

接收点移动的室外虚拟声场模拟研究与应用

谭同德,史晓菲,赵新灿,常村红

(郑州大学 信息工程学院, 郑州 450001)

(shixiaofeixf@sohu.com)

摘要:声线跟踪算法是一种目前较为流行的基于几何声学声场模拟算法,但该方法依赖于特定接收点的位置,因此不能直接用于接收者处于不断移动状态的虚拟环境中。对此,提出一种步长法动态定义接收点位置的改进声线跟踪算法,有效解决了声场仿真中听音效果与计算效率的冲突问题,尤其适合于大规模室外虚拟环境中声场的模拟研究。并用 Visual Studio 2005 和 Matlab 工具完成程序设计和结果处理,达到满意的听音效果和计算效率。

关键词:室外声场;步长法;声线跟踪;脉冲响应

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Research and application of outdoor sound field in virtual environment for mobile receiver

TAN Tong-de, SHI Xiao-fei, ZHAO Xin-can, CHANG Cun-hong

(College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 45001, China)

Abstract: Ray-tracing is one of the most widely used ways of sound field simulation, but it usually depends on the specific location of the receiving point; therefore, it cannot be used in virtual environment with a mobile receiver directly. A method of step-length by defining the receiver dynamically based on ray-tracing was proposed, which solved the problem between sound effect and computational efficiency, especially for the outdoor sound field simulation in large-scale virtual environments. The improved algorithm was implemented in VS 2005 and Matlab, and it can achieve satisfactory sound effect and computational efficiency.

Key words: outdoor sound field; step-length; ray-tracing; impulse response

0 引言

声场仿真是提高虚拟环境逼真度、现实感和沉浸感的重要途径。目前,虽然许多基于统计声学、几何声学及波动声学的声场仿真技术已基本上能实现虚拟声场的听音效果。但是,一般声场都是基于固定声源和接收点位置进行的模拟,对于在虚拟环境中漫游时视点的不断移动,却无法进行听音效果与计算效率的优化。

利用计算机模拟和预测封闭声场是20世纪60年代以来逐渐兴起的一项技术。在20世纪80年代末、90年代初,国外兴起了数字式声场模拟技术的研究热潮。国内从20世纪80年代末期开始,也陆续有学者做这方面的工作,但总的说来,尚处于初步研究阶段。此后的多少年里不少学者对封闭声场模拟的各种算法进行了探索性研究,但总体水平与国际相比还有不少差距。而对于室外声场模拟的研究,国内专门研究的人并不多,国外对此研究也多与环境声学 and 音效设计相结合,研究室外的扩声设计,如环境中各类噪声的预测、评价和控制,音响工作人员对广场演出、露天舞会和音乐喷泉等室外扩声的设计等。因此结合声音在室外扩声的特点,通过声场模拟技术模拟室外声环境成为室外声学应用领域一种十分有效的研究方法。

本文在研究目前流行的声线跟踪(Ray-tracing)算法的基础上,提出了一种适合于大规模室外虚拟环境的步长法动态

定义接收点的改进算法。

1 真实感声音生成过程

声音从声源传播至人的耳鼓处的过程可以看作是声信号经过多个线性系统滤波的过程(如图1),主要包括环境滤波(系统1)和人的耳廓滤波(系统2)等。环境滤波用声场脉冲响应(Sound Field Impulse Response)来表征(简称为IR)。人的耳廓滤波效应应用头相关传递函数(Head-Related Transfer Function, HRTF)来表征。将系统1和系统2的脉冲响应函数卷积可得到双耳声场脉冲响应(Binaural Sound Field Impulse Response, BSIR),再将BSIR与原始的声信号卷积可得所需的声信号,最后经过耳机或音箱播放即可得到真实感声音^[1]。

