


图 2 多次前向散射的单体云

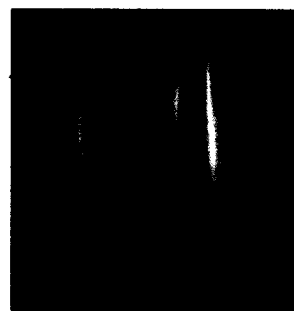


图 3 单次散射的单体云

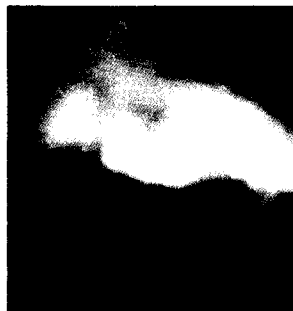


图 4 多次前向散射的积云

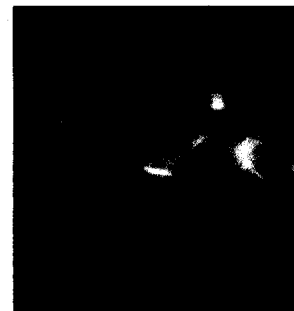


图 5 单次前向散射的积云

5 结束语

(1) 通过简化多次前向散射光照模型的散射次数以及假设视线方向与光线入射方向一致,这样既压缩了现有光照模型的计算量,又把散射能量大部分考虑在内。

(2) 采用瑞利散射和米氏散射相位函数的结合,弥补了使用单一相位函数不能充分展示云中不同粒子与光线相互作用的效果,更加真实地展现了光线在云中的散射情况,也更接近于云的物理属性。

(3) 利用体绘制技术对三维数据场总体显示的特点,直接对三维云进行可视化处理。通过与单次散射光照模型的对比,经过改进的光照模型使可视化的三维云具有真实云的外观特质,视觉效果也够逼真。

参考文献:

- [1] Harrism J, Baxter W, Scheurmann T, et al. Simulation of dynamics on graphics hardware [C] // Proc of ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware. [s. l.]: [s. n.], 2003: 92-101.
- [2] Harrism J. Real-time cloud rendering [C] // Proc of EUROGRAPHICS. [s. l.]: [s. n.], 2001: 76-84.
- [3] Wang N. Realistic and fast cloud rendering [C] // Proc of SIGGRAPH. [s. l.]: [s. n.], 2003.
- [4] 贺怀清, 刘浩翰, 刘金星, 等. 一种改进的立体云模拟方法 [J]. 系统仿真学报, 2008 (10): 2620-2623.

③F1 评估值, $F1 = 2RP/(R + P)$, 其中 c 表示实际属于类 c_i 的样本数, p_i 表示分类器预测为类 c_i 的样本数, cp_i 表示正确分到类 c_i 的样本数。

实验取每类中的 200 篇文章作为训练样本, 其余作为测试样本, 由 2.2 节可以计算出训练样本各类的类密度为 $\{2, 5, 7, 3, 4, 15\}$, $x_0 = 2$, 标准差 $\delta = 4.32$, $x_0 < \delta$, 通过进行两两计算可以得出财经和电脑、财经和人才存在倾斜现象, 分别采用 KNN 算法和 One Class SVM-KNN 算法进行测试, 同时设置分类计时器 t 用于验证分类速度有没有提高, 分类结果数据如表 1 所示。

表 1 KNN 与 One Class SVM-KNN 实验结果

类别	KNN 算法			One Class SVM-KNN		
	查全率	查准率	F1	查全率	查准率	F1
财经	0.7000	0.7303	0.7150	0.7800	0.8654	0.8205
教育	0.8100	0.7712	0.7912	0.8200	0.8826	0.8501
艺术	0.6900	0.7145	0.7020	0.8000	0.8504	0.8246
电脑	0.8200	0.8028	0.8113	0.8700	0.9371	0.9023
科技	0.7900	0.7625	0.7760	0.8100	0.9074	0.8559
人才	0.7100	0.6834	0.6964	0.7700	0.8529	0.8093

