

飞行模拟器声音仿真系统设计与实现

王恒亮*, 刘文龙, 胡兴平

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 为了使飞行仿真具有真实感和沉浸感, 详细分析了声音仿真系统的内容及仿真原理。确立了飞行模拟器所要模拟的声音事件, 找出了飞机各个部件声音的基本特征, 从原始录音中提取出用于仿真的声源。提出了一种基于音响货架产品的声音系统软、硬件设计方法。软件实现采用了模块化, 具有可扩展性。

关键词: 飞行模拟器; 声音仿真系统; 3D音效; DirectSound

中图分类号: V211.3

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2015) 12-0047-06

随着国内培训飞行员需求的增加, 飞行模拟器越来越受重视, 产品需求量呈现大幅度的增长, 飞行模拟器的品质及稳定性对飞行培训的重要性不言而喻。声音仿真系统作为模拟器的重要组成部分, 通过提供高逼真度的声音仿真环境, 为飞行人员创造一个身临其境的虚拟世界。听觉信息一方面为实时生成的视景伴音, 和视觉信息叠加, 达到声像融合; 另一方面独立提供重要信息, 如起落架收放, 可以提醒飞行员飞机状态已经改变。因此, 在飞行模拟系统仿真中, 真实、完全地再现飞行操作人员周围各个方位的各种声源是十分必要的。声音仿真技术的研究对于声音仿真系统产品的研制有重要的意义。

本文拟从声音仿真的内容、仿真原理、实现方法等几个方面展开详细论述, 并进行飞行模拟器声音仿真系统设计。

1 声音仿真的声音源及内容

1.1 声音仿真的内容

声音仿真系统模拟的内容主要包括环境音、告警导航音、通话子系统三大部分。

(1) 环境音

环境音主要仿真飞行环境音效, 具体包括:

(a) 动力装置音响: 发动机启动、转子声;

(b) 空气动力音响: 气流噪声、扰流板、起落架、襟翼等引起的噪声;

(c) 落架音响: 起落架上锁、开锁、着陆接地发出的声音

及轮胎爆破声;

(d) 跑道效应音响: 飞机的主轮和前轮在地面上滑跑产生的摩擦声;

(e) 大气效应音响: 如雨声、冰雹声、雷声等;

(f) 其它音响: 襟/缝翼收放声等。

(2) 告警导航音

主要仿真机载系统音频复现, 具体包括: 导航系统提示音、告警系统音频、告警系统告警语音等。

(3) 通话子系统

主要模拟语音通讯通话, 具体包括: 受训飞行员之间的音频通话、教员与飞行员的直接通话、语音自听、地面通讯台与飞行员之间的通话。

1.2 声音仿真的声音源

实际上在飞机座舱中可以听到很多声音, 但基本上可以划分为2种基本类型^[1], 连续声音和离散声音。

(1) 连续声音

连续声音是指由连续的过程产生并在仿真过程中能够突然改变的声音。连续声音反映了飞机当前的状态, 它取决于飞行和航电等仿真系统中不断更新的参数, 如空气动力噪声、发动机声音、轮胎滑跑声音等。

(2) 离散声音

离散声音是指由离散事件驱动或触发, 在仿真过程中不能够中断, 当一有事件触发, 直接将声音样本重新播放即可, 触发信号通常是飞行仿真和航电等仿真系统的指令变量

收稿日期: 2015-06-08; 退修日期: 2015-10-23; 录用日期: 2015-11-11

*通讯作者. Tel.: 029-86835183 E-mail: feixianghl@163.com

引用格式: WANG Hengliang, LIU Wenlong, HU Xingping. Sound simulation design and realization of flight simulator system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(12): 47-52. 王恒亮, 刘文龙, 胡兴平. 飞行模拟器声音仿真系统设计与实现[J]. 航空科学技术, 2015, 26(12): 47-52.

