

基于改进粒子系统模型的“竹”群分布形态仿真算法

罗燕¹ 吴中福¹ 郭选昌² 周尚波¹

(重庆大学计算机学院 重庆 400044)¹ (重庆大学艺术学院 重庆 400044)²

摘要 基于粒子系统模型的基本思想,即个体行为受群体行为控制的模式作为所研究问题的切入点,提出了一种模拟“竹”群分布形态的仿真算法。对原有粒子系统模型的随机分布算法进行了改进,使随机分布的粒子在整体分布上打破了矩形的规则形状,并将改进后的算法应用于“竹”群分布形态的仿真中,从而可以较真实地模拟出“竹”群的不同分布形态,这为植物的仿真模拟提供了一种新的解决方案,并将粒子系统模型的应用范围扩展到了植物的群体生长方式之中。

关键词 改进粒子系统,“竹”群分布形态,仿真算法

Simulation Algorithm for “Bamboo” Distributional Pattern by Improved Particle System

LUO Yan¹ WU Zhong-fu¹ GUO Xuan-chang² ZHOU Shang-bo¹

(College of Computer Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)¹

(College of Art, Chongqing University, Chongqing 400044, China)²

Abstract Based on the basic idea of particle system that the individual behavior is controlled by groups behavior, an improved simulation algorithm for “Bamboo” distributional pattern was presented. In this paper, the improved simulation algorithm makes the random distribution of particles to break the rules of rectangular shape. Then, the improved algorithm can simulate different “Bamboo” distributional pattern more really. This paper gave a new solution in plant simulation and made the particle system to be applied in the plant growth pattern.

Keywords Improved particle system, “Bamboo” distributional pattern, Simulation algorithm

1 引言

自然景物的生成与模拟是计算机图形学的一个热门课题。烟火爆炸、云雾闪电、瀑布浪花、飞沙尘埃等动态图像的生成,在航空航天、影视广告、装潢设计、虚拟场景中有着广泛的应用。但是这类物体的形状、形态随时间的推移会动态地、随机地发生变化,所以很难用常规的建模方法及模拟技术进行仿真。

粒子系统模型是用于不规则模糊物体图像建模生成的一种方法。Reeves^[1]于1983年提出的粒子系统模型是从物体运动的原理出发,通过求解一组力学方程来得到质点在各个时刻的状态。它采用了一套完全不同于以往造型或绘制系统的方法来构造和绘制景物,景物被定义为由成千上万个不规则的、随机分布的粒子组成,每个粒子都有一定的生命周期,每时每刻都在不断地运动和改变形态,由诸多粒子的集合而不是个别粒子形成了景物的整体形态和特征及动态变化。粒子系统充分体现了不规则模糊物体的动态性和随机性,能很好地模拟火、云、水、森林和原野等自然景观,因此被公认为是模拟不规则模糊物体最成功的一种图形生成方法,也是迄今为止被认为是最成功的一种不规则模糊物体图形生成算法。粒子系统模型具有良好的随机性与动态性,能逼真地再现动态景物,因此,研究用粒子系统模型来模拟自然景物有着重要

的科学意义和广泛的应用前景。

粒子系统造型法具有普适性,设计者可根据个人的喜好和不同应用需求,设计出具有个人风格的粒子系统模型,以获得不同的模拟效果。

Reeves W. T. 于1983年首次提出粒子系统模型后,又于1985年和Blau^[2]发展了该系统的模型思想,他们用“volume filling”基本单元来生成随时间改变形态但又基本保持不变的实体,如随风飘动的花草树叶,之后,使粒子系统从理论到技术都得到了进一步的发展;如Fournier A.等在研究海浪形态模型中利用粒子系统模型模拟浪花,提出了海浪模型和浪花形成的条件;粒子运动速度与海浪曲面传播速度之间的差异要满足一定的条件,即该差异要超过一定的阈值,否则会产生泡沫;而Reed等人则用粒子系统成功地模拟了闪电;另外还有Reynolds在其群体行为研究中,极大地扩展了粒子系统的功能,将它作为一种建模工具,他进而提出了粒子间相结合的思想,使粒子与粒子之间、粒子与环境之间进行交互,阐明了利用大量的简单图元间的交互作用可产生复杂的行为现象;David E. Breen就是利用“交互粒子”模拟了布匹、织物。总之,粒子系统模型能够创建各种动画效果,已经应用到可视化虚拟环境仿真的各个方面。国内近年来有许多学者对粒子系统模型进行了研究、探索和应用,并取得了一定的成果。如徐迎庆等人^[3]利用粒子系统模型模拟了水面溅起的水沫以及

