

北京理工大学  
计算机学院  
毕 业 设 计 （ 论 文 ）  
中 期 报 告

选题名称 基于物理模型的碰撞与滚动声音实时模拟

学 号 1120151912

姓 名 王铎曦

专 业 计算机科学与技术

班 级 07111506

导 师 刘庆晖

学 院 计算机学院

研究所（系、中心）

2019 年 4 月 11 日

# 一 毕业设计（论文）进展情况

## 进展情况：

1) 充分理解声音建模的基础知识：

1. 利用弹簧质点模型，对刚体表面网格信息进行处理：用质点替代网格顶点，用弹簧替代网格边，获得基本的振动模型[2, 3]。对于每一个质点而言，它的运动是一个基本的弹簧阻尼模型(见图 1)，这里认为质点  $x$ ，只有一个自由度(即在  $x$  一个方向运动)，但实际上三维物体中每一个质点应有三个自由度( $x, y, z$  方向)。因此一个具有  $n$  个质点的物体，对应的震动模型的质点运动应用一个  $3n \times 1$  的向量进行描述。

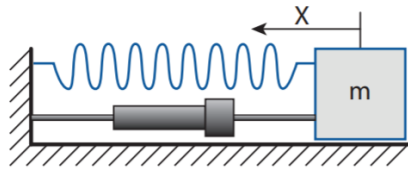


图 1 弹簧阻尼模型

从而可以利用下述二次常微分方程，获得质点简谐运动时合理的正弦波：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

$x$  描述质点位置， $m$  为物体质量， $k$  表示弹簧的刚度(stiffness)，也是这里的胡克常数； $f(t)$  描述了跟随时间变化的外力； $\ddot{x}$  则表示了  $x$  的二次倒数，也就是加速度； $\dot{x}$  则表示了  $x$  的一次导数，也就是速度； $c$  表示衰减模型，本工作中都需要设置合理的衰减系数，使得能够产生震动且最后停止(即欠阻尼情形)，即  $c$  应该小于临界阻尼  $c_c = 2\sqrt{km}$ 。为了得到公式(1)的解析解，我们利用拉普拉斯变换，并认为  $f(t)$  为狄拉克函数形式的单位冲击，解除如下  $x$  的解析解。

$$x(t) = \frac{1}{mw_d} e^{-\xi w_d t} \sin(w_d t) \quad (2)$$

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{c}{2mw} \quad (4)$$

$$w_d = w\sqrt{1 - \xi^2} \quad (5)$$

$w$  是没有衰减的振动频率， $\xi$  是衰减因子，因此  $w_d$  是有阻尼下，衰减的振动频率。从公式中也可以得到，衰减频率必须在  $\xi < 1$  的情况下才有意义，同时由这里也可以证明  $c$  需要小于  $c_c$ 。

2. 利用傅里叶叠加的原理[1]，对公式(2)中得到的每一个质点对应的正弦波进行叠加，就得到了物体产生的声音，从中我们可以看出：我们在这里是将力以狄拉克函数(Dirac Delta Function)形式，作为单位冲击来表示的。因此对于多个不同强度的任意外力，我们需要将他们进行叠加从而得到声音的强度信息，这也是在声音合成中唯一需要实时计算的步骤，利用的是如下时间积分。

$$x(t) = \int_0^t f(\gamma)/(mw_d)e^{-\xi w(t-\gamma)} \sin w_d(t-\gamma) d\gamma \quad (6)$$

3. 对于一个三维物体而言，利用矩阵思维将公式(1)进行拓展，得到如下方程：

$$M\ddot{u} + D\dot{u} + Ku = f(t) \quad (7)$$

其中 $u$ 表示质点位移，物体由  $n$  个质点组成那么  $u = (u_1, u_2, u_3 \dots \dots u_n)$ ， $M$ 为质点质量组成的质量矩阵 (Mass Matrix,  $M$ 是一个对角矩阵)， $K$ 为胡克常数组成的刚度矩阵 (Stiff Matrix,  $K$ 是一个对称矩阵)， $f(t)$ 为外力。很明显，这个方程是一个二次型偏微分方程，是非线性的，想要求解来得到质点位移 $u$ 是非常复杂的。因此我们想要将其转换为常微分方程，从而得到每一个质点位移的解析解[2, 3]。核心思想是利用对  $K$  和  $M$  进行广义特征值分解：