设声源信号为 $x(t)$,系统1的输出信号为 $s(t)$,系统2的输出信号为 $h(t)$,那么输出声信号 $y(t)$ 为:

$$y(t) = s(t) \otimes h(t) \otimes x(t) \quad (1)$$

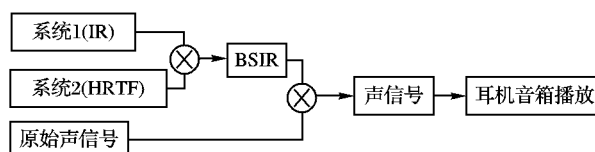


图1 真实感声音生成过程

声场脉冲响应反应了整个声场环境中声能量随时间的变

收稿日期:2008-12-18;修回日期:2009-03-09。

基金项目:国家973计划项目(2002CB312103);河南省自然科学基金资助项目(0611051900)。

作者简介:谭同德(1950-),男,河南郑州人,教授,博士,主要研究方向:计算机图形学、虚拟现实、CAD;史晓菲(1985-),女,河南林州人,硕士研究生,主要研究方向:虚拟现实。

化情况,我们利用声线跟踪法进行声场仿真模拟声源从发出声音到接收点的整个过程,可以得到声能量在传播过程中的衰减情况以及到达接收点的能量变化,进而可以得到整个声场的能量脉冲响应函数,完成了真实感声音生成过程中环境滤波这一系统。

2 声线跟踪算法

基于几何声学的声线跟踪法是把声源抽象为空间中均匀分布的若干声线,声线在空中沿直线传播,碰到壁面后发生反射,通过跟踪每一条声线,记录下声线到达接收域的时间和能量变化^[2]。其镜面反射、扩散反射、透射以及吸收路径均能被采样,具有模拟简单、计算效率高等优点,可以用于构建任意类型的声场模型。

初始声线的方向由极角 θ 和方位角 φ 唯一确定,如图 2(a) 所示。

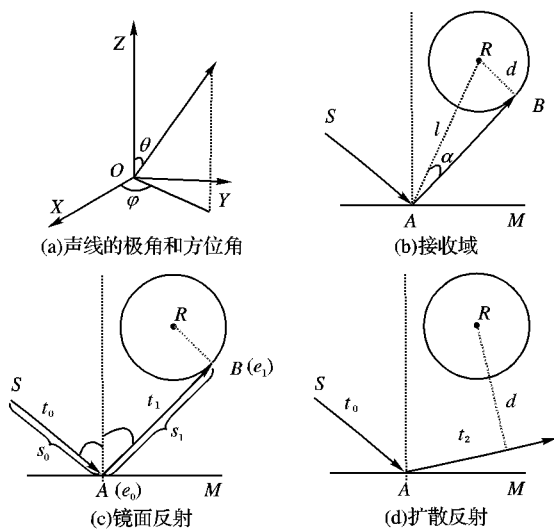


图2 声线传播的方向和能量

由 θ 可得初始声线方向 t_0 的方向余弦:

$$\begin{cases} \cos \alpha = \sin \theta \cos \varphi \\ \cos \beta = \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \gamma = \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

如图 2(b) 所示,声源 S 发出声线后判断是否到达接收域即判断接收点 R 到声线的距离 d (式(3)) 是否小于接收域半径 r 。如果这根声线为初始声线,则按此判断是否为直达声。

$$d = l \times \sin \alpha \quad (3)$$

若 $d < r$ 则声线被接收不再跟踪,否则判断是否与壁面 M 发生碰撞。若发生镜面反射如图 2(c) 镜面反射声线 t_1 ,反射角等于入射角,反射方向 t_1 的方向余弦为:

$$\begin{cases} \cos \alpha_1 = \cos \alpha_0 - 2\mu \cdot \Delta \\ \cos \beta_1 = \cos \beta_0 - 2\eta \cdot \Delta \\ \cos \gamma_1 = \cos \gamma_0 - 2\xi \cdot \Delta \end{cases} \quad (4)$$

其中:下标 0、1 分别表示碰撞前、后; Δ 表示声线与碰撞面法线夹角的方向余弦; (μ, η, ξ) 表示该法线的方向余弦^[3]。若发生扩散反射如图 2(d) 扩散反射声线 t_2 ,则反射方向由计算机随机产生 $[0, 1]$ 内两个相互独立的随机数 r_1 和 r_2 来确定,扩散反射方向 t_2 的极角和方位角计算如式(5),其方向余弦按式(2) 计算。

$$\begin{cases} \theta = r_1 \cdot (\pi/2) \\ \varphi = r_2 \cdot 2\pi \end{cases} \quad (5)$$