到稿日期:2009-02-02 返修日期:2009-06-08

罗燕 博士研究生,主要研究方向为数字艺术;吴中福 教授,博士生导师;郭选昌 教授,博士生导师;周尚波 教授,硕士生导师。

流水与石头碰撞产生的水花等;王骥等人^[4]利用粒子系统开发了书法书写的仿真系统。

目前粒子系统模型的应用范围尚未涉及到植物的群体生长方式。本文将运用粒子系统模型来模拟“竹”群的生长方式,这将对植物的仿真模拟提供一种新的解决方案。

2 粒子系统模型

2.1 基本理论

粒子系统模型是应用小规则模糊物体建模并生成图像的一种方法,它将景物定义为大量随机分布的粒子集合体。它不是一个静态的整体,而是随时间的推移处在不断运动中的粒子集合体。它通过简单图元来表示景物的整体形态和特征及动态变化,充分体现了小规则模糊物体的动态和随机性,被认为是迄今为止模拟小规则模糊物体最为成功的一种图形生成算法。

粒子系统模型可以说是一种基于物理模型来解决问题的方法,它的核心在于对物理模型的理解和分析,即对微小粒子模型运动规律的提取。

粒子系统模型理论主要由以下 4 部分组成^[5]:

1) 物体由粒子组成。粒子系统模型中,把运动的模糊物体看作是由若干具有一定属性的粒子组成的,这些属性包括粒子的形状、大小、颜色、透明度、生命周期等,且这些属性随时间不断发生变化。这些粒子以连续或离散的方式充满整个空间,并且不停地运动。

2) 粒子的独立属性。一方面粒子之间是独立的,不存在相互关系,且粒子不可穿透;另一方面粒子不与场景中任何其他物体相交。

3) 粒子有生命周期。粒子系统模型中的粒子都有一定的生命周期,包括“产生”、“活动”和“消亡”3 个阶段。

4) 粒子的运动机制。粒子在存活期间受群体行为控制而按照一定的运动规律在场景中运动。

2.2 形式化描述

定义 1 粒子被定义为实数域上的一个 n 维向量,表示为^[6]:

$$P^n = \{ Attri_1, Attri_2, \dots, Attri_i, \dots, Attri_n \mid n \geq 3, n \in I \} \quad (1)$$

其中, $Attri_1, Attri_2, \dots, Attri_i, \dots, Attri_n$ 是粒子的 n 个属性,一般包括粒子的空间位置、运动速度及加速度、大小、颜色、亮度、形状、生存期以及剩余生存期等。单个粒子是组成粒子系统模型的基本元素。

定义 2 粒子映射是上述单个粒子到正整数集的映射,其中每一个粒子具有一个索引,表示为 I_i ,到 P^n 的映射为:

$$Q(t) = \{ Pt; I_i \rightarrow P^n \mid I_i \in J, n \geq 3, n \in I, t \in R \} \quad (2)$$

$$W(i) = P^n \quad (3)$$

式(3)是索引为 i 的粒子的性质和状态。

定义 3 粒子系统是粒子映像集的有限集合,表示为:

$$S(t) = \{ Q(t) = \{ t_0, t_1, \dots, t_m \} \} \quad (4)$$

S 表示粒子系统在时刻 $t_0, t_1, \dots, t_m$ 的状态集合, $S(t_0)$ 是初始时刻粒子系统的状态。

2.3 生成粒子系统模型的基本步骤

2.3.1 生成粒子系统模型的一般步骤

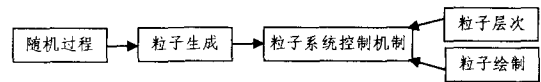
生成粒子系统模型的一般步骤^[7]为:首先根据待描述的具体对象的外观特征进行分析,得到粒子的外观属性;然后研究所描述对象的运动及变化特点,抽象出粒子的运动和变化规律,并对所得到的属性进行定量描述;最后逐帧生成图像。即:

