

文章编号: 2095-2163(2024)03-0168-06

中图分类号: TP181

文献标志码: A

基于模糊计算的音樂人工智能演奏系统设计

何雨梦¹, 何平²

(1 辽宁师范大学 音乐学院, 辽宁 大连 116029; 2 山东大学 计算心理学研究院, 济南 250101)

摘要: 本文设计了一种基于 MIDI 的音乐人工智能演奏系统,其特点是根据乐谱音乐要素审美的模糊性,运用模糊计算建立了能够调整声音变化参数的演奏解释规则。该系统在人机交互的作用下,会产生符合演奏者或学习者音乐表现需要的自适应、自调整功能。系统功能通过 MIDI 声音调整技术、音乐感知规则生成技术、音乐审美学习技术等环节实现。基于模糊计算的音樂演奏系统克服了 MIDI 音乐情感表现力的局限性,将演奏算法作为一种人工学习工具融入演奏技术系统中,从一定角度建立了音乐人工智能演奏的审美表现学习模式,为音乐演奏者提供了一种从审美感知到认知的学习训练系统。

关键词: MIDI; 演奏规则; 模糊计算; 演奏解释系统

Design of music artificial intelligence performance system based on fuzzy computation

HE Yumeng¹, HE Ping²

(1 School of Music, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China;

2 Research Institute of Computational Psychology, Shandong University, Jinan 250101, China)

Abstract: In this paper, a music artificial intelligence performance system based on MIDI is designed. Its characteristics are that according to the aesthetic fuzziness of musical elements of music, fuzzy computation is used to establish performance interpretation rules that can adjust the parameters of sound change. Under the action of human-computer interaction, this kind of music performance system can produce adaptive and self-adjusting functions that meet the musical performance needs of players or learners. The system functions are realized through three technical links, one is MIDI sound adjustment technology; second, music perception rule generation technology; third, music aesthetic learning technology. The music performance system based on fuzzy calculation overcomes the limitation of MIDI music emotion expression, integrates the performance algorithm as an artificial learning tool into the performance technology system, establishes the aesthetic expression learning mode of music artificial intelligence performance from a certain point of view, and provides a learning and training system from aesthetic perception to cognition for music players.

Key words: MIDI; performance laying rules; fuzzy computation; performance interpretation system

0 引言

21 世纪以来,以音频技术和 MIDI 技术为核心的计算机音乐得到了飞速发展,如何实现计算机音乐智能化—音乐人工智能,如何在现有 MIDI 系统基础上,构建一个具有审美表现特征的音乐演奏系统,是音乐表演、音乐教育和计算机研究等领域共同关注的问题之一^[1]。现有的 MIDI 系统是一个通用的音乐编辑与演奏系统,其基本功能是以 MIDI 文件的形式存储一段音乐,生成一个命令列表,当演奏者在 MIDI 键盘上演奏一段音乐时,可以实时生成这些命令,也可以直接从乐谱中获得这些命令^[2]。

为了播放音乐,这些命令被输入到一个 MIDI-player (包括一个 MIDI-player 和一个 MIDI-instrument) 中,MIDI 技术可以对这些命令进行操作,通过调整乐谱音符的音量、节奏和时间等音乐要素,实现计算机音乐演奏的过程。

实际上,从音乐的存在性和动态性角度,音乐理解与解释并没有确定的标准^[3]。对于计算机音乐演奏系统来说,乐谱的音乐要素作为参数可以根据演奏者的演奏特点进行调整,如何调整取决于演奏者对乐谱的理解和认知^[4]。随着 MIDI 系统音频识别与处理的完善,音乐演奏智能系统能够通过调整音乐要素的数据特征改变音乐演奏的效果^[5]。并

