

水波特效模拟原理及其快速实现方法*

陈和平, 王 早

(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘 要: 在对粒子系统和水波原理进行分析的基础上, 对光的折射、水波扩散及水波衰减等内容进行了详细探讨, 并给出了水波振幅线性近似计算公式和水波特效模拟快速实现方法。

关键词: 水波; 快速模拟; 线性计算公式

中图法分类号: TP393. 04 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3695(2005) 04-0252-02

Principle of Water Wave Simulation and Its Rapid Realization Method

CHEN He-ping, WANG Zao

(College of Information Science & Engineering, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan Hubei 430081, China)

Abstract: Discusses the refraction of light, the diffusion and the attenuation of water wave in detail based on the analysis of particle system and water wave principles, and puts forward a linearity approximative formula for calculatting the water wave amplitude and the rapid realization method of water wave simulation.

Key words: Water Wave; Quickly Simulation; Linearity Formula

随着计算机多媒体应用的普及和深入, 大多数游戏和多媒体软件往往借助于水波特效以增强其友好度和美观度。实现水波特效模拟的方法是根据粒子系统原理、光的折射原理和水波的扩散与衰减等特性进行计算, 并尽可能地达到快速且逼真的显示效果。

由于人类视觉暂留现象的缘故, 若要连续地显示平滑的水波, 每秒钟至少应渲染 20 帧以上。采用常规的精确算法进行水波的实时模拟, 其计算工作量往往偏大, 在目前条件下难以实现。围绕此问题的解决方案是设法在水波模拟过程中采用某种近似计算方法, 以加快水波的模拟计算及显示速度。

1 基本原理

1.1 粒子系统

粒子系统最早由 Reeves W. T. 在 1983 年提出, 主要用来解决由大量按一定规则运动或变化的微小物质组成的大物质在计算机上的生成与显示问题。该思想一经提出便得到了相当广泛的应用。如用于模拟原子弹爆炸、云层变化及水波扩散等。这类物质的共性是它们既没有固定的形状, 也没有规则的几何外形, 并且其外观还会不断地随着时间的变化而发生不确定的变化。显然, 传统的欧几里德几何建模方法是无法用来模拟上述物质的。

采用 Reeves W. T. 所提出的粒子系统进行水波模拟的主要优点是可以不用建立复杂的微分方程, 也不需要进行精确的计算。在该算法中, 为了满足求解的基本条件, 可作两点假设: ①水面上的点都是离散的, 并且各点均满足波的传播曲线; ②任选一幅图片作为背景, 并将图中的每一个像素视为粒子系统

中对应的一个粒子。在上述假设下, 一幅静态的背景图片变成了一个能产生动态水波的“水池”。

1.2 水波模拟原理

1.2.1 光的折射

光的折射原理如图 1 所示。

在 t_0 时刻, 从 p_1 点发出的光线由水中射向空气时, 由于折射角 β 大于入射角 α , 折射光线远离法线。当折射光线进入人眼后, 根据光沿直线传播的经验, 人会感觉到该光线是从 p_0 点发出的。考虑到水波的扩散性, 在 t_1 ($t_1 = t_0 + t$, $t > 0$) 时刻, p_2 点的图像移到了 p_1 点的位置上, 此时, 人所感觉到的从 p_0 点发出的光线应为 p_2 点的图像。因此, 由于光的折射, 在水波模拟算法实现中, 应将 p_1 和 p_2 点的图像分别在 t_0 和 t_1 时刻显示在 p_0 点的位置上。

1.2.2 水波扩散

当水面处于静止时, 各点的折射程度相同, 人眼所看到的水中物体的位置偏差与其实位置的偏差完全一样, 即人眼所看到的图像和实际物体在整体上是相同的; 而当水面出现水波时, 由于水面每一点的折射程度不同, 人眼所看到的则是扭曲了的景物。正是由于水波的扩散性, 连续的、有规律的扭曲图像便以各种奇妙的水波特效展示在人们的眼前。