控制,如起落架上锁声以及着陆机轮触地声等。

2 声音音效数据库的建立

由于在实际飞机驾驶座舱现场录制的声音是飞机各个部件产生声音的混合,且包含着大量的其他声音特征及噪音,因此模拟器声音系统音效首先必须现场录制,同时需要对录制的声音源进行分析与处理,从中提取出仿真所需要的声音。

在录制实际飞机运行的声音时,为了获得良好的声音素材,要把录音设备引起的声音失真减少到最小。选用的录制设备为数字录音设备。一般采用的文件格式为:采样频率44.1Hz,采样位数16bit,单声道Channel为1。现场录制的声音不仅包含某种单独的声音特征频率,而且包含着大量的其它声音特征及噪音。

在素材分析处理时,为了简化声音分析、处理的数据量及程序,先对现场录制的声音进行初步处理,然后使用一些音频处理软件进行简单的后期处理^[2],去除一些不必要的声音数据。例如:在发动机不同转速时,飞机的背景声音片段、包含气流噪声的声音片段、飞机起降时包含起落架的收放背景声音片段等,需要识别后分段截取保留。把声音信号根据实体的工作状态分别精确的录制下来,建立声音文件素材库,根据实际情况对声音的定位、距离感、沉浸感等效果进行处理和动态调度。例如仿真飞机的正常起飞、巡航、降落时,就根据飞机的飞行状态,动态调度反映起飞、巡航、降落时的声音素材。

3 声音仿真系统的设计

声音仿真系统与航空电子模拟系统、飞机性能仿真系统及教员台系统进行数据交互,声音仿真系统由声音仿真计算机发出环境音及告警导航音,经声卡传输给音频矩阵设备再到音箱,通话子系统由声音仿真计算机发出控制通断命令,音频矩阵器接收到命令进行耳麦通道切换,原理图如图1所示。

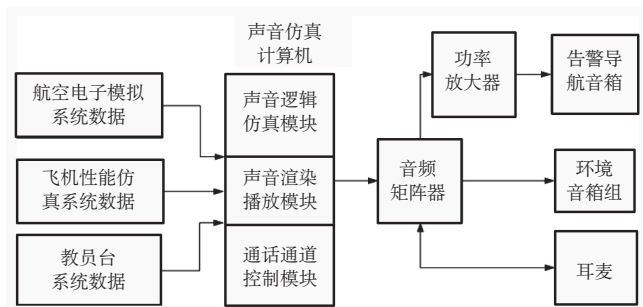


图1 声音仿真系统原理图

Fig.1 Principle of sound simulation system

整套声音仿真系统硬件设备包括:声音仿真计算机、环境音箱、告警导航音箱、功率放大器、音频矩阵器、耳麦等。

声音系统实现的每一种声音,最终都通过扬声器来实现,扬声器是训练人员与声音仿真的直接传递者。所以,合理的选择扬声器系统及对扬声器的控件摆放是非常重要的。对于三维空间中的声音定位^[3],把听者周围的整个空间分割成几个三角区,采用矢量基幅值相移控制算法可把虚拟声定位在听者周围整个空间的任意位置,从而实现全方位的声音定位。三维空间的声场的设计原理如图2所示。

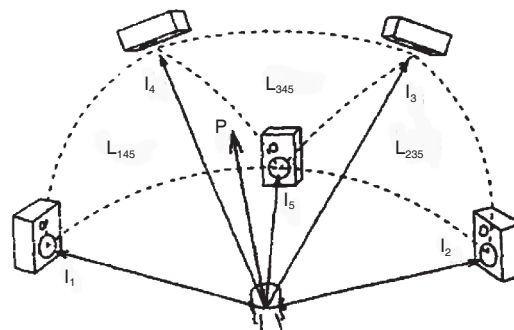


图2 三维空间声场设计原理图

Fig.2 Design of 3D sound field

在声音通道的设计时,一方面增加扬声器时要注意扬声器的优化布局;另一方面,必须注意三角区的合理选配。虽然任意不在一个平面的3个扬声器都可生成该三角区内的任意位置虚拟声,但要提高定位精度,尽量使三角区最小化,并避免三角区的跨越。当声源在某个扬声器的方向上时,或声源在两扬声器之间的方向上时,只需要一个扬声器发声;当声源在两扬声器之间的直线上运动时,需要2个扬声器同时发声。某种飞行模拟器扬声器声场设计如图3所示。