$$KU = MUS \quad (8)$$

通过公式(8)的广义特征值分解得到了由特征向量组成的震动模型形状描述的矩阵 $U$ 和由特征值组成的对角矩阵 $S$ 。 $U$ 决定了每一个质点得到的正弦波对最终合成声音的贡献程度， $S$ 的对角元素即是 $w^2$ 。根据特征值分解的性质， $U$ 是满秩矩阵。所以可以用线性合成的方式表示公式(7)中的质点位移 $u$ ， $u = Uq$ 。然后把它带入公式(7)中，可以得到公式(9)：

$$U^T M U \ddot{q} + U^T D U \dot{q} + U^T K U q = U^T f(t) \quad (9)$$

再根据特征值分解的性质： $U^T M U = I$ 和 $U^T K U = S$ ，同时利用 Rayleigh 衰减模型 $U^T D U = \alpha I + \beta S$  公式(5)的偏微分方程形式最终可以变为如下常微分方程形式：

$$\ddot{q} + (\alpha I + \beta S) \dot{q} + S q = U^T f(t) \quad (10)$$

所以到公式(10)为止我们得到了关于质点位移的常微分方程，而且其中 $q$ 向量中的每一个元素 $q_i$ 都是相互独立的，所以可以解出公式(2)得到的每一个质点的位置偏离方程，且通过 $S$ 矩阵，我们在预处理阶段便得到每一个正弦波的频率。需要合成声音的部分只剩下通过碰撞力得到每一个正弦波对应的振幅，从而合成声音最终的大小。

2) 正在学习有限元分析 (FEM) 理论，对物体表面网格结构进行离散化表示[3, 4]（利用四面体作为有限基本元），希望后期建立更准确的刚度矩阵。

3) 阅读运动感知心理学相关文献，总结实验流程(共三个实验，包括验证，拓展)，开始搭建 VR 测试环境(包括实验观察场景，打分场景，后台数据收集等)[5]。整个实验场景基本描述如下：一个红色小球向一个静止的蓝色小球运动，当两个小球接触后，红球停下运动，蓝球继续向前运动远离红色小球，尽管这样的场景中没有直接信号提示来表明两个小球之间的运动存在某种因果关系，观察者仍然会很可能认为是红球造成了蓝球向前运动[6]。整个实验需要测试的是，如果在两球相互接触时，设置一个在红球停下和蓝球运动之间的时间延迟（同时根据牛顿基本物理运动定理及基本声音产生原理，将会有相应的碰撞声音也被延迟），观察者对上述的因果关系的感知判断是否有相应变化；如果改变两球相互接触时，发出的碰撞声音的位置信息，即这个声音不是在碰撞点发出时，观察者对上述的因果关系的感知判断是否同样有相应变化。因为上述实验条件改变的困

难性, 所以将整个实验放在了 VR 虚拟环境中, 同时利用计算机的数据收集功能, 将实验的打分系统也放在虚拟环境中(不再是做完实验填表或者口头转述感受), 使得实验数据收集也将更将方便。

### 任务完成情况:

1) 利用 OpenAl 库, 通过声音缓存的方式, 采集模型上所有质点在受碰撞力作用下, 发出三秒正弦波的声音, 从而完成带有衰减的声音输出。因为如果没有衰减, 正弦波将一直持续, 衰减的设置参考公式(4), 并利用 Rayleigh 衰减模型, 获得比较合理的正弦波衰减输出。

2) 心理学实验设计: 整个心理学实验都将在 VR 虚拟环境下完成, 实验者将佩戴 VR 眼镜 (HTC Vive), 提供 Surrounding Sound 7.1 支持的耳机, 以及 VR 控制器在研究人员的指导下参与被试实验。整个实验由以下三个部分组成:

