

## 一种古琴音色重构仿真方法及其实现

周昌乐, 顾亚丽, 林国平, 曹文博

(厦门大学智能科学与技术系艺术认知与计算实验室, 厦门 361005)



**摘要:**为促进古琴艺术的传播,通过对古琴音色的分析,在建立古琴音色库的基础上,从古琴琴弦振动理论和音律学理论入手,利用傅立叶变换分析了古琴音色的频谱特征,并基于加权柯西函数,给出了重构古琴音色的策略。然后,通过采用基于音色数据库和音色重构两种方法,对古琴音色进行计算机仿真,建立了一个初步的古琴音色仿真系统。实验证明,通过重构音色进行仿真的计算方法,是古琴音色仿真的一种有效方法。

**关键词:** 古琴音乐; 音色库; 音色重构; 仿真方法

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2009) 02-0572-04

## Reconstruction and Simulation Method and Its Implementation for GuQin Timbre

ZHOU Chang-le, GU Ya-li, LIN Guo-ping, CAO Wen-bo

(Intelligence Science and Technology Department of Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** A Guqin timbre base was introduced through timbre analysis and its spectrum specification was analyzed using Fourier transformation based on theory of Guqin string vibration and temperament. Then a reconstruction method for Guqin timbre was proposed based on weighted Cauchy function. Finally a timbre simulation system for Guqin was worked out using timbre database and reconstruction. It has been proved by experiment that the computing method of timbre reconstruction is effective for Guqin timbre simulation.

**Key words:** guqin music; timbre base; timbre reconstruction; simulation method

## 引言

古琴是中国古代地位最崇高的乐器,位列“琴棋书画”之首。2003年11月7日,古琴被列入联合国“人类口述和非物质文化遗产代表作”的名录,其保护与发展越来越受到广泛的关注<sup>[1]</sup>。可以说,古琴艺术是中华民族历史最悠久、成就最高、最具民族特色的文化遗产之一。从纯音乐艺术的角度讲,古琴的演奏方法也是非常丰富,极具音乐表现力,也可以说是中国传统音乐的杰出代表。但遗憾的是,迄今为止,现有的各种多媒体软件都还缺少古琴的音色处理功能,对古琴音色的技术性研究分析也十分罕见。鉴于这种现状,有必要在古琴日益被重视的今天,开展有关古琴音色重构与仿真的计算化研究,目的在于从技术层面为古琴艺术的保护、发展与传播作出贡献,使得古老的古琴艺术能够借助于现代多媒体技术得到更为广泛和持久的传播<sup>1</sup>。

一般乐器音色模拟包括合成与仿真两种常见的方法。所谓合成方法,就是对乐器的发声过程进行直接模拟,如模拟古琴的形制,对琴弦、共鸣箱进行发声模拟。而仿真技术已作为人们认识、改造客观世界的重要手段<sup>[10]</sup>,所谓音色仿真方法,则主要是基于音色基本元素数据库的模拟实现,这种仿真系统开发周期短、故障率低、兼容性好、可扩充性强,

不因声音种类和数目的改变而增加系统成本,是声音仿真系统开发的必然选择。

基于上述背景与思想,在本文中,通过对古琴音色的分析,主要采用基于音色基本元素数据库的实现方法,给出了重构古琴音色的策略。但考虑到音色基本元素数据库建立比较费时费力,数据库的完整性又不容易得到保障,以及各种环境条件的限制,在一定程度上很多不定因素会影响音色的质量等因素,在具体音色基本元素的构建中,将从古琴琴弦振动理论和音律学理论入手,通过详细分析古琴振动的时域频域特征,并基于加权柯西函数和反傅立叶变换,来重构古琴琴音的时域、频域波形,完成对古琴基本音色重构仿真。最后,将录制与仿真相结合,通过解决混音播放问题,对古琴音色进行计算机仿真,建立了一个初步的古琴音色仿真系统,来形成古琴音乐的合成播放。