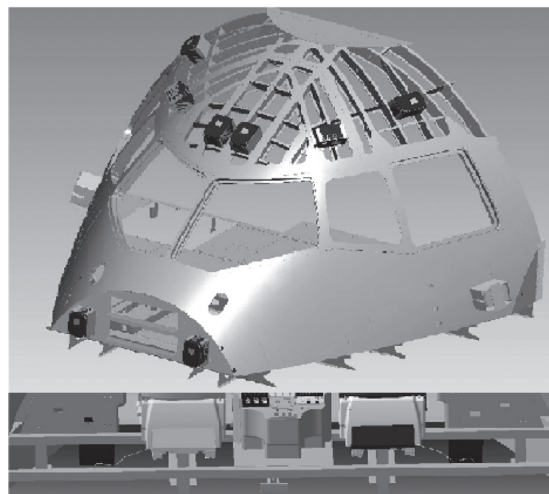


图3 扬声器声场设计图

Fig.3 Arrangement of loudspeaker

4 声音仿真系统软件实现

声音仿真计算机中的声音处理主程序根据从其他分系统上得到的模拟器的操作标志、速度、告警信号等数据和离线频谱分析获得的声音数据文件,判断应该发出的声音的类型及相应的频率和幅值,然后调用第三方函数库提供的方法对声音文件进行调用、对缓冲区进行设置,进而驱动声卡发声。

4.1 声音系统的软件仿真原理

声音仿真系统进行模拟器声音仿真的时候可以通过人机交互界面设置需要仿真的声音的声卡及播放通道,并且指定所仿真声音的播放参数,如响度、频率、循环次数等。声音仿真系统软件工作原理如图4所示。

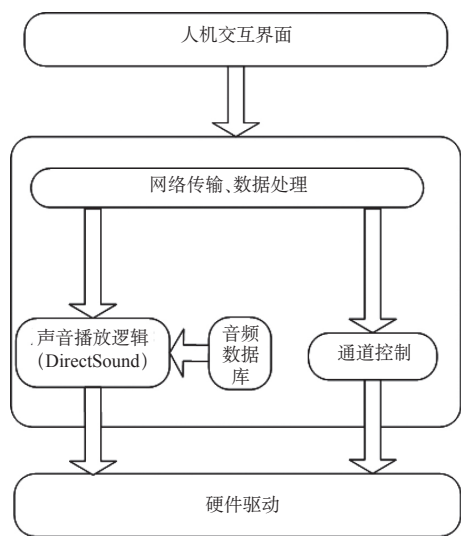


图4 声音仿真系统软件工作原理
Fig.4 Elements of sound simulation system

真实的飞机飞行过程中存在多个声音源,这些声音源发出的声音形成了复杂的声场。因此,声音实时仿真的一个重要内容是如何仿真不同声音源发出的声音,混合并回放这些声音。

对声音仿真的实现采取调用第三方函数库的方式,第三方函数库为DirectSound函数库。DirectSound提供了强大的声音混合与回放功能,其工作原理是:每个单独的声音或声音流开辟一个次声音缓冲区,存放该声音的数据。回放时,把各个声音缓冲区的声音送到主声音缓冲区进行混音,在主声音缓冲区中混音后,声音立即送往音频输出设备播放。混音时,函数库会执行所有必要的格式转换。例如,将采样率从44kHz转换到22kHz。同时,函数库会处理所有的特殊效果,例如3D空间中的声源定位等。

4.2 软件中DirectSound的工作流程

DirectSound将声音缓冲区分为:主声音缓冲区和次声音缓冲区。1个声音缓冲区对象代表1个声源,这个声源既可以使静态的声音缓冲区对象,也可以是动态的声音缓冲区对象。静态的声音对象是指声音数据一次性读入内存,它一般用于较短的声音。动态的声音对象是指声音数据必须隔一段时间传送一部分到缓冲区中。所有缓冲区都含有脉冲编码调制(Pulse Code Modulation, PCM)格式的声音样本数据。

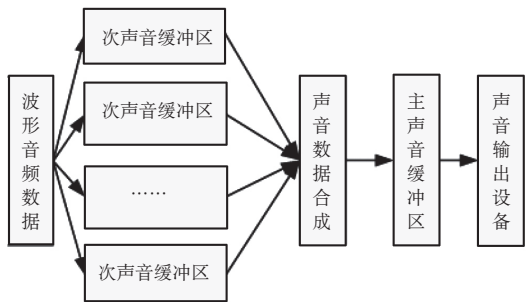


图5 DirectSound声音混音工作原理
Fig.5 Sound mix of DirectSound

DirectSound对于声音混音的工作原理如图5所示。

当设备支持硬件混音且硬件缓冲区和混音设备空闲,DirectSound自动将尽可能多的声音对象送入硬件的内存中,留在主机系统内存中的声音对象由DirectSound以流的方式与硬件缓冲区中的声音对象一起送入硬件混音器;当设备不支持硬件混音时,DirectSound就将所有的缓冲区中对象放在系统内存中,在内存中混音。DirectSound就是以这种方式尽量利用硬件的性能,达到最快最好的效果。DirectSound处理播放声音文件原理如图6所示。