其实, 在同一时刻, 水面上各点高度相对于基准水平面是不同的, 水波会造成水面上各点的振幅不相等, 从而导致了折射度的不一样。问题的关键是要求出任意时刻水面各点的振幅。最直接的方法是根据波动方程, 将时间代入并解出振幅, 但在计算过程中会用到不少的 $\sin(x)$ 和 $\cos(x)$ 三角函数, 这对实时渲染来说, 显然是不现实的。以下给出一种生成水波特效的快速线性计算方法。

考虑到计算速度上的因素, 设有一线性公式, 在任一时刻, 可根据与某点相邻的上、下、左、右四点及自身的振幅计算出下

一时刻该点的振幅,那么据此公式,便可求出任意时刻水面上任意一点的振幅。

在图 2 中,设水面某点 $P_{i,j}$ 在 t_0 时刻的振幅为 $X_{i,j}$, 在 t_1 时刻的振幅为 $X'_{i,j}$, 设想 $X'_{i,j}$ 除了与 $X_{i,j}$ 相关外, 还受到其上、下、左、右四个相邻点的影响(为了简化计算, 设各点对 $P_{i,j}$ 的影响是相同的, 并略去其他点的影响), 因而, 可建立一个如下的水波振幅线性计算公式:

$$X'_{i,j} = a \cdot (X_{i,j-1} + X_{i,j+1} + X_{i-1,j} + X_{i+1,j}) + b \cdot X_{i,j} \tag{1}$$

式(1)中, $X'_{i,j}$ 点为 $P_{i,j}$ 在 t_1 时刻的振幅, a, b 为待定系数, $X_{i,j}, X_{i,j-1}, X_{i,j+1}, X_{i-1,j}$ 及 $X_{i+1,j}$ 分别为图 2 中各点在 t_0 时刻所对应的振幅值。

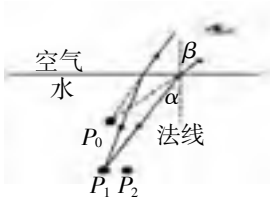


图 1 光的折射原理图

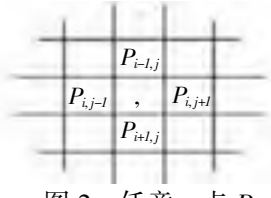


图 2 任意一点 $P_{i,j}$ 及其周围四点的分布图

理想条件下,可设水的阻力为 0。根据能量守恒定理, 水的总势能应保持不变,即在任何时刻,所有点的振幅之和为一常量, 因此,对于 t_0 和 t_1 , 应有式(2) 成立:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X'_{i,j} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{i,j} \quad (m, n > 0) \tag{2}$$

设在系统可视范围内, 总共可显示 k ($k = m \times n$, m 为像素行数, n 为像素列数) 个点, 按式(1) 对各点求和并代入式(2), 可得:

$$a \cdot \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{i,j-1} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{i,j+1} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{i-1,j} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{i+1,j} \right) + b \cdot \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{i,j} \right) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{i,j} \tag{3}$$

由于上式中 $X_{i,0}$ 和 $X_{i,n+1}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 所对应的各点均已超出可显范围, 故改用对应的各边界点的振幅值进行近似计算, 即假设:

$$X_{i,0} \approx X_{i,1} \text{ 且 } X_{i,n+1} \approx X_{i,n} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad \text{同理可设:}$$
$$X_{0,j} \approx X_{1,j} \text{ 且 } X_{m+1,j} \approx X_{m,j} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

将上述假设代入式(3), 经合并整理后, 可得:

$$(4a + b) \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{i,j} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{i,j} \tag{4}$$

一般地, 由 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{i,j}$ 不等于 0, 由式(4) 可得:

$$4a + b = 1 \tag{5}$$

解式(5), 可得一组最简解: $a = 1/2, b = -1$ 。
由于 $1/2$ 可采用移位运算实现, 不必进行除运算, 因此, $a = 1/2, b = -1$ 为最佳解。