传播过程中能量变化分为与壁面碰撞后的能量和经过空气吸收后的能量,在图 2(c) 中分别用 e_0 和 e_1 来表示。

$$\begin{cases} e_0 = en \cdot (1 - w) e^{-ms_0} \\ e_1 = en \cdot e^{-ms_1} \end{cases} \quad (6)$$

其中: en 为上一个碰撞点后的能量; w 为碰撞面的吸声系数; m 为空气的吸声系数; s_0 和 s_1 分别为碰撞前、后声线的传播距离。

3 算法改进

3.1 虚拟环境中声线跟踪法的问题

在大规模室外虚拟环境中,漫游者的位置可能随时会发生较大的改变,即声场接收点的位置在实时不断地变化,没有预见性和固定的轨迹^[4]。然而不可能每次更新接收点就执行一次声线跟踪,那样将导致计算机的计算量非常大。因此我们需要找到一种方法,解决听音效果与计算效率之间的矛盾。

经典的声线跟踪法虽然具有较高的计算速度,但要求声源和接收点都静止不动,不能直接用于移动接收者的环境中,因此我们提出一种步长法来动态定义接收点位置的声线跟踪法。

3.2 步长法动态定义接收点思想

建筑声学定义:室外空间 1 m 范围内听音效果差别不大。因此我们可以这样假设:视点初次定位的点为接收点,以该点为球心做一个 0.5 m 为半径的小球体视点域(如图 3),在这个球体内部所有点的听音效果基本无差别,即具有相似的脉冲响应,只要视点没有超出这个范围就不再进行声线跟踪的更新。一旦视点移动出这个初始球体,我们就需要重新执行声线跟踪,把视点离开初始球体后的第一个位置定义为球心,以同样的方法做球体视点域,依此类推。

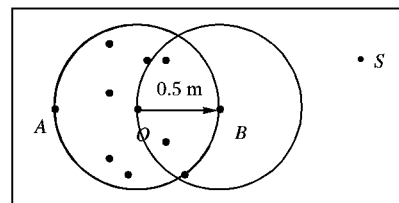


图3 一个小球体步长视点域

3.3 算法步骤

根据以上提出的步长法思想,设计算法过程如下:

- 1) 开始,定义初始视点。
- 2) 执行声线跟踪。
- 3) 判断视点的位置是否发生变化。
- 4) 是,判断视点是否移出视点域,转到 5); 否,转到 6)。
- 5) 是,转到 1); 否,转到 6)。
- 6) 结束。

4 构建实验环境

在以往的研究中,声场仿真侧重于在室内封闭声场的前提下研究声场能量脉冲响应,进而获得其他声学参数^[5]。而对于室外声场环境则侧重于研究室外音效设计,并没有单独的室外虚拟声场模拟,因此可以根据声音在室外环境传播中所要考虑的因素,结合声场模拟算法建立一个室外虚拟声场。

4.1 虚拟室外环境分析

室外环境千差万别,所考虑的因素也有所不同,环境模拟要具有一般性。大多室外环境包括路面、墙壁、花草树木、水

面、土地以及其他复杂障碍物,本系统适用于一般情况下所有的室外声场。实验选取的特定环境是基于郑州大学虚拟现实与地理信息系统实验室所承担的郑州大学数字化校园项目中部分校园环境(如图4)。这部分校园环境比较空旷,只存在少量壁面,符合半自由声场的条件,其次它包括了墙壁、草地、水面和树木等具有代表性的室外因素,因此选取这部分为本实验研究的室外声场环境。



图4 校园模型

把校园模型对应简化如图5所示,设定高度低于50 m时温度为26℃,声速为340 m/s,声波频率为1 kHz,初始声功率为1 W,各材质的吸声系数如表1。

表1 吸声系数

材质	吸声系数	材质	吸声系数
水泥地	0.05	空气	0.0025
墙壁(瓷砖)	0.03	草地	0.69
路灯柱(金属)	0.15	水	0.01
树叶	0.69	树干	0.15