基金项目: 2022 年辽宁省教育厅高校基本科研项目(LJKMR20221374)。

作者简介: 何平(1956-),男,教授,主要研究方向:模糊集理论及应用、人工智能。

通讯作者: 何雨梦(1982-),女,副教授,硕士生导师,主要研究方向:数字音乐演奏、音乐人工智能。Email: dl_hym@126.com

收稿日期: 2023-05-16

且在音乐情感表现系统设计中,一部音乐作品演奏的情感表现特征不是仅仅依据音频数据,演奏的肢体动作也是音乐情感表现的基本特征^[6]。但是,现有的研究在演奏情感视频数据特征识别和处理方面还没有理想的方法。因此,目前的音乐智能演奏系统与实际的演奏家演奏还有较大的差距,这也是音乐人工智能研究的瓶颈^[7]。

针对计算机音乐演奏的人性化、智能化等方面的问题,研究者对基于 MIDI 的演奏系统进行了改进,引入了元学习、深度学习和增强学习等算法,提高了演奏系统的自学习、自组织和自适应功能。通过输入调整命令,修改乐曲的音量和节奏等要素的数据值,经过多次反复演奏试验,来获得满意的效果^[8]。从技术更新角度,要实现人性化的特点,就需要改变固有的标准和协议,对 MIDI 系统进行较大更新,这也是 MIDI 系统在实现智能化方面的难题^[9]。为了解决音乐演奏的人性化和智能化问题,本文在原有 MIDI 演奏机械解释系统中引入模糊计算技术,主要贡献在于设计了一种具有模糊推理的演奏解释规则,从而使音乐演奏系统体现了智能化特点。

1 MIDI 系统概述

MIDI (Musical Instrument Digital Interface) 技术是音乐界,特别是编曲领域最广泛的音乐标准格式,也可称为“计算机能理解的乐谱”—电子音乐。是用音符的数字控制信号来记录音乐,通过 2 种数据格式处理声音:一是存储在 CD 上的音频数据,包含与声音相关的所有物理信息(所有频率的所有振幅);二是 MIDI-data,是用于激活电子乐器上声音的命令^[10]。

在一个 MIDI 系统中,音符可以通过系统用户界面输入到音符行(音符编辑),这类似于作曲家在谱纸上写音符的过程,该系统将输入的音符通过编辑器保存到 MIDI 文件中,其他音乐功能也可以通过这种编辑方法输入并保存到 MIDI 文件中(如:渐强、加速、踏板等)。另外,还可以直接在 MIDI 乐器上演奏音符,演奏者能够感知到音乐录制(记录音符)。一般来说,录制过程分为 2 种模式:一是步进录制,一个音符一个音符地输入;二是实时录制,音符实时播放。实际上,MIDI 播放意味着在 MIDI 系统上执行一个 MIDI 文件,对于一个 MIDI 文件,传统的 MIDI 系统只能调整 MIDI 音乐的主要节拍、每个播放声道的主音量,以及演奏时每个声道的特殊效果(如:小提琴演奏中的滑音)。这些都是以数据

处理形式实现的格式化、规范化计算机音乐演奏(MIDI 演奏),是一种基于电子自动化的弱人工智能音乐演奏,目前已经较为成熟,但是与人类的音乐演奏还有较大的距离。

基于 MIDI 文件的音乐演奏与演奏家演奏的主要区别是,MIDI 系统预先设置的音乐解释是基于音乐演奏规则,这种演奏系统仅仅是完成了音乐的“机械播放”,无法实现不同情感的音乐表现意向,无法根据演奏技术的变化展现演奏家的风格与个性化特点^[11]。为了提高 MIDI 音乐演奏系统的智能化程度,需要对 MIDI 文件增加调整功能。例如:通过输入调整命令,修改乐曲的音量、节奏、时长等音乐要素,或者一个音符一个音符地单独调整所需要的变化^[12]。但是,采用现有 MIDI 系统实现对所需音乐演奏功能的调整,就必须对 MIDI 系统进行较大更新,还需要经过多次的实验分析。另外,在实际技术设计中,有时需要单独修改音量,调整每个音符开始和结束的时间,有时需要手动对每个音符进行修改,通过多次反复演奏试验,直到得到满意的效果^[13]。这种 MIDI 系统的不完备性影响了其自身的发展,无法实现音乐演奏的智能化。