将上述解代入式(1), 最终可得水波振幅线性计算公式:

$$X'_{i,j} = \frac{X_{i,j-1} + X_{i,j+1} + X_{i-1,j} + X_{i+1,j}}{2} - X_{i,j} \tag{6}$$

从式(6) 可得出关于水波扩散过程中水面各点振幅的近似计算方法的一般性结论: 已知某一时刻水面上任意一点的振幅, 则该点下一时刻的振幅等于与该点紧邻四点的振幅之和除以 2 并减去该点的原振幅。

1. 2. 3 水波衰减

在水波振幅近线性似计算式(6) 中, 由于没有考虑到水波的衰减问题, 经过近似处理后, 所计算出的振幅值趋于偏大, 其累积效应会造成水波振动加剧, 这与水波在实际扩散过程中没

有新的能量产生并会逐步衰减的情况不符。为此, 在算法中应考虑增加水波衰减效应的模拟功能, 其实现方法是每次将计算出的新振幅按一定的衰减率减小。因移位运算具有快捷性, 衰减率可选取 $1/16$ 或 $1/32$ 等。

2 算法实现

在算法实现中, 将水波的扩散过程视为水波能量的扩散过程。由于前、后时刻的总能量相等, 不断地改变、交换和显示两个缓冲区中的数据, 水波特效便一蹴而就。

计算过程中仅采用了简单的加、减和位移运算, 其运算速度与调用大量三角函数相比, 具有较为明显的优势。

程序中定义了两个与图片对应的二维数组 `buf1[ PoolHeight][ PoolWidth]` 和 `buf2[ PoolHeight][ PoolWidth]`, 用于保存前、后时刻各点的振幅。其中 `PoolHeight` 为图片像素的行数, `PoolWidth` 为图片像素的列数。设初始状态时“水池”水面为一平面, 各点的振幅值均为 0(将 `buf1` 和 `buf2` 赋初值 0)。

水波振幅线性计算式(6) 对应的源代码如下:

```
void RippleSpread( )
{
    for ( int i = 0; i < PoolHeight; i ++ )
        for ( int j = 0; j < PoolWidth; j ++ )
        { // 波能扩散
            buf2[ i ][ j ] = (( buf2[ i - 1, j ] + buf2[ i, j - 1 ] + buf2[ i, j + 1 ] + buf2[ i + 1, j ] ) > > 1) ( buf2[ i ][ j ] ;
            // 波能衰减, 衰减率取 1 / 32
            buf2[ i ][ j ] - = buf2[ i ][ j ] > > 5;
        }
    // 交换波能数据缓冲区
    short * * ptmp = buf1;
    buf1 = buf2;
    buf2 = ptmp;
}
```

为了形成水波, 需要给平静的“水池”加入波源, 即往其中注入能量。俗话说: “一石激起千层浪”, 在生活中, 形成水波最简单的途径是向水中投掷一块石头, 所产生的波源大小和能量与石头的体积、重量及投掷力等因素有关; 在算法中, 形成水波的途径是通过修改波能数据缓冲区 `buf` 的方法来达到模拟效果。执行一条赋值语句 `buf[ x ][ y ] = - n` 等效于在点(x, y) 处产生一个负的“尖脉冲”。经过实验, n 的取值范围在 $32 \sim 128$ 之间较为合适。模拟波源半径的方法也较为简单, 即以入水中心点为圆心, 取一个半径等于“石头”的圆, 并在圆内各点处都产生一个其绝对值等于 n 的负“尖脉冲”。

3 结束语

本文分析了水波特效模拟原理, 并对其实现机制进行了探讨。在水波振幅线性计算公式的推导过程中, 虽进行了某些近似处理, 但实践表明, 采用该方法, 在计算速度和图像显示方面均可获得理想的效果。笔者在基于 VC++ 6.0 和 Direct 9 的环境下, 在某商业游戏软件的开发过程中, 成功地运用上述方法实现了水波特效模拟, 其运行效果令人满意。图 3 为算法的运行效果示意图。