- 1) 产生一定数量的粒子加入系统;
- 2) 赋予每个粒子以一定的初始属性;
- 3) 删除那些已经超过其生命周期的粒子;
- 4) 根据粒子的动态变化对粒子进行变换及改变属性;
- 5) 绘制并显示由有生命的粒子所组成的图形。

2.3.2 本文设计的粒子系统模型的步骤

粒子系统造型方法具有普适性,设计者可根据个人的喜好和不同应用需求,设计出具有个人风格的粒子系统模型,以获得不同的模拟效果。

本文根据应用需要,设计出模拟“竹”群的分布形态的粒子系统模型,其步骤如下。



2.4 粒子系统模型的产生

粒子的产生包括粒子产生的空间、粒子产生的时间以及数量。

无论粒子系统模型所表现的对象怎样,粒子总是产生在一定的空间范围内,如烟花的粒子系统模型,火花粒子产生于爆炸的中心点处;而在雨、雪的粒子系统模型中,雨点和雪花粒子是在整个天空中产生的;在火焰的粒子系统模型中,火焰粒子是在燃烧物表面产生的;对于地面爆炸,则可假设碎片粒子是产生在装药范围内的等等。粒子的初始位置可以设置在球形区域、球面区域、环形区域、矩形区域等。

除了确定产生粒子的空间范围外,还需研究粒子的初始分布规律。

通常设产生的粒子坐标为 x, y, z , 则它们满足一个约束方程,表示为 $f(x, y, z) = 0$, 且 x, y, z 服从某一概率分布 $P(x, y, z)$ 。

粒子产生的时间及数量。粒子系统模型中粒子的产生分为两个部分:一是初始时产生的粒子,这部分粒子的数量十分关键,一般都较大,它在很大程度上决定了模糊物体的形态;二是为补充系统中消亡的粒子,每隔一定的时间周期如每帧新产生的粒子,这部分粒子的数量较小。

粒子通过受控的随机过程加入到粒子系统中,而初始粒子数量的确定一般采用以下两种方式^[8]:

1) 给定粒子数量的平均值和随机变化范围,实际粒子数量 $NPartS_f$ 由式(5)确定:

$$NPartS_f = MeanPartS_f + Rand() \times VarPartS_f \quad (5)$$

其中, $Rand()$ 是在 $[-1, 1]$ 上均匀分布产生的随机数的函数, $MeanPartS_f$ 是预先设定的粒子平均数,其值是一个经验值,可通过实验得到, $VarPartS_f$ 是预先设定随机数值的取值范围。

2) 产生新粒子的数量依赖于被描述物体在屏幕上所显示区域的大小,预先设定显示区域单位尺寸上粒子的数量及其随机分布和范围。在产生新粒子时,系统根据透视投影参数

计算出被显示物体在屏幕上所占区域的尺寸,然后按尺寸确定产生的粒子数。其计算公式如下:

$$NPartS_y = (\text{MeanPartSsa} + \text{Rand}() \times \text{VarPartSsa}) \times \text{ScreenArea} \quad (6)$$

获中,MeanPartSsa 是预先设定的单位显示区域内的粒子平均数,VarPartSsa 是单位显示区域内粒子数的随机变化范围,ScreenArea 是粒子系统显示区域的面积。这种方法的优点是粒子系统细节的可控程度与屏幕显示区域相一致。