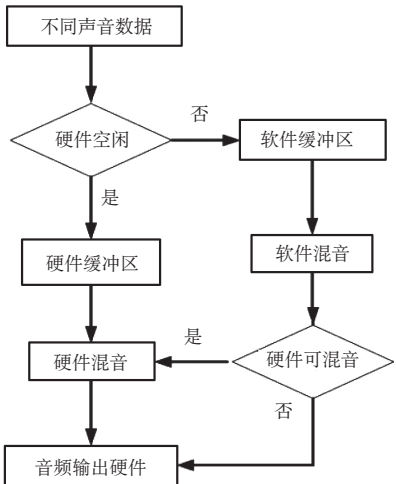


图6 DirectSound声音播放工作原理
Fig.6 Sound play principle of DirectSound

声音软件中声音的播放主要包括以下几个步骤:

- (a) 创建及初始化对象;
- (b) 设定应用程序的声音设备优先级别方式;
- (c) 将WAV文件读入内存,找到各个格式块、数据块位置及数据长度;
- (d) 创建声音缓冲区,一般可以直接使用次声音缓冲区;
- (e) 载入声音数据,获取PCM数据并写入缓冲区;
- (f) 播放声音及停止。

4.3 软件代码的实现

首先,枚举声音设备创建设备对象。声音仿真中由于需要同时播放多路声音,声音设备不止一个,在编程中就需要先枚举系统中的各个声卡设备,DirectSound创建1个设备对象,代表了1个声音设备,负责管理设备和创建缓冲区。

其次,创建声音缓冲区。为每一个声音创建1个次级缓冲区,从WAV文件或者资源文件中把数据读到私有存储区,设置主声音缓冲区格式。在播放次级缓冲区声音的时候,DirectSound会在主缓冲区把所有声音混合成1个声音,然后把声音送到播放设备。缺省时主声音缓冲区格式为22.05kHz,双声道,每个采样点8bit,所有在主缓冲区中混音的声音在播放前均将被转化为这种模式。在飞行模拟器的声音仿真系统中,为了追求更好的声音效果,可以采用44.1kHz,单声道,每个采样点为16bit格式录音,所以需要改变主声音缓冲区的声音格式,把主缓冲区内的数据格式和飞机声音数据格式统一。

最后,声音的播放。声音的基本操作对象是缓冲区,这由DirectSound接口来描述,可以获得1个主缓冲区接口以便改编输出格式或者执行用户混音。从概念上讲,缓冲区是环形的,就像一盘盒式磁带。在连续播放缓冲区的情况下,一旦DirectSound到达了结尾处,它会从头开始播放。如果要往缓冲区中动态地写入数据,也应该按同样的回绕方式写入数据。

5 软件实现中的关键技术

5.1 三维声音的实现

声音仿真系统软件仿真中涉及到声音空间化技术。人的大脑具有声音感知能力,即除了能够识别声音信息内容,还能够决定声音的位置。为了在模拟机座舱中重现这一现象,必须对仿真的各种飞机声音进行三维渲染。采用扬声器重现三维声音的理想情况就是在所有发出声音的实际物理位置都放置扬声器,软件方面采用DirectSound 3D来实现,DirectSound提供了可以直接调用的函数,方便了软件开发。

DirectSound 3D包括缓冲器、听者、扬声器位置等接口,可以进行空间化声源,对听者位置、速度和特效进行处理。

5.2 杂声的处理

在设计飞行模拟器的声音仿真系统时,发现在播放发动机声音时经常出现“咔嗒”的声音,影响到仿真环境的真实性。这是由于当声源从一个位置运动到另一个位置后,对应的扬声器增益直接变换到新的增益,会造成这种咔嗒声。针对这个问题可以在对一个声源数据处理时,采用交叉衰减技术^[4]以产生淡入淡出效果,实现声音从一个位置平滑过渡到新位置。