本文所探讨的水波特效模拟原理及其快速实现方法对于模拟其他一些满足粒子系统的物质所产生的动(下转第 255 页)

因为 T 是一正交矩阵, 所以离散 K-L 变换是可逆变换, 逆变换为

$$X = T^T Y + \bar{X}$$

故可以由变换后的 J, K 和 L 分量反算出 R, G 和 B 分量。

2 彩色图像的平滑滤波方法

通过离散 K-L 变换, 可以将一幅彩色图像的 R, G 和 B 颜色三分量(一般情况下是相关的)变为零均值的、互不相关的 J, K 和 L 分量。基于 J, K 和 L 分量的不相关性, 可以灵活地分别运用不同的方法或同一方法的不同参数对其进行平滑滤波, 不会产生不相容的负面效果, 这正是本文方法的优点。

对 J, K 和 L 分量的滤波时, 采用邻域平均的方法, 卷积核 h 采用 Gaussian 核, 结合 J, K 和 L 的不同方差, 选取不同的 Gaussian 核方差 σ 。下面以对 J 分量进行滤波为例说明邻域平均法的原理。设卷积核 h 是一 $p \times q$ 矩阵(一般情况下 h 的元素和为 1), 对图像中的每一个像素点 (i, j) , 取其 $p \times q$ 大小的邻域 S , S 中元素和 h 中对应元素的乘积之和:

$$\bar{J}(i, j) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q S_{i,j} h_{i,j}$$

作为邻域平均法滤波后所得图像像点 (i, j) 处的 J 分量值。分别运用邻域平均法对 J, K 和 L 分量进行平滑滤波, 对滤波后的数据作逆离散 K-L 变换, 得到新 R, G 和 B 值, 就是本文的平滑滤波方法。具体实现算法的流程如图 1 所示。

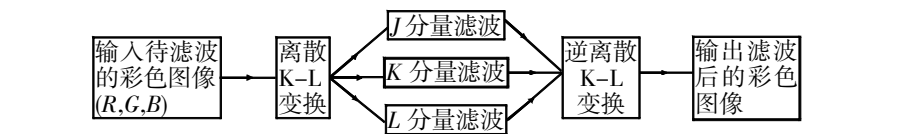


图 1 彩色图像平滑滤波流程框图

3 实验结果及分析

实验中, 选取一幅受到噪声污染的彩色图像(图 2(a), 原图尺寸: 256×370 ; 来源: 文献[4]的附带光盘), 按照本文的方法对其进行平滑滤波。对 J 分量平滑时采用 3×3 的 Gaussian 核, 方差 $\sigma=0.5$; K 分量平滑时采用 5×5 的 Gaussian 核, 方差 $\sigma=1.5$; L 分量平滑时采用 7×7 的 Gaussian 核, 方差 $\sigma=2.5$, 结果如图 2(b) 所示。

为了对比平滑滤波的结果, 用基于 RGB 模型的方法和基于 HSI 模型的方法对图 2(a) 所示彩色图像分别进行两次平滑滤波。基于 RGB 模型的方法: 一次采用 5×5 的 Gaussian 核, 方差 $\sigma=1.5$; 另一次采用 7×7 的 Gaussian 核, 方差 $\sigma=2.5$, 平滑滤波结果分别如图 2(c) 和图 2(d) 所示。基于 HSI 模型的方法: 采用 7×7 的 Gaussian 核, 方差 $\sigma=2.5$ 和 $\sigma=5.0$, 得到