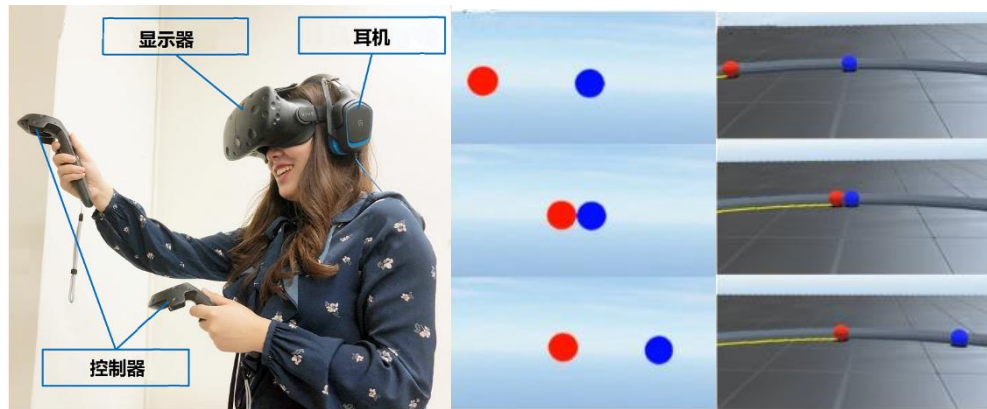


图 2 实验设备及实验设计

实验一和实验二主要是被设计来证明 Guskı 等人[5]的主要研究能够被延展到 2D 和 3D 的虚拟现实环境中。复制前人研究实验目的主要是排除掉引入 VR 设备和交互接口的影响, 以及决定前人的研究可以被延展至 3D 环境中(前人研究只基于 2D 圆盘物体的视频播放)。实验三主要是来验证声音位置信息的影响。整个碰撞声音持续时间为 10 毫秒, 声音的频率音量, 音效等都根据具体环境进行动态设置。

1. 2D 实验: 受试者被要求进行因果评级在 2D 虚拟环境(没有任何的阴影和特殊光照设置, 见图 2)中观察了两球(由 2d 网格建立)运动事件后。本实验中设计了有碰撞声音和没有碰撞声音两种情况, 同时使用的是 2D 的声音: 利用 Unity 游戏的声音引擎, 关掉了环境音效如扩散效果回声效果等, 利用线性模型来模拟(见图 3)声音大小和被试者距离音源的关系。整个实验中蓝球和红球运动之间的延迟由 0-400 毫秒不等(间隔 50 毫秒设置, 共 18 种不同延迟情况), 再加上有无碰撞声音的实验条件设置。被试者需要完成总共 36 组实验并进行打分。

2. 3D 实验: 整体实验设计与 2D 试验下基本一致, 但在这里小球由 3d 网格建立, 整体环境配置了自然条件下的光源和对应阴影, 小球在地板上绕圆形轨道运动(见图 2)。同

时，声音的 3D 合成与上一个实验不同，本工作准备利用 Microsoft HRTF Spatializer 来实现 surrounding 7.1 的立体声音，同时，声音大小改变根据对数模型(见图 3)，使得被试者的听觉体验接近于真实世界，即有了左右耳对声音的不同感知。3D 环境下拟采用的碰撞声音持续时间约为 6 毫秒。

3. 3D 实验(声音位置改变)：该实验设计的目的是为了检查是否碰撞声音的位置信息能够影响上述运动事件的因果感知。除了碰撞声音不再仅仅是在两小球碰撞点，其他的实验设计与实验二几乎一样。该实验的具体实验设计还待完善。

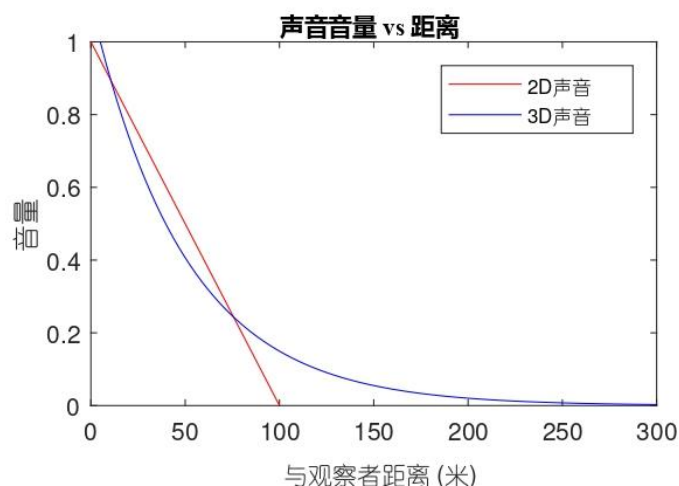


图 3 声音音量设计

## 二 取得成果和存在问题

### 取得成果:

1) 可以对棍棒型 5 点模型进行建模, 输入材质信息 (根据材质查询的到的杨氏模量得到胡克常数见公式), 得到相应的频率信息, 在基本的控制台窗口中敲击不同的点 (不同的碰撞力) 进行实时声音的输出。