由表 1 可以看出由于财经和电脑、财经和人才存在倾斜现象, 采用传统的 KNN 算法进行分类效果不太理想, 而经过改进的算法 One Class SVM-KNN 进行测试, 整体的分类效果明显提高, 而且财经、艺术、人才的分类效果提高幅度更明显。

采用 KNN 算法分类所用时间 $t = 95s$, 采用 One Class SVM-KNN 分类的时间 $t = 45s$, 由此可以看出改进的分类算法在分类速度上也明显提高。

4 结束语

KNN 算法是数据挖掘领域的重要分类方法之一^[12], KNN 算法实现简单被广泛应用于数据挖掘、模式识别、图像处理等领域。文中通过将 One Class SVM

和 KNN 结合组成新的分类算法: One Class SVM-KNN, 通过上面实验分析可知, One Class SVM-KNN 方法可以很好地解决传统的 KNN 方法存在的类倾斜及存储与计算开销大等缺陷, 分类效果明显提高, 是一种可行的方法。

参考文献:

- [1] 唐 菁, 沈记全, 杨炳儒. 基于 Web 的文本挖掘系统的研究与实现[J]. 计算机科学, 2003, 30(1): 60-63.
- [2] 姜 鹤, 陈丽亚. SVM 文本分类中一种新的特征提取方法[J]. 计算机科学与技术, 2010, 20(3): 17-19.
- [3] 马忠宝, 刘冠蓉. 基于支持向量机的中文文本分类模型研究[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(11): 70-72.
- [4] 李荣陆. 文本分类及其相关技术研究[D]. 上海: 复旦大学, 2005.
- [5] Lewis D D, Yang Y, Rose T, et al. Rcv1: A New Benchmark Collection for Text Categorization Research[J]. Journal of Machine Learning Research, 2004(5): 361-397.
- [6] 许高建. 基于 web 的文本挖掘技术[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(6): 187-190.
- [7] Salton G, Wong A, Yang C S. A Vector Space Model for Automatic Indexing[J]. Communications of ACM, 1975, 18(11): 613-620.
- [8] 闫 晨. KNN 文本分类研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.
- [9] Manevitz L, Yousef M. One class SVMs for document classification[J]. Journal of Machine Learning Research, 2002(2): 139-154.
- [10] 冯爱民, 薛 晖, 刘学军, 等. 增强型单类支持向量机[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(11): 1845-1864.
- [11] 曹建芳, 王鸿斌. 一种新的基于 SVM-KNN 的 web 文本分类算法[J]. 计算机与数字工程, 2010(4): 59-61.
- [12] Fernandez J, Montances E, Diaz I, et al. Text categorization by a machine learning based term selection[C]//Proc. of the Database and Expert Systems Applications Conference. Zaragoza: [s. n.], 2005: 253-262.

(上接第 82 页)

- [5] 齐 越, 沈旭昆, 段米毅, 等. 基于 Perlin 噪音绘制云的方法[J]. 系统仿真学报, 2002(9): 1204-1207.
- [6] Max N. Computer Animation of Cloud[C]//Proc of Computer Animation. [s. l.]: IEEE, 1994: 167-174.
- [7] 龚 琳, 王善斌, 顾大权. 基于计算机视觉和粒子系统的三维云模拟[J]. 中国体视学与图像分析, 2008, 13(1): 59-62.
- [8] 石教英, 蔡文立. 科学计算可视化算法与系统[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [9] 吴 晶, 徐晓刚, 陈新来, 等. 云的模拟技术综述[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(4): 1205-1209.
- [10] 胡 香, 游 雄, 武玉国. 体云的光照模型及其算法实现[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(3): 205-207.
- [11] 李玲娟, 张 敏. 云计算环境下关联规则挖掘算法的研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(2): 43-50.
- [12] 徐江斌, 赵 健, 杨 超, 等. 真实感云的快速建模[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 8(8): 1590-1594.
- [13] 李占德, 张政保, 文家福, 等. 用于图像认证的小波域双重脆弱水印算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(2): 181-184.