3 粒子系统模型随机分布的改进算法

因为粒子系统造型方法具有普适性,我们可根据个人的喜好和不同应用需要,设计出具有个人风格的粒子系统模型,以获得不同的模拟效果。

传统的粒子系统模型存在着一定的局限性,如在利用粒子系统模型进行自然现象和不规则物体的模拟时,在实现上的最大缺憾是当粒子系统的粒子数达到数千数量级后,则难以达到实时的效果,因此通常都会设置粒子数的上限。所以在近年的研究中,将层次细节 LOD 等技术引入到粒子系统,以满足粒子系统模型所需的数据量,加快实时渲染速度。

本文将对粒子系统模型在二维平面上随机分布的算法进行改进,用于对“竹”群的分布形态进行仿真模拟。传统的粒子随机分布通常采用范围约束,如在 $[M, N]$ 范围内对粒子的位置随机取值,当二维平面随机取的粒子达到一定数量时,粒子会形成矩形形状,该矩形的高度与宽度等于 $(N-M)$,由 MEL 语言提供的程序所生成的粒子系统模型随机分布时就被限制在矩形边框内,如图 1 所示。



图 1 原有粒子系统模型的随机分布示意图

对此模型算法进行改进,以便随机产生的粒子在整体分布上打破矩形的规则形状,具体是:

设在空间 W 中,一凸多边形 P 的顶点对应一组向量 $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_n\}$, T 为由多边形 P 所围成的区域内的空间点的集合,则这些空间点 $T_k \in T$ 可由以下公式定义:

$$o \in \{ \langle o_1, o_2, o_3, \dots, o_n \rangle \mid o_i \text{ 为任一实数}, i=1, 2, \dots, n \} \quad (7)$$

$$s = \sum_{k=1}^n o_k \quad (8)$$

$$f_i = \frac{o_i}{s} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (9)$$

$$T_k = v_1 f_1 + v_2 f_2 + v_3 f_3 + \dots + v_n f_n \quad (10)$$

式(7)中, O 为系数集合;式(8)为求系数集合 O 中的元素之和;式(9)表示由所有系数与系数之和的比值得到的新的系数集合;式(10)中 T_k 为最终向量。

改进的算法流程描述如下:

Step1 确定边的数量;

Step2 计算边上点的空间位置;

Step3 生成随机的系数集合;

Step4 对系数集合整体求和,得到值 S ;

Step5 用生成的随机系数集合与 S 的比值作为新的系数集合;

Step6 将新的系数集合的元素乘以点集,得到新的点集合;

Step7 对新的点集合求和,得到最终的随机点,它是在生成的点集所围成的凸多边形内的;

改进后的 MEL 程序代码如下:

```
global proc vector getRndVector(float $radius){ //新的随机算法
    float $v[60];
    float $f[60];
    vector $cv[60];
    float $total=0;
    float $cvx;
    float $cvz;
    int $i;
    vector $rv=<<0,0,0>>;
    for($i=0;$i<60;$i++) //生成集合 O,以及向量集合 V
    {
        $v[$i]=rand(0,10);
        $total+=$v[$i];
        $cvx=sin($i*6)*$radius;
        $cvz=cos($i*6)*$radius;
        $cv[$i]=<<$cvx,0,$cvz>>;
    }
    for($i=0;$i<60;$i++) //计算 f,并计算最终随机向量
    {
        float $tv=$v[$i];
        $rv=$rv+($cv[$i]*$tv);
    }
    $rv=$rv/$total;
    return $rv;
};

int $count=1000;
int $i=0;
string $cmd="particle ";
for($i=0;$i<$count;$i++){
    vector $vv=getRndVector(100); //使用新的随机点的生成
    $cmd+="-p "+$vv.x+" 0 "+$vv.z;
};
eval($cmd);
}
```