2 音乐演奏的模糊计算

2.1 音乐的模糊性

从音乐本体论角度,单纯的音符序列、乐音描述和演奏并不能体现音乐的真正意义,只有将音乐美的模糊性融入音乐演奏中,音乐的主客观意义才能得到体现^[14]。音乐美是一种“模糊美”,模糊性是音乐的本质属性,模糊性认知是人类的一种特殊智能,人们正是基于这种“模糊性”来感知、创作和欣赏音乐。只有这样才能明确如何把模糊性融入到音乐审美中,为欣赏者带来“模糊美”的精神享受^[15]。

2.1.1 音乐要素的模糊性

音乐要素包括基本要素和形式要素,如音的高低、长短、强弱、音色等等,是音乐的基本要素。在音乐作品的描述中,相对来讲,音的高低、长短、强弱、音色具有一定的界定,但在实际音乐审美表现中,这些音乐基本要素是没有明确边界的,需要演奏者具有对音乐表现客体的模糊认知。实际上,不同的演奏者,由于在音乐客体方面具有不同的模糊认知,会出现不同的音乐表现形式与效果。因此,演奏者是通过音乐实践过程,建立自身对音乐基本要素感知与认知的模糊空间。另外,音乐基本要素相互结合,形成音乐常用的“形式要素”,即节奏、曲调、和声,

以及力度、速度、调式、曲式、织体等。这些音乐形式要素具有不同的模糊关系,可以产生不同模糊程度的音乐表现手段。基于这些音乐要素等模糊性概念,可以研究音乐序列构成的模糊性、音乐语言的模糊性、人类各种情感的模糊性等问题。

2.1.2 音乐要素模糊性表示方法

从音乐表演实践可知,音乐审美能力决定于演奏者(或演唱者)对音乐要素模糊性的感知与认知。音乐要素审美的模糊感知与认知空间是表演者审美认知的基础。人脑具有一个音乐模糊感知空间,是一个音乐要素模糊集合。具体描述如下:

假设音乐要素论域为 U ,称映射 $\mu_A:U \rightarrow [0, 1]$, $u \mapsto \mu_A(u)$ 确定了音乐要素论域 U 的一个模糊集 A 。其中, $\mu_A(u)$ 称为 A 的隶属度(或称模糊度)^[16]。在音乐要素的感知与认知过程中,人们具有对这种模糊度的感知能力,并能够做到在数量上调整的本能。

2.1.3 音乐语言的模糊性

音乐符号用语的模糊性。例如,乐谱要求“渐快”或“渐慢”及“稍快”或“稍慢”,这“渐”或“稍”是没有统一标准的。在演奏实践中,演奏者的实践智慧是建立一种“渐”和“稍”的审美模糊性的感知量表。通过对不同音乐表现中“渐”和“稍”的意义,来选择不同模糊程度的“渐”和“稍”。类似这样的用语还有许多,如力度用语强弱(“f”、“p”,“<”、“>”)等都要建立审美模糊感知量表。

音乐情感用语的模糊性。音乐感情用语或称为音乐感情提示,是音乐表现必备内容。如“愉快地”、“怀念地”、“热情地”、“深情地”等等。其中,“愉快地”,达到什么程度,比那个时候或那件事还愉快,恐怕无人能精确说清;“怀念地”,达到了怎样的怀念地步;“热情地”,热到什么程度等等,都需要建立模糊感知度。由于音乐的模糊语言具有许多类别,有声音范畴的、有自然界的各类现象、有哲学角度的语言类型、有心理特征类型、还有社会现象类型,等等。在研究中要运用模糊方法建立各种情感与形象属性特征,以不同音乐效果去模拟情感模糊度,达到有效的情感表现的艺术定型。在分析模糊情感与形象特征时,要考虑音乐艺术本身的特点,如音乐中的记忆、想象、联想等是不可造型的艺术,并在瞬间或长期都可以有着不同层次的模糊情感。