5.3 双耳时间差

当声源靠近某只耳朵,传输到两只耳朵时,就会产生如图7所示的双耳时间差(Interaural Time Difference, ITD),其计算公式为

$$ITD = a \cdot \frac{\theta + \sin \theta}{c} \quad (1)$$

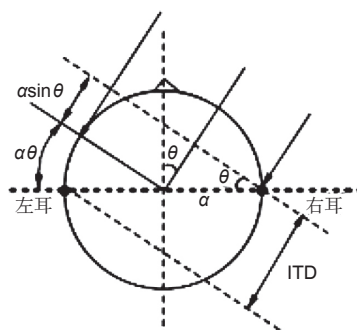


图7 双耳时间差(ITD)

Fig.7 Interaural time difference (ITD)

式中: a 为球头半径; θ 为声源方位角; c 为空气声速。

在仿真程序中实现ITD的方法是在一个扬声器通道相对于另一个扬声器通道引入延迟。通过式(1)求得所要模拟的ITD值以后,就需要在延迟的扬声器中延迟ITD,实现方法是将该信号通过一个延迟线,如图8所示。声音延迟样本数目 $n=T \cdot f_s$,式中, f_s 是采样频率。



图8 延迟线

Fig.8 Delay line

5.4 声音在空间的方位

生理声学的研究表明,声音方位的影响在频谱上表现非常突出,这种频谱上的区别是人耳定位的主要依据。头部相关传递函数(HRTF Head-Related Transfer Functions)的概念就是根据这个依据得出的。HRTF是指由于外耳的滤波、

耳鼓的振动和头部的影响而造成人的左右耳鼓中对来自不同方位的声音信号有不同的频谱响应,它是基于声音位置和考虑许多声音定位因素的线性函数。当传播媒质是自由声场时,声音信号经过人体的耳廓滤波,在人的左右耳鼓处形成

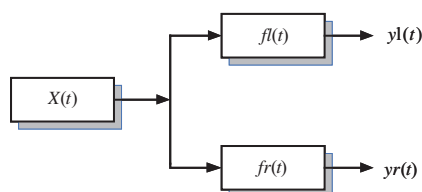


图9 头部传递增益因子
Fig.9 Head transfer gain factor

响应信号,声音的传播过程就成为了人耳对声源的滤波。

图中, $X(t)$ 表示空间中某位置的声源发出的信号; $f_l(t)$ 、 $f_r(t)$ 分别表示人的左、右耳对来自各个方位的冲激声信号的脉冲响应; $y_l(t)$ 、 $y_r(t)$ 分别表示人的左、右耳的耳鼓处所感受到的声音信号,即双耳声。

了解了头部相关传递函数的数学意义,就可以利用不同位置的头部相关传递函数对声源信号滤波来生成虚拟的空间三维声音。由于不同的人有不同的HRTF,即使是同一个人周围不同的角位置也对应着不同的传递函数,因此HRTF滤波器的测量、建模是一个复杂的过程。

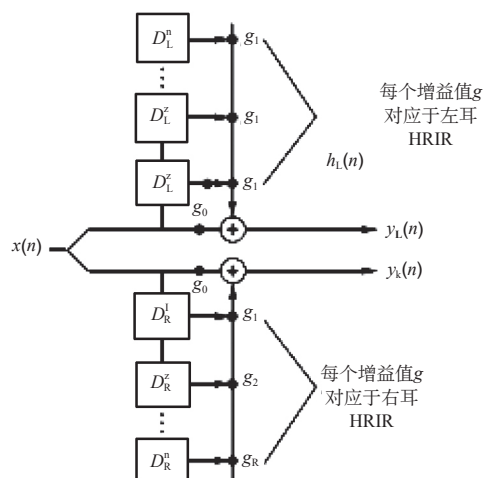
5.5 头部相关传递函数(HRTF)

头部相关传递函数HRTF与声源到头中心距离 r 、声源的弧度频率 ω 、方位角 θ 、仰角和个性化特征参数 α 有关。从数学角度,HRTF可以看作是耳鼓处的声压级 P 与假如不存在头时头中心位置处的自由场声压级 p_0 之比。