改进后的粒子系统模型的随机分布情况如图 2 所示,其打破了粒子系统模型的随机分布只在矩形边框内的限制,可根据实际需要,使粒子系统模型的随机分布呈任意凸多边形。

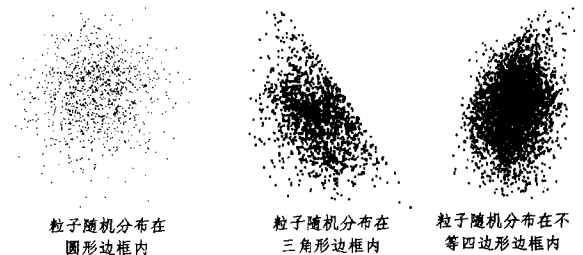


图 2 改进后的粒子系统模型的随机分布示意图

4 改进的粒子系统模型用于“竹”群的分布形态模拟

4.1 “竹”群的分布形态分类

竹类^[9]属单子叶禾本科植物,竹子的分布很广,全球皆有生长,全世界约有 65 属,1250 多种。竹子喜爱生长在温暖潮湿的地区。因此,主要分布在低纬度的热带或亚热带季风气候区,我国是竹类资源最丰富的国家,素有“竹子王国”之称,目前有竹子 500 多种,竹林面积 720 万公顷,竹林种类、面积和蓄积量均居世界前列。

竹子和一般树木有很大的差异。竹子在地上的部分是由有节的竹秆、竹枝和竹叶组成的。竹秆的基部连接着地下茎。地下茎是竹类植物在土壤中横向生长的茎,有节,节上生根,节侧有芽,可以萌发出新的地下茎或出土成竹。按植物学观点,地下茎是“竹”的主茎,竹秆是“竹”的分枝,一片竹林尽管地上分散有许多竹秆,而在地下则互相连接于同一或少数“竹”的主茎。竹类植物地下茎是竹株间相互连接进行物质、能量交换的重要器官,又是竹林延伸扩展和维系竹林稳定的器官。同一属的竹种具有相同类型的地下茎,因此地下茎是竹类植物分类的重要特征之一。

竹子的种类,是根据它的生长特点来鉴别的。其主要是从它的繁殖类型、竹秆外形和竹箨的形状特征来识别的。依生长方式即分布形态分类,可分为 3 大类:散生型、丛生型和混生型。

散生型:是由地下茎上的芽繁殖新竹。地下茎细长,横走地下,称为竹鞭。竹鞭有节,节上生根,称为鞭根;节上生芽,交互排列,有的芽抽成新鞭,在土壤中蔓延生长,有的芽发育成笋,出土长成竹秆,稀疏散生,逐渐发展为成片竹林,如毛竹、斑竹、水竹、紫竹等。毛竹又名楠竹,是散生型竹的代表,禾本科竹亚科刚竹属,单轴散生型,一株尚未向上发芽的雏毛竹的根系可以向周围发展十多米,向地下深扎近 5 米。运用前面提到的粒子系统随机分布的改进算法即可模拟出散生型竹的分布形态。

丛生型:是母竹基部的芽繁殖新竹。这种类型竹的地下茎不能在地下作长距离的蔓延生长,由芽出笋长成的新竹一般都靠近老秆,形成密集丛生的竹丛,由秆基侧堆集成群,所以看起来聚在一起,一丛一丛的,民间称“竹兜生笋子”,如慈竹、硬头簧、麻竹、单竹等。慈竹是丛生型竹的典型代表,高大、筒长、叶葱浓。地下部分生长特征是密集,不向他处延伸,并有向地面拱起的特性。丛生型描述算法见 4.2 节。

混生型:既有在地下横向生长的竹鞭,并从鞭抽笋芽长竹;又有从秆基芽眼萌发成笋,长成竹秆,兼有散生型和丛生型地下茎的特点,如苦竹、棕竹、箭竹、方竹等。将前面散生型与丛生型模拟进行合并,即得到混生型竹的模拟效果。

4.2 模拟丛生型“竹”群分布形态的粒子系统模型改进算法

用以模拟丛生型“竹”群分布形态的粒子系统模型的改进算法流程描述如下:

- Step1 确定边的数量;
- Step2 确定一个随机空间位置;
- Step3 计算边上点的空间位置;
- Step4 生成随机的系数集合;

Step5 对系数集合整体求和,得到值 S ;

Step6 用生成的随机系数集合与 S 的比值作为新的系数集合;

Step7 将新的系数集合的元素乘以点集,得到新的点集合,并加上随机向量;