本文的研究只是一种初步的尝试性工作,希望有助于推动古琴音乐的音色重构与仿真方法与技术的发展。更希望通过这样的努力,能够为推动古琴艺术的传播和发展尽一些力所能及的微薄之力。

## 1 古琴音色分析

音色是古琴音乐的核心内涵。古琴的音色根据弹法不同大致分为散音、按音、泛音三种。散音是左手不按弦,仅以右手弹出的空弦音;按音也叫实音,是左手按弦、右手弹奏所发出的声音;泛音是左手在徽位处虚触琴弦、右手弹奏促使琴弦分段振动,而产生的声音。这三种取音方法构成了琴

收稿日期: 2007-06-22

修回日期: 2007-07-18

**作者简介:** 周昌乐(1959-),男,教授,博导,研究方向为计算琴学、机器心智、认知禅学等;顾亚丽(1983-),女,硕士生,研究方向为人工智能、算法作曲。

律在律制应用上的全部可能性<sup>[2]</sup>。

古琴由七根弦、十三个徽位组成, 每两个徽位之间又等分为十等分。弹奏时, 右手一般在一徽和岳山之间拨弦, 左手则在一徽至十三徽间按弦。不同的琴弦、徽位、弹法对应不同的音色。下面根据散音、按音和泛音不同弹法分别进行讨论<sup>[3]</sup>:

(1) 散音: 散音是左手放空, 右手弹拨弦所得的音, 所以音色的样本数量只需要考虑右手的指法。减字谱里右手指法共 11 种, 如下:

尸、乚、木、乚、夕、丁、彡、双、中、早。

前八种单指弹法称为右手八法。所以单指散音共有  $7 \times 8 = 56$  种。后三种是几个手指一起拨弦的弹法。情况相对比较复杂, 现分别讨论如下:

双: 拨, 弹弦组合有: 1.2 2.3 3.4 4.5 5.6 6.7, 共 6 种; 所以“拨”的散音有 5 种。

中: 刺, 是“拨”的反方向弹奏法, 所以其弹弦组合跟“拨”一样, 即 6 种。

早: 撮, 有两种, “小撮”的弹弦组合有: 1.3 1.4 2.4 2.5 3.5 3.6 4.6 4.7 5.7 9 种, “大撮”有 1.5 1.6 1.7 2.6 2.7 3.7, 共 6 种; 所以“撮”的散音有 15 种。

由以上分析, 散音的基本单音有  $56 + 6 + 6 + 15 = 83$  种。

(2) 泛音: 泛音是左手轻点琴弦的徽位之处, 右手同时拨弦所得的音色。考虑泛音时, 在右手的指法基础上还要考虑左手的指法。

从古琴的结构可知, 古琴有 13 个徽位, 所以左手指法应该是左手按弦手指数 4, 乘以徽位数 13。再将右手的指法一起考虑进去, 则泛音的数量为:  $4 \times 13 \times 83 = 4316$  种。

还有一个比较特别的弹奏方式“搂圆”, 因为它多用于泛音, 所以单独拿到泛音的范畴来考虑。“搂圆”是间隔一弦用“勾”, “抹”各弹一弦, 同时发声。其右手弹弦的组合有: 1.3 2.4 3.5 4.6 5.7, 共 5 种, 所以“搂圆”的泛音有  $4 \times 13 \times 5 = 260$  种。

因此, 泛音的基本单音共有  $4316 + 260 = 4576$  种。

(3) 按音: 按音是古琴里变化最多的一种音色, 也是古琴最富特色、最具表现力的一种音色, 尤其是走手音, 即滑音。基本的按音是左手按弦, 同时右手拨弦, 按弦的位置不定, 可在徽位上, 也可在徽位间。古琴的每两个徽位间包括十分, 所以左手按弦的位置一共有  $4 \times 13 \times 10 = 520$ , 再加上右手的弹奏方式, 一共  $520 \times 83 = 4316$  种 (4 是左手按弦的指数, 13 是徽位数, 10 是徽分数)。