对于远场,即 $r > 1\text{m}$ 时,HRTF基本与 r 无关。由于个性化特征参数(比如耳廓、头部、躯干的形状和尺寸)对每个人而言各不相同,所以严格说来,每个人的HRTF都是不同的。HRTF除了包含ITD、IID声源定位因素之外,还包含声源定位的频谱因素(比如耳廓就是一个频谱滤波器)。HRTF在时域的等价对应是头部相关冲激响应(Head Related Impulse Response, HRIR),此时HRTF是HRIR的傅里叶变换。在仿真中使用HRTF进行声音定位的第一步就是要获得HRTF,测量和存储HRTF通常是以HRIR的形式,然后将输入声音与HRIR卷积就可以得到空间化的声音。将输入声音与HRIR卷积通常是使用具有多个延迟和增益的FIR滤波器进行卷积,如图10所示。

5.6 声音的距离

在声音的距离仿真中,关于信号的增益与人感知到的人和声音信号的绝对距离之间尚未有明确的定量关系。因此通常研究相对距离的仿真。



不同的声源有不同的绝对音量级别(Absolute Volume Level)。例如飞机在50km处响度仍然很大,蜜蜂的声音在10m处已经听不出。而采集声源时并没有考虑各种声源之间的这种差异,为了补偿不同声源在这方面的差别,需要为各种声源设定其最小距离 $d_{\min}$ 和最大距离 $d_{\max}$ 。最小距离对应了每个声源的最大音量级,一旦超出此距离,声音就听不见。

6 结束语

本文从声音源的确立、声音数据库的建立、声音仿真系统的设计以及软件的实现等方面作了阐述。基于系统集成和性能考虑,提出一种三维声音仿真系统设计方法实现了飞行模拟器的声音仿真。在软件实现时采用面向对象的程序开发方法,做到声音仿真系统与其它系统的无缝连接。研究和开发的声音仿真系统已经集成于飞行模拟器中,满足了飞行仿真的实时、真实和沉浸要求。开发飞行模拟器声音仿真系统的软件实现方法具有扩展性和可维护性,有利于飞行模拟器产品的升级和二次开发。

AST

参考文献

- [1] Ploner-Bernard H, Sontacchi A, Lichtenegger G, et al. Sound-system design for a professional full-flight simulator[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Digital Audio Effect. Madrid, Spain, 2005: 36-41.
 - [2] 朱晓光.三维虚拟声音合成及定位技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2000:39-40.
- ZHU Xiaoguang. Research of 3D virtual audio syn-thesis

and localization technologies[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000: 39-40.(in Chinese)

- [3] 杨小冬.三维运动声音在机载告警系统中的应用[D].成都:电子科技大学,2006:21-26.

YANG Xiaodong. The application of 3D moving sound in the warning system in fighter[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006: 21-26.(in Chinese)

- [4] 王鸿,王文.等响曲线和噪音控制原则[J].污染防治技术,1997,10(2):75-78.

WANG Hong, WANG Wen. The equal-loudness contours and the principle of the noise control[J]. Journal of Pollution Prevention,

1997, 10(2): 75-78.(in Chinese)

作者简介

王恒亮(1982—) 男,工程师。主要研究方向:模拟器电气、声音等仿真研究。

Tel: 029-86835183

E-mail: feixianghl@163.com

刘文龙(1974—) 男,高级工程师。主要研究方向:模拟器相关专业的仿真研究。

胡兴平(1982—) 男,工程师。主要研究方向:模拟器相关专业的仿真研究。

Sound Simulation Design and Realization of Flight Simulator System

WANG Hengliang*, LIU Wenlong, HU Xingping

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: In order to obtain the sense of reality and immersion for flight simulation, the sound simulation content, simulation elements and the method were realized for research purposes. On the basis of determining the sound events to be simulated by a flight simulator, found out the basic sound characteristics of each component for an aircraft. The sound sources to be used in the simulation were extracted from the original sound record. A component scheme as sound box for sound simulation system is proposed. Software exploitation of sound simulation system is capable with enlarge and modularization.

Key Words: flight simulators; sound simulation system; 3D sound; DirectSound

Received: 2015-06-08; Revised: 2015-10-23; Accepted: 2015-11-11

*Corresponding author. Tel. : 029-86835183 E-mail: feixianghl@163.com