Step8 对新的点集合求和,得到最终的随机点,它是在生成的点集所围成的凸多边形内的。

4.3 仿真实验结果

图 3 是用改进的粒子系统模型算法模拟散生型“竹”(如毛竹)的分布形态示意图。

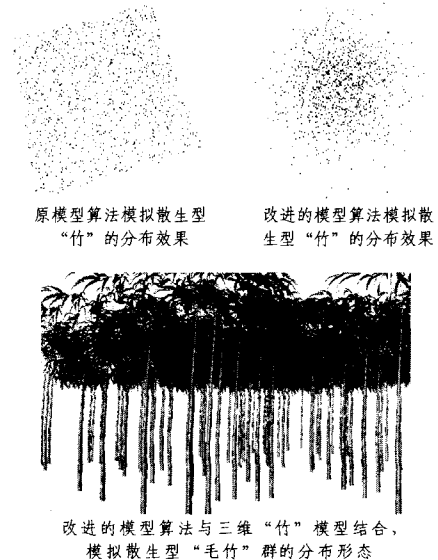


图 3 改进的粒子系统模型算法模拟散生型“竹”(如毛竹群)的分布形态

图 4 是改进的粒子系统模型算法模拟丛生型“竹”(如慈竹)的分布形态示意图。

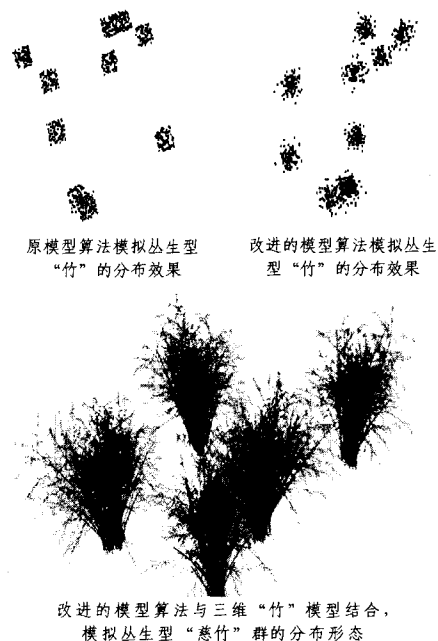


图 4 改进的粒子系统模型算法模拟丛生型“竹”(如慈竹群)的分布形态

图 5 是改进的粒子系统模型算法模拟混生型“竹”(如箭

竹)的分布形态示意图。

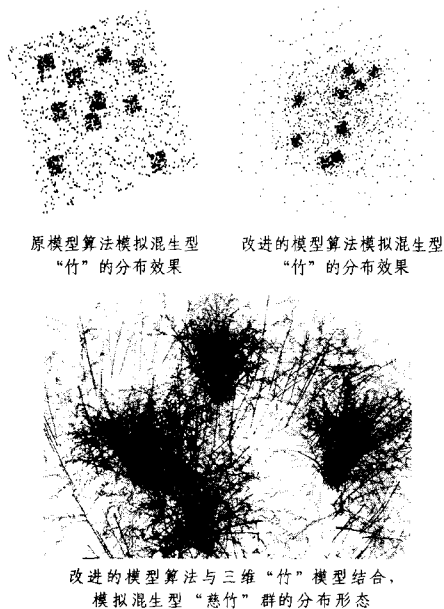


图5 改进的粒子系统模型算法模拟混生型“竹”(如箭竹群)的分布形态

结束语 本文基于粒子系统模型理论,提出了一种对“竹”群分布形态仿真的改进模型算法,该算法可以较真实地模拟出“竹”群的不同分布形态,在对植物的仿真模拟方面给出了一种新的解决方案,并将粒子系统的应用范围扩展到植物的群体生长方式之中,即可应用于植物学研究、影视特技、

游戏开发、虚拟现实系统等多个领域。

参考文献

(上接第286页)