还有两种很重要的按音就是“吟”和“猱”。其变化种类非常丰富。减字谱里的说明如下<sup>[3]</sup>:

十、彡、宇、紵、彡、彡、过、彡、彡、彡、彡。

总之, 古琴音色表现极其丰富, 演奏技法多样, 一个音有多种变化。这是区别于其他乐器音色的主要因素, 也是重构仿真的难点所在。

## 2 古琴音色重构方法

一根拉紧的琴弦在发声时, 不但有整根弦作为波长振动, 而且同时存在着分别以弦长的  $1/2$ 、 $1/3$ 、 $1/4$ 、……为波长的振动, 这些振动发出的声音频率依次是基频、基频的 2 倍、3 倍、4 倍……, 这些倍频音统称泛音。由于基频音的振幅最大, 所以它的响度最大, 其他倍频的音响度依次减小。琴弦的二倍频泛音振动的特点是整弦上有两个波长, 整弦长  $1/2$  处是振动的节点, 这里二倍频泛音的振幅为 0, 而这个节点却正是基频振动的波腹, 振幅最大, 如果用手指肚轻触这个节点, 会限制它的振动, 基频被抑制, 就能听到清晰的倍频声音。同样如果在 3 倍频音、5 倍频音的节点处抑制振幅, 就听到 3、5 倍频音, 只是音量比基音要小, 这就是泛音演奏的原理。古琴之所以有如此丰富的泛音, 是因为其发出的音内所含的倍频 (由弦序及徽位决定) 和各倍频的强度 (由不同的指法所对应的弦振动规律决定) 差异而引起的, 确定古琴所发之音所含倍频成分的主要依据是琴律<sup>[2]</sup>。

古琴律制中, 徽位决定着琴律的主要性质, 它决定琴律是以纯律为主的复合律制。按纯律定弦, 古琴各徽位在全弦上的位置是一徽  $1/8$ 、二徽  $1/6$ 、三徽  $1/5$ 、四徽  $1/4$ 、五徽  $1/3$ 、六徽  $2/5$ 、七徽  $1/2$ 、八徽  $3/5$ 、九徽  $2/3$ 、十徽  $3/4$ 、十一徽  $4/5$ 、十二徽  $5/6$ 、十三徽  $7/8$ , 某弦散音就是它的基频音, 各徽位泛音就是各徽位位置分母数的倍频音, 例如十徽泛音就是散音的 4 倍频。另外, 如果把一弦频率定为 1, 则各弦频率可以计算出来分别是: 一弦 1、二弦  $10/9$ 、三弦  $4/3$ 、四弦  $3/2$ 、五弦  $5/3$ 、六弦 2、七弦  $9/4$ 。对于给定的减字谱号, 即可确定其倍频 (弦所对应的频率 \* 徽位所在分节长度的分母)。人耳就是通过确定其基频来判断该音高度的。

通过上面的琴律分析可知在频域里基波至 18 ( $9/4 \times 8$ ) 倍频的能量配比关系以及谐频附近小范围内的频域波形集中体现着被演奏音的音高、音色及其能量信息。决定古琴音色的另一重要因素是各倍频的能量信息比, 反映在频域中即为各倍频的振幅。而振幅的大小是由弦振动情况决定的。

弦振动方程<sup>[5]</sup>定量描述实际位移变化。弦长为  $l$  的两端固定的弦, 若弦中张力为  $T$ , 在  $x=x_0$  处受到横向拉力  $F$  作用后开始振动, 相应的定解问题为:

$$\begin{cases} u_{xx} = a^2 u_{tt}, 0 < x < l \\ u(0, t) = 0, u(x, 0) = 0 \\ u(x, 0) = \phi(x), u_t(x, 0) = \psi(x) \end{cases} \quad (1)$$

$$\phi(x) = \begin{cases} \frac{F(l-x_0)x}{Tl} \\ \frac{Fx_0(l-x)}{Tl} \end{cases} \quad (2)$$