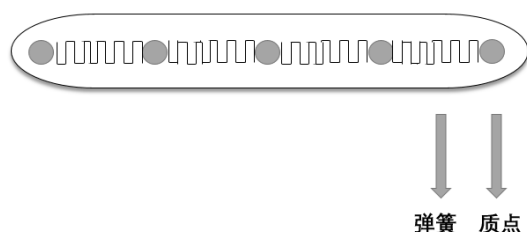


图 1 五质点棍棒模型建模

2) 可以对立方体模型进行建模, 同样在输入立方体网格结构和材质信息后, 可以提取到相应的频率信息, 在基本的控制台窗口中敲击不同的点 (不同的碰撞力) 进行实时声音的输出。

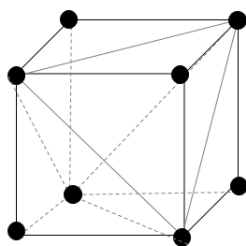


图 2 立方体的基于四面体剖分

该部分工作涉及利用 Tetgen[7], 基于 C++ 的物体网格转换器来将以三角网格组成的物体网格转换为由四面体网格组成的物体网格从而可以后续利用 FEM 对更复杂的刚体模型进行更准确的刚度矩阵建立工作。

3) 完成大部分文献翻译工作: Interactive Sound Synthesis for Large Scale Environments - 《针对大型交互场景的实时声音合成》

4) 开始毕业论文的撰写工作: 完成摘要和引言工作, 将上述工作整理并分为两个部分进行撰写:

1. 心理学实验: 包括经典实验的 VR 环境验证, 从 2D 到 3D 的拓展及相应结果分析, 希望能给实时声音合成提供加速技术的理论支持。

2. 声音合成部分, 包括针对物体网格结构的声音建模与正弦波提取, 到正弦波叠加合成声音, 希望能够最终有在图形界面的效果展示。

## 存在的问题:

1) 对于当今的刚体矩阵建模还不够准确, 需要通过 FEM 的离散化表示, 将弹簧的受力面积信息考虑, 才能建立起更准确的刚体矩阵, 实现较复杂的声音模拟。如今能够有比较合理的基于材质生成的声音还是比较少(仅仅木头, 金属铝和玻璃), 且模型比较简单(如上述的棍棒, 球体等)。

2) 对声音建模后, 敲击的可视化比较难且尚未完成, 希望继承在 Unity 游戏引擎中去, 比较复杂, 尚未完成。希望利用游戏引擎提供的物理引擎来提供实时的碰撞时碰撞力的反馈, 从而进行计算, 因为外力只影响声音的大小, 频率信息的获取已经是可以提前得到并输出的(利用常微分方程二次求解)。初步方案是希望将之前利用 C++语言完成的项目建立一个 DDL 动态链接库以插件的形式放入 Unity 游戏引擎中, 使得整个预先计算的过程可以通过调用函数提前进行完成, 然后将声音大小由游戏物理引擎实时获取的碰撞力进行提取和计算来完成。

## 参考文献:

- [1] Cook, P. R. (2002). *Real sound synthesis for interactive applications*. AK Peters/CRC Press.
- [2] Raghuvanshi, N., & Lin, M. C. (2006, March). Interactive sound synthesis for large scale environments. In *Proceedings of the 2006 symposium on Interactive 3D graphics and games* (pp. 101-108). ACM.
- [3] James, D. L. (2016, July). Physically based sound for computer animation and virtual environments. In *ACM SIGGRAPH 2016 Courses* (p. 22). ACM.
- [4] Sifakis, E., & Barbic, J. (2012, August). FEM simulation of 3D deformable solids: a practitioner's guide to theory, discretization and model reduction. In *Acm Siggraph 2012 courses* (p. 20). ACM.
- [5] Guski, R., & Troje, N. F. (2003). Audiovisual phenomenal causality. *Perception & Psychophysics*, 65(5), 789-800.
- [6] Hume, D. (2006). *A Treatise of Human Nature: Volume 1: Texts*.
- [7] Si, H. (2015). TetGen, a Delaunay-based quality tetrahedral mesh generator. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 41(2), 11.

### 三 导师意见

导师对中期报告的审阅意见

导师签字：

年 月 日

### 四 专业责任教授意见

专业责任教授意见

责任教授签字：

年 月 日