结束语 经典的统计阈值方法采用某种形式的类方差和作为阈值选择的准则,未考虑实际图像本身的特性,对于目标和背景具有相似灰度统计分布的图像分割的效果不甚理想。为此,本文提出了一种新的统计图像阈值方法。此方法利用阈值分割后两个类的标准偏差来刻画类的灰度分布状况,定义了一个新的阈值选择准则,并通过最小化此准则来确定最佳分割阈值。为了验证本文方法的有效性,在这类图像上进行了系列实验。实验结果表明,相对于现有的几种经典阈值分割方法,本文方法的分割效果更好,尤其是对红外图像的分割效果更为明显。图像分割质量评定测度 MSSIM(平均结构相似性)和 ME(错分类误差)的评测结果也证实了本文方法的有效性。另外,对算法复杂性的分析和实际实验表明,本文方法基本满足实时分割的需要。

参考文献

- [1] Bazi Y, Bruzzone L, Melgani F. Image thresholding based on the EM algorithm and the generalized Gaussian distribution[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(2): 619-634
- [2] 杨有, 尚晋. 一种政府资源档案图像的二值化方法[J]. 计算机科学, 2007, 34(3): 227-229
- [3] Qiao Y, Hu Q, Qian G, et al. Thresholding based on variance and intensity contrast[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(2): 596-608
- [4] Sang N, Li H, Peng W, et al. Knowledge-based adaptive thresholding segmentation of digital subtraction angiography images[J]. Image and Vision Computing, 2007, 25(8): 1263-1270
- [5] Wang S, Chung F, Xiong F. A novel image thresholding method

- [1] Reeves W T. Particle system. A technique for modeling a class of fuzzy objects[J]. Computer Graphics, 1983, 17(3): 359-376
- [2] Reeves W T, Blau R. Approximate and Probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle system[J]. Computer Graphics, 1985, 19(3): 313-322
- [3] 徐迎庆, 苏成, 李华, 等. 基于物理模型的流水及波浪模拟[J]. 计算机学报, 1996(增刊)
- [4] 罗军, 王玲. 基于大规模粒子系统的实时喷泉模拟[J]. 计算机与信息技术, 2007(4): 25-26
- [5] Zhu Jun, Lin Hui, Xu Bingli. Study on simulation of air pollution dispersion based on the particle system method[J]. Gaojishu Tongxin/Chinese High Technology Letters, 2009, 19(3): 308-313
- [6] 王红霞. 基于粒子系统的烟花仿真与实现[D]. 长春: 东北师范大学, 2008: 13
- [7] 袁霞, 张玉琢. 粒子系统方法及其应用[J]. 云南师范大学学报, 2003, 23(3): 14-16
- [8] Feng Y T, Han K, Owen D R J. Discrete thermal element modeling of heat conduction in particle systems; Pipe-network model and transient analysis[J]. Powder Technology, 2009, 193(3): 248-256
- [9] <http://zhidao.baidu.com/question/24138544.html?fr=qr>
- [10] 黄贤英, 张丽芳. 基于粒子群优化的模糊聚类算法[J]. 重庆工业大学学报: 自然科学版, 2008, 22(11): 120-123

based on parzen window estimate[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(1): 117-129

- [6] Otsu N. A threshold selection method from gray level histogram[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66
- [7] Sahoo P K, Soltani S, Wong A K C. A survey of thresholding techniques[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1988, 41(2): 233-260
- [8] Hou Z, Hu Q, Nowinski W L. On minimum variance thresholding[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(14): 1732-1743
- [9] Pun T. A new method for grey-level picture thresholding using entropy of histogram[J]. Signal Processing, 1980, 2(3): 223-227
- [10] Kapur J N, Sahoo P K, Wong A K C. A new method for grey-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 29(3): 273-285
- [11] Kittler J, Illingworth J. Minimum error thresholding[J]. Pattern Recognition, 1986, 19(1): 41-47
- [12] Sezgin M, Sankur B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 146-165
- [13] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment; from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612
- [14] Martens J B, Meesters L. Image dissimilarity[J]. Signal Processing, 1998, 70(3): 155-176
- [15] Wang Z, Bovik A C. A universal image quality index[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81-84
- [16] Yasnoff W A, Mui J K, Bacus J W. Error measures for scene segmentation[J]. Pattern Recognition, 1977, 9(4): 217-231