通过分离变量法求其解为

$$u(x, t) = \frac{2Fl}{T\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi x_0}{l} \cos \frac{n\pi a}{l} t \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (3)$$

由上面的方程可以看出, 它由不同频率, 不同相位, 不

同振幅的谐波叠加而成。且  $n$  次谐波的振幅跟  $1/n^2$  成正比。这样就得到了不同倍频之间的强度比例关系。

在实验中,设计函数模拟相应音从基频到18倍频区域的波形,根据给定的基频以及由弦振动方程确定1到18倍频峰值的幅度比例关系条件下,选取加权柯西函数<sup>[6]</sup>作为相似函数,不断的调整参数,确定参数后,反傅立叶变换到时域,重构古琴音色。

令  $Y(jw)$  为离散时间信号  $y(n)$  的离散傅立叶变换。则  $Y(jw)$  可以用如下算式得到<sup>[6]</sup>:

$$Y(jw) = \sum_{i=1}^n Y_i(jw), \quad Y_i(jw) = S_i(jw) * F_i(jw), \quad (4)$$

$$S_i(jw) = \begin{cases} A_i * \frac{a_i}{a_i^2 + (w - w_i)^2} & w_i - a_i \leq w \leq w_i + a_i \\ A_i * \frac{2}{|w - w_i|} & \text{其他} \end{cases}$$

上式中  $w(i)$  为指定音的基频或倍频,  $A(i)$  为基频点或者倍频点的振幅,  $a(i)$  用来调节基频或者倍频附近波形宽度,  $F(i)$  为关于正弦和余弦的函数。实际采样的时域波形见图1, 而采用上面方法进行实验时,通过调整参数,可以在时域及频域上构造出与实际采样波形相近似的波形,见图2。

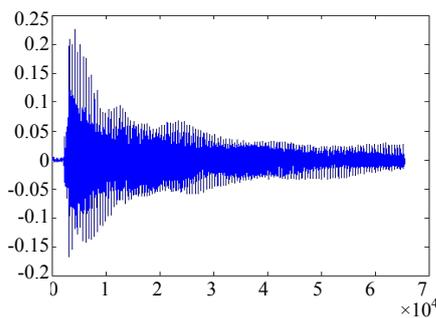


图1 实际采样的时域波形

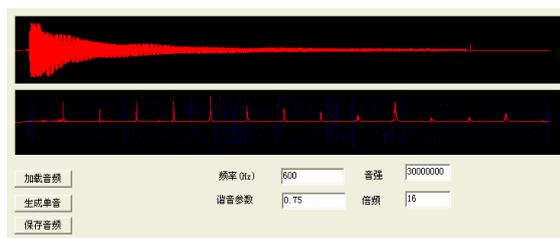


图2 仿真后的波形图 时域图(上) 频域图(下)

仿真结果经古琴演奏者的判别,认为比较贴近古琴的音色。从时域图对比上看,仿真效果也是不错的。频域的倍频数量也很接近,但各倍频的能量比例关系目前还没有精确的确定方案。只是按照一定的比例关系综合人的主观评价通过调整参数来确定。对于倍频振幅的衰减规律还有待进一步的研究。但从上述的研究分析可以看到,利用计算机重构古琴音色进行仿真不但方便快捷,而且切实可行,特别是其对任意古琴音色均可进行重构,因此潜力大,是古琴音色仿真的有效方法之一。

### 3 古琴音色仿真系统实现

基于古琴音色重构方法,初步实现了一个古琴音色仿真系统。该系统主要使用仿真或采集的单音色采样文件,根据要求播放乐谱,通过混音合成古琴曲。在混音处理中均采用 wav 文件格式来组织单音色音频和混音音频文件。系统实现类 SoundFile, 其封装对 wav 文件的读取、写操作等。