2.2 演奏规则的模糊计算

2.2.1 隶属度函数

对每个语言输入(输出)值建模,通常采用4个

隶属度函数,以重叠三角形或梯形(单例)的形式出现。从平均分布的隶属函数开始,以交互方式修改输入和输出隶属函数的分布,以实现调优目的。然而,由于这个调优选项需要调整大量参数,并且不能在线工作,对此可以选择后处理和叠加单元的调优参数。

2.2.2 去模糊化

设所有激活规则产生的输出值 u 的隶属函数由 r 个单例给出 $\{\mu_i, u_i\}, i = 1, \dots, r$ 。其中, u_i 是第 i 个单例的位置被激活为:

$$\mu(u) = \begin{cases} \mu_i, & \text{if } u = u_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

如果对 $\forall i \neq j$ 有 $u_j > u_i$, 则 $u_{\max} = u_j$ 。并且

$$u_{\text{COG}} = \frac{\sum_{i=1}^r \mu_i u_i}{\sum_{i=1}^r \mu_i} \quad (2)$$

从 $\mu(u_i)$ 导出明确实际输出值的最常见策略是:

(1) MAX (maximum) 去模糊化。在激活规则产生的输出值中,选择最佳输出值 u ;

(2) COG(重心)去模糊化。在激活规则产生的输出值中,确定一个折中的方案。这一音乐描述问题表明,MAX 和 COG 去模糊化都有本质的局限性。让完全激活的规则 R_1 产生输出特征 $\mu_1 = 1, u_1 = 2$ 。在某些情况下,可以对程度做适当的调整。假设部分激活规则 R_2 , 产生输出隶属函数 $\mu_2 = 0.8, u_2 = 1$ 。

一般来说,需要选择一种去模糊化策略,将各个规则的等向建议叠加起来,以便相互放大。无论是 MAX 还是 COG 模糊化都不具有这种性质,因此建议引入扭矩(TOR)去模糊化:

$$u_{\text{TOR}} = p \sum_{i=1}^r \mu_i u_i \quad (3)$$

其中, p 为比例因子。图1说明了这种去模糊化具有所需的属性(当 $p = 1$ 时,得到的输出值 u , TOR 对应于质量 μ_i , 考虑到相应值与中性点 $u = 0$ 的正或负距离所产生的扭矩。),这就是使用 TOR 去模糊化方法的主要原因。

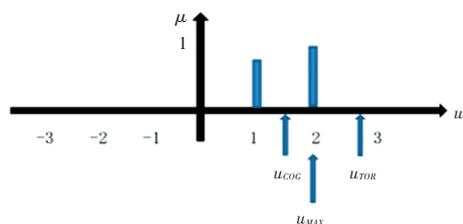


图1 输出隶属度函数的去模糊化

Fig. 1 Defuzzification of the output membership function

图1表示2个规则的2个等向推荐,分别通过COG、MAX、TOR去模糊化,得到 $u_{COG} = 1.55, u_{MAX} = 2, u_{TOR} = 2.8$ 。

2.2.3 处理单元

设计模糊调整器,使每个输出变量的取值范围在 $-1 \leq u \leq +1$ 范围内归一化。这里, $u > 0$ 时,表示需增强右手音符(节奏/持续时间)的音量; $u < 0$ 时,表示需要减弱左手音符的音量。后处理单元将模糊调整器的输出值 u 转换为如下值:

$$\hat{u} = \begin{cases} \varepsilon(a) + b \frac{1 - e^{-cu}}{1 - e^{-c}}, & \text{if } u \geq 0 \\ \varepsilon(a) + d \frac{1 - e^{cu}}{1 - e^{-c}}, & \text{if } u \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, a, b, c, d 是具有非负值的调优参数,这些非负值分别由模糊修改器的每个输出变量指定。在这里, $\varepsilon(a)$ 是一个随机变量,允许音符的音量、节奏和持续时间发生随机变化。这些变化的数量可以通过参数 a 进行调整。

本系统提供了这个随机选项,是因为钢琴家们不可能完全一样地控制每次演奏,以完全符合演奏者想要的音乐表现意向。值 b 和 d 定义了 \hat{u} 的值范围,在 $\varepsilon(a) = 0$ 的情况下,由 $-d \leq \hat{u} \leq b$ 给出。因此,可以通过 b 和 d 来调整模糊调整器影响的一般强度。 d 值决定函数的斜率,可以对 u 的小变化产生显著(可听)效果程度进行调整。

2.2.4 叠加单元

在MIDI文件中,不同的音高用0~127来表示。其中,60表示256 Hz的C。为了表述得更加直观,可以按照12平均律对其进行分组,每12个音(一个八度)分为一组,则每个MIDI音符 Mpn (midi pitch number)都可以用音组 Pc (pitch class)和音高 Oct (octave)表示出来:

$$Oct = Mpn/12, \quad Pc = Mpn\%12 \quad (5)$$

这样一来,音高就可以用下列数组表示为 a_1, a_2, \dots, a_{12} 。本文中的音量用整数变量 k 编码, $0 \leq k \leq 127$ 。将改进的机械描述的这些 k 值和后处理单元的输出 \hat{u} 叠加在一起:

$$\hat{k} = \begin{cases} \text{Int}[k + \frac{\hat{u}}{b}q(127 - k)], & \text{if } \hat{u} > 0 \\ 0, & \text{if } \hat{u} = 0 \\ \text{Int}[k + \frac{\hat{u}}{d}qk], & \text{if } \hat{u} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\text{Int}[z]$ 将元素 z 四舍五入到小于或等于 z 最接近的整数; q 是一个调优参数, $0 \leq q \leq 1$,允许

调整模糊修改器的影响强度。

在此,用正数 x (ms)来编辑音调的节奏。根据改进的机械解释的值 x 与后处理单元相应的输出 \hat{u} 叠加:

$$\hat{x} = 10^{\frac{\hat{u}}{p}x} \quad (7)$$

其中, p 为正调谐参数。该方法规定,由 $\pm u$ 产生的 x 的增减在 x 的对数尺度上是对称的。

最后,将音调的持续时间编辑为正值 $y, 0 \leq y \leq 1$ (音符在持续时间上的比率)。改进的机械描述的这些 y 值,是根据如下后处理单元相对应输出 \hat{u} 的叠加:

$$\hat{y} = \min(1.1 \cdot 10^{\frac{\hat{u}}{p}y}) \quad (8)$$

其中, p 为正调谐参数。这里,允许 $\hat{y} > 1$ 实现超连奏,这意味着前一个音符在下一个音符开始后不久结束。

以上提供的模糊调整方法是一个初步估计,而模糊计算方法为MIDI音乐演奏提供了一种智能模型,这种智能模型是在系统运行中,通过学习过程不断改进,在实际运行中可以利用爱因斯坦模型进行优化与完善。具体来说,就是通过限制变量 \hat{u} 的取值范围达到学习的目的。可以选用如下形式:

$$a \oplus b = \frac{a + b}{1 + \frac{ab}{c^2}} \quad (9)$$

通过模糊计算得到的演奏解释是一种符合演奏者心理特征的审美规则。一般情况下,这种演奏解释调整是采用基于规则的模糊推理系统,基本形式如下:

$$\text{IF } \langle \text{condition} \rangle \text{ THEN } \langle \text{warning/veto} \rangle \quad (10)$$

这些能够通过具有超推理的双向模糊系统与正规则一起处理。众所周知,传统的Mamdani模糊系统是一个通用的近似器,允许在输入/输出特性中生产任何所需的结果^[17]。因此,使用消极规则,原则上不会导致新的特点,否定规则的使用在定性知识的处理中提供了更多的透明度。

3 演奏系统设计

具有模糊计算的MIDI文件系统基本结构如图2所示,将模糊计算方法引入MIDI演奏系统,就可以实现具有演奏规则的解释功能。该系统的输入是乐谱或乐器实时演奏(图2中序号1),输出是能够被输入到MIDI系统播放器中的MIDI文件^[18]。

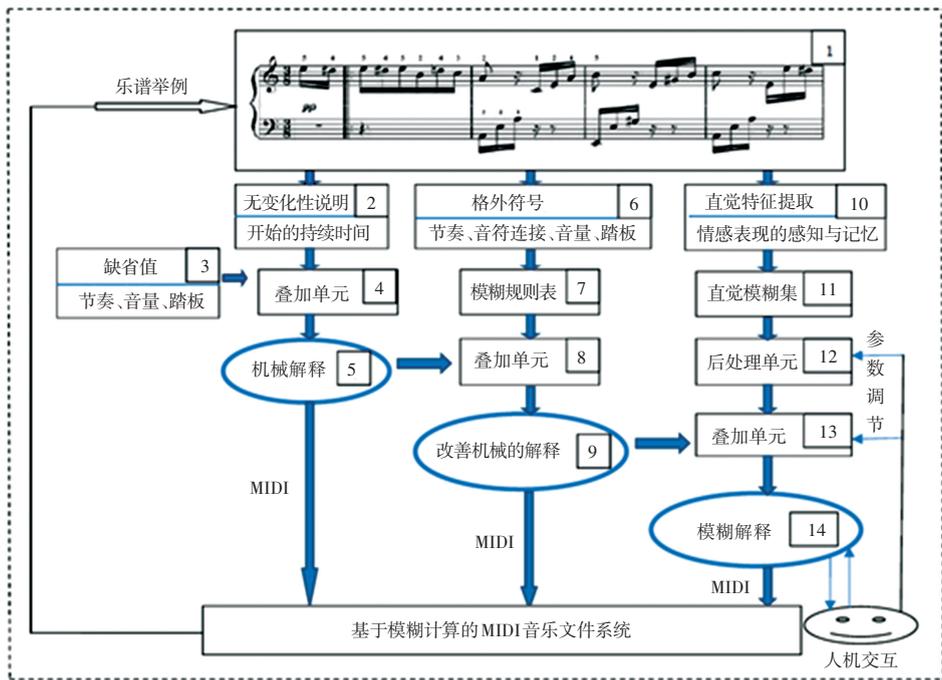


图2 音乐演奏解释系统的基本结构

Fig. 2 Basic structure of music performance interpretation system

图2是一个计算机和软件工具DORA所组成的系统,面向Windows软件涵盖了广泛的功能。与Matlab/Simulink等其他现有工具相比,DORA可以设计出更灵活、更先进的模糊系统,如带有TOR去模糊化的模糊系统、通过推理滤波器去模糊化的模糊系统和双向模糊系统等。研究可知,不仅可以处理MIDI音乐演奏的可用规则,也可以处理不可用规则。通过模糊计算的MIDI文件系统,在计算机的MIDI接口(声卡)上运行模糊MIDI-player。

3.1 音乐演奏的机械解释

传统的计算机音乐(MIDI自动演奏)就是一种机械演奏模式。对输入的乐谱,演奏系统中的音乐解释模块将根据乐谱中界定的音高、节奏、时长、强弱、音色等要素,对乐谱演奏规则进行解释与数据设定,然后形成乐谱演奏的MIDI文件形式,这就是基于机械解释的音乐演奏。通常情况下的MIDI演奏系统,是针对乐谱音符数值进行编码后的实际乐曲播放。从