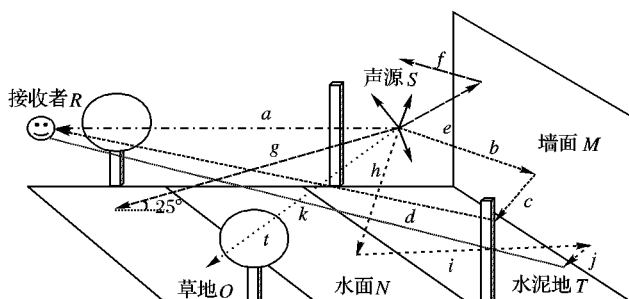


图5 室外声场仿真

声源 S 向四周均匀的发出声线,计算机跟踪每一根声线,到达接收域的记录下其传播路径、时间以及能量,未到达的则不予记录。按照上述几种情况跟踪每一根声线,直至所有声线均被跟踪完毕。把所有声线按照其下一步在室外的不同传播情况,大致可以分为6种类型^[6]:

1) 直达声。例如声线 a ,从声源发出后直接传播至接收者。方向为初始声线方向,能量只被空气吸收而减少。

2) 镜面反射声。例如声线 b ,按其方向首先与壁面 M 发生碰撞,声线碰撞后发生镜面反射,反射角等于入射角,反射声线为 c ,直至传播至接收者。

3) 草地掠射吸收的声线。当声线与草地入射角小于 30° 时,这个声线将被草地吸收不再跟踪,如声线 g 。

4) 水平面的扩散反射声线。水平面是一个不断变化的凹凸平面,相当于由若干个法向量不同的小平面组成。当声线发射至水平面时,无法具体判断其碰撞平面的法向量,可以认为声线至水平面时发生了扩散反射,其反射方向是随机的,如声线 h 。

5) 透射声。因树叶具有透射度,声线经过树冠部分可以

透射过去,方向不变而能量减少。如声线 t 经过树冠时按原方向透射过去,能量被树叶吸收了一部分。

6) 无效声。例如声线 e ,与壁面 M 发生碰撞产生镜面反射后,按其反射方向发射出去的声线 f ,未到达接收者且不会再与任意壁面发生碰撞,声线 f 就会按其方向发射到无穷远处,这种声线称为无效声线。

若声线在传播中经历了以上几种或全部过程,则按照声线下一步的不同情况分别处理。例如声线 $h-i-j-k$ 其路径为:声源(S)—水面(N)—墙面(M)—地面(T)—接收域(R),其过程和能量变化如下:

声源(E_0) $\xrightarrow{E_h}$ 水面(扩散反射, E_N) $\xrightarrow{E_i}$ 墙面(镜面反射, E_M) $\xrightarrow{E_j}$ 地面(镜面反射, E_T) $\xrightarrow{E_k}$ 接收域(停止跟踪, E_n)

$E_n = E_0 - (E_h + E_i + E_j + E_k) - (E_N + E_M + E_T)$ (7)
其中: E_0 和 E_n 分别表示声线初始和终止时的能量; E_h 、 E_i 、 E_j 和 E_k 分别表示 $h-i-j-k$ 路程中被空气吸收的能量; E_N 、 E_M 和 E_T 分别表示被水面、墙面和地面吸收的能量。

声场中判断每根声线是否终止跟踪分为三种情况:1)到达接收域的声线,若为直达声或声线在传播过程中经过数次镜面反射、扩散反射、透射等最终达到接收域,则记录下声线到达的时间、能量和传播路径,停止跟踪此声线。2)若声线在传播过程中发生草地掠射吸收,则把声能量赋值为零再停止跟踪。3)若声线既没有到达接收域又不与声场中任意壁面发生碰撞,跟踪此声线直到其能量小于设置的能量最小阈值,则停止跟踪不做记录。