首先,除了仿真得到的基本音色外,古琴单音采样也是整个设计的基础部分,采样是通过录音的方式。录音的质量直接影响后期频谱分析的效果。为确保采样数据的准确性,对古琴弹奏者在音棚现场演奏的单音录音进行采集。在录音采样的过程中,希望尽可能完整的采集到古琴的所有单音。单音样本采集到后,通过音频处理软件 cooledit 进行进一步加工整理,如剪掉样本的多余部分、降噪等等,然后再将剪切下来的单音采用“左手弹法\_右手弹法\_徽位\_弦位”的命名方式保存至文件系统。

要将单音文件合成乐曲输出,必须经过混音<sup>[7]</sup>。在时域上,语音是短时平稳信号,对语音信号的处理是以语音样本缓冲区为基本单位,多个模拟音频源的混音,实际上是以样本缓冲区为基本单位的线性叠加。事实上,多路数字语音的混音也是基于此原理,假设有  $n$  路基于相同采样率的输入音频流进行混音,  $X_i(t)$  是  $t$  时刻的第  $i$  路输入语音的线性样本,则  $t$  时刻的混音值为:

$$m(t) = \sum X_i(t), \quad i=0, 1, \dots, n-1 \quad (5)$$

显然,当按(5)式进行线性叠加时,必然涉及到混音后的音频流  $m(t)$  线性样本的取值范围问题,如果该样本值超过了输出设备所允许的最大范围,就会产生噪声。因此,必须对混音后得到的样本值进行平滑处理。对于此类噪声的消除,基本的处理方法是:根据带噪声的音频信号幅度的平均值确定阈值,当信号幅度超过给定的阈值时,判定为脉冲噪声,然后对它进行适当的衰减。在本系统中,古琴音色文件音频采用采样频率为44100HZ、16位、单声道的数据格式。因此,采样值的范围是-232768~+32767,信号的正半周期用0~32767表示,负半周期用-232768~0来表示,没有信号时,采样值为0。因此,在此基础上进行多路混音算法的设计。算法以一系列的代表音符的音色文件和拍数作为输入。

基本混音算法按(5)式将各单音进行线性叠加,叠加结果若在-232768~+32767范围内,则不进行处理。若叠加结果大于+32767,则取为+32767,若叠加结果小于-32767,则取为-32767,以完成对此类噪声的消除。按照此方法创建缓冲区后,读入单音,然后对音色文件进行播放。具体算法描述如下:

Mixer (音色文件[], 拍数[])

Step1: 计算总音符数  $n$ ;

Step2: 创建新的wav临时文件temp.wav, 数据内容为空;

Step3: 初始化用于插入位置locate=0; 循环计数器  $i=0$ ;

Step4: 向temp.wav写入第一个音符数据; Locate+=第一

个音符时值长度相对的字节数;

Step5: 读入第*i*个音色文件到缓冲区1; 读入temp.wav文件的locate到temp.length部分到缓冲区2;

Step6: 将缓冲区1, 2中的信息线性叠加(按照上面所述方法确保叠加结果在-232768~+32767范围内), 写入缓冲区0;

Step7: 将缓冲区0中的内容写入temp.wav文件locate位置。

Step8: Locate+=第*i*个音符时值长度相对的字节数; 循环计数器*i*=*i*+1;

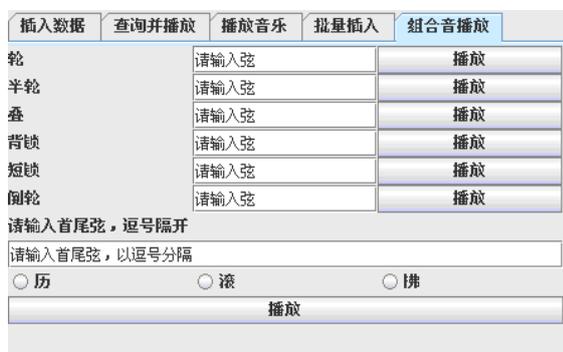
Step9: 如果*i*<*n*, 执行step5, 否则转入step10;