两幅平滑滤波后的彩色图像, 分别如图 2(e) 和图 2(f) 所示。

对比平滑滤波结果, 可以看到, 采用本文的方法平滑滤波后的彩色图像(图 2(b))的噪声得到了很好的抑制; 基于 RGB 模型的方法滤波结果, 图 2(c) 中的噪声斑点还比较明显, 没有完全达到平滑效果, 图 2(d) 虽然很好地消除了噪声, 但是图像比图 2(b) 更加模糊; 基于 HSI 模型的方法滤波结果, 图 2(e) 和图 2(f) 的滤波效果不理想。综合考虑, 本文方法对彩色图像的平滑效果较好。

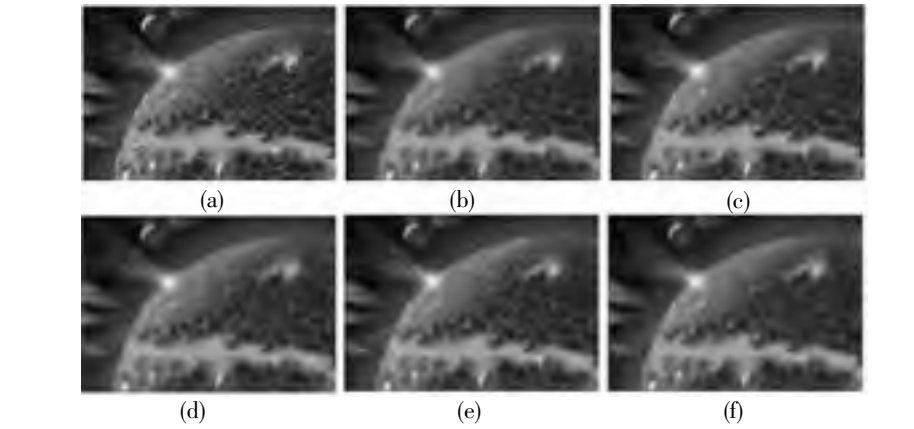


图 2 实验结果

4 结束语

运用离散 K-L 变换, 变相关的 R, G 和 B 颜色三分量为不相关的 J, K 和 L 分量, 消除数据间的相关性, 然后分别对各分量进行滤波。对 J, K 和 L 分量滤波采用不同的滤波方法或采用同一方法但取不同的滤波参数。离散 K-L 变换是正交可逆变换, 若对 J, K 和 L 分量平滑滤波采用完全相同的方法, 则与直接对 R, G 和 B 三分量进行滤波是同一效果, 这是本文方法与通常方法的联系。实验结果表明, 与基于 RGB 模型的滤波方法及基于 HSI 模型的滤波方法相比, 本文方法能获得较好的彩色图像平滑滤波效果。

参考文献:

[1] 孙即祥. 数字图像处理[M]. 石家庄: 河北教育出版社, 1993.
[2] 章毓晋. 图像工程(上册)——图像处理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
[3] Kenneth R Castleman. 数字图像处理[M]. 朱志刚, 林学贵, 石定机, 等. 北京: 电子工业出版社, 2002.
[4] 向世明. Visual C++ 数字图像与图形处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

作者简介:

焦春林(1977-), 男, 陕西人, 硕士研究生, 研究方向为计算机图形图像; 高满屯(1962-), 男, 山西人, 教授, 研究方向为计算机视觉、图形图像分析。

(上接第 253 页) 态效果也具有一定的参考价值。



图 3 算法运行效果示意图

参考文献:

[1] eachey D. Modeling Waves and Surf[J]. Computer Graphics, 1986, 20(4): 65-74.
[2] 王静秋, 钱志峰. 基于粒子系统的焰火研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 4(2): 166-170.
[3] 谢剑斌, 郝建新, 蔡宣平, 等. 基于粒子系统的雨点和雪花降落模型生成[J]. 中国图像图形学报, 1999, 9(9): 734-738.

作者简介:

陈和平(1956-), 男, 湖北武汉人, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为计算机网络与数据库应用技术; 王早(1982-), 男, 湖北洪湖人, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机网络与数据库应用技术。