4.2 系统设计与流程图

利用 Visual Studio 2005 和 Matlab 工具完成程序设计和结果处理,系统设计主要包括五部分:数据输入、模型显示、声线跟踪、结果输出以及数据处理^[2]。具体功能如下:

1) 数据输入。声源和接收点坐标,初始声线的数目以及声线的初始能量。

2) 模型显示。场景模型显示,浏览声线的传播路径(分别显示接收、掠射吸收、无效声线),并可以对模型和声线进行放大缩小旋转等功能。

3) 声线跟踪。执行改进的声线跟踪算法。

4) 结果输出。接收域接收到的声线数目,每根声线到达接收域的时间和能量。

5) 数据处理。利用 Matlab 把每次声线跟踪结束后的时间和能量做出能量脉冲响应图,并运用最小二乘法对得到的能量脉冲响应图进行曲线拟合,为下一步得到真实感声音做准备。

图6为改进声线跟踪算法在室外环境声场仿真应用中的流程图,阴影部分为步长法的核心思想。

5 实验结果

5.1 步长法的有效性和实时性检验

对于一个小球体步长内的所有接收点,验证其脉冲响应是否差别不大我们只需选取球体内部两个极限点,如相隔1 m的 A 、 B 两点,分别以 A 点和 B 点为接收点进行实验,实验环境为本实验初始设定的各环境因素。取 A 点为初始接收点, B 点为朝着声源 S 方向沿 X 轴移动1 m,可得实验结果如表2。

从表2可以看出, B 点较 A 点接近声源,其接收到的声线数目也较 A 点稍多, A 、 B 两个接收点在接收时间、接收到最大

最小能量以及能量脉冲响应方面基本无差别,可知此方法具有有效性;而程序执行的平均时间仅有 153.14 ms,因此此方法具有较好的实时性,能够满足视点不断变化的虚拟场景。

表 2 实验结果

实验结果	A 接收点	B 接收点
声线总数	3 025	3 025
接收到声线数目	14	17
最小能量/dB	41.40	41.26
最大能量/dB	91.85	92.06
最早到达时间/ms	344.31	344.25
最晚到达时间/ms	792.43	790.41
程序执行时间/ms	154.68	151.59

注:平均执行时间为 153.14 ms。

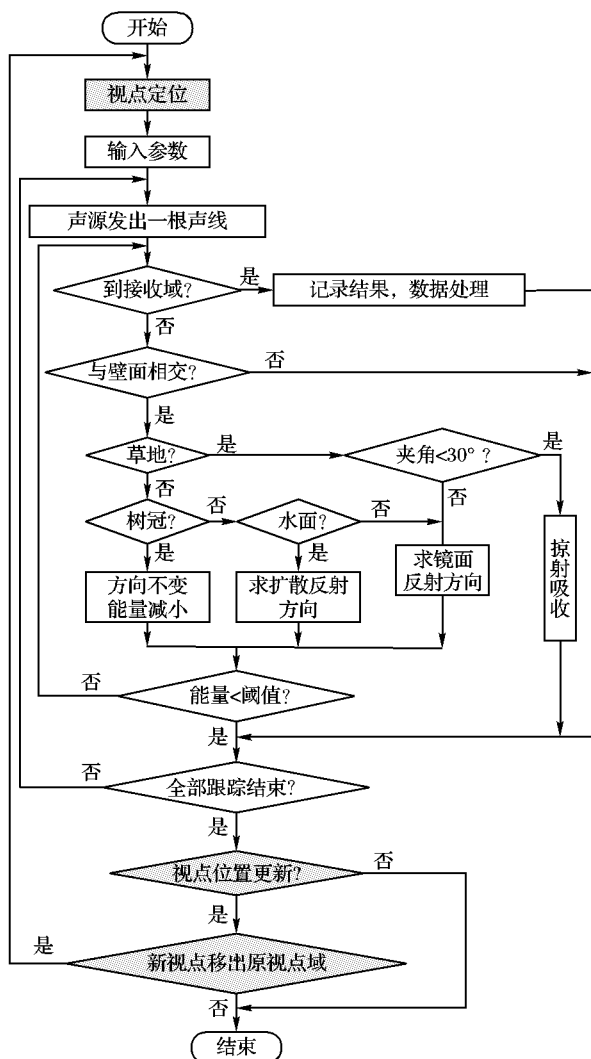


图 6 改进算法流程

5.2 改进的声线跟踪法在室外虚拟声场中的模拟实验

该实验基于图 4 所简化的声场模型而定的声场环境,声源的位置固定不变,改变接收者的位置和接收域大小可得实验结果如图 7 所示。

5.3 结果分析

从两个实验的实验结果可得到以下结论:

- 1) 步长法在接收点移动的室外虚拟环境中具有较好的实时性和有效性。
- 2) 绝大多数声音被环境吸收或者散射到无穷远处,到达接收者的声能量很少。

3) 接收到的声线绝大多数是直达声,少数是一次反射声,二次以上的反射声很少,因此室外声场脉冲响应只包括直达声和前次反射声,不存在混响声。接收到的声能量随时间线性衰减,其能量脉冲响应用最小二乘法进行曲线拟合得到的是一个直线方程。

4) 接收点距离声源越近接收半径越小,接收到的声线数目越多,接收到的能量也越大,从开始接收到接收结束的时间也越早,如 C 点较 A 点距离声源近。

5) 草地的掠射吸收(如图 8),声线与草地夹角小于 30° 时被草地吸收了,图中椭圆所圈部分为被草地掠射吸收的声线。

6) 水面的扩散反射,反射到水面上的声线随机产生一个新方向,按此方向扩散。

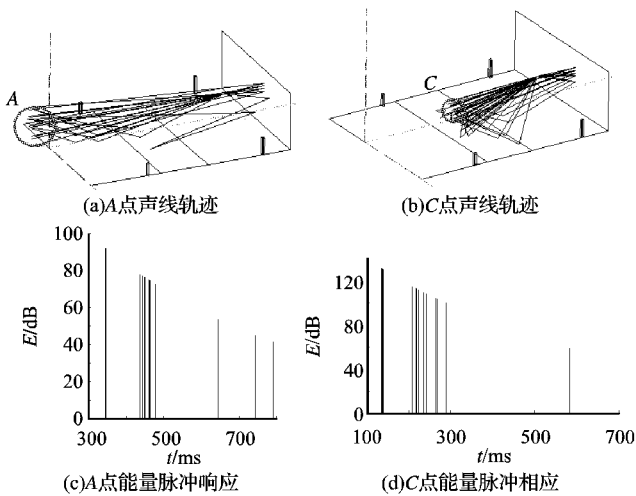


图 7 声线轨迹和能量脉冲响应图

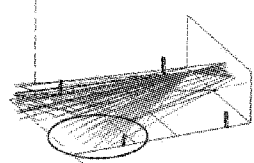


图 8 草地掠射吸收

6 结语

在改进的 Ray-tracing 算法中,通过采用以 1 m 小球体为一个步长单位来动态地确定接收点的位置以及需要执行声线跟踪的时刻,既保证了虚拟声场中的听音效果,又使得计算效率有了很大的提高。最后结合声音在室外传播的特点构建了室外虚拟声场环境,较好地解决了虚拟环境中漫游者视点移动时接收点随之改变这一经典声线跟踪中的无法解决的问题。

参考文献:

- [1] 石教英. 虚拟现实基础和实用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 曾向阳. 声场视听一体化原理及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 79-92.
- [3] 吴硕贤, 赵越喆. 室内声学与环境声学[M]. 广州: 广东科技出版社, 2003: 61-77.
- [4] 杨鹏, 姚旺生. 基于动态机制的虚拟声环境构造系统的仿真[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(12): 2067-2072.
- [5] YOKOTA T, HIRAO Y, YAMAMOTO K. Efficient calculation on outdoor sound propagation by FDTD and PE methods[J]. Acoustical Science and Technology, 2006, 27(3): 177-179.
- [6] 刘健. 室外声场及其扩声系统设计[J]. 音响技术, 2001(5): 26-29.