Step10: 播放temp.wav文件。

采用上述算法可以实现多路音频源的混音。实验表明, 该算法实现的混音能较真实地反映多个声音的混合效果, 并有效保持了声音的同步性。



标签一



标签五

图 3 系统界面示例

播放系统实现的主要功能为查询单音并播放、播放乐曲文件、插入单音、批量插入以及组合音的播放。根据功能要求设计的框架是五个标签, 每个标签一个面板, 图 3 所示为第一和第五个标签; 输入用户名和密码之后便登陆到主界面。前面几个功能的实现都很简单, 音色数据库的设计重点是组合音播放的实现。

组合音也是古琴里面变化非常多的一种音, 它是基于几种单音加上节奏的变化而得的一种比较特别的音。组合音不

被视为单音入库, 而是由单音进行组合播放出来。古琴中的组合音有以下几种<sup>[2]</sup>: 历、叠、轮、半轮、滚、拂、琐、长琐。

对于组合音的播放, 界面上分别放置以上几种组合音的标签, 对每一种音分别根据其弹奏方式写一个函数。每个标签旁边再添加一个文本框由用户输入需要选择的弦、或者弦的组合, 接着根据用户的输入搜索数据库里相应的单音, 最后加入每个单音的播放时间以控制其节奏。

系统具体实现之相关技术包括有数据库设计<sup>[8]</sup>, JDBC 数据库操作<sup>[9]</sup>, JMF 音频播放, 基于 wav 格式混音。这里就不再作一一介绍了。

### 4 结论

本文通过两种方式对古琴音色进行仿真。一是建立古琴音色库, 这种方法是在分析古琴音色的基础上, 录制以及进行后期处理建立音色库。二是重构音色, 通过对古琴琴弦的振动原理以及琴律的分析, 对频谱进行分析与仿真。比较而言, 第二种方法效果好于前者, 并且速度快, 音色全, 方便有效, 潜力大。基于这两种方法, 本文建立了一个初步的古琴音色仿真系统。总之, 古琴音色的计算机仿真研究, 还有许多问题需要进行深入探索, 比如对于倍频振幅的衰减规律问题的研究。当然本文的研究只是初步的尝试性工作, 希望能为推动古琴艺术的传播和发展提供一点技术性服务。

### 参考文献:

- [1] 章华英. 古琴[M]. 浙江: 人民出版社, 2005.
- [2] 童忠良, 谷杰, 周耘等. 中国传统乐学[M]. 福建: 福建教育出版社, 2004.
- [3] 成公亮. 减字谱指法符号简释[Z]. <http://www.cglgq.com/>.
- [4] 谭喜堂, 朱和美. 地铁列车驾驶仿真器声音仿真系统研究[J]. 城市轨道交通研究, 2006, (4): 56-59.
- [5] 郝玉华. 一维弦振动方程的可视化[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2006, (4): 12-15.
- [6] 刘乐. 钢琴琴弦谱振动分析及其音色重构[J]. 微计算机信息(测控自动化), 2005, 21: 10-1.
- [7] 刘新华, 李方敏, 旷海兰, 等. 基于数字语音教室的多路混音算法及应用[J]. 微计算机信息, 2005, 21: 34-36.
- [8] 王珊, 萨师煊. 数据库系统概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [9] 郎波. JAVA语言程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [10] 李伯虎, 柴旭东, 朱文海, 等. 现代建模与仿生技术发展中的几个焦点 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9):1871-1878. (Li Bohu, Cai Xudong, Zhu Wenhai, et al., Some Focusing Points in Development of Modern Modeling and Simulation Technology [J]. Journal System Simulation (S1004-731X), 2004, 16(9): 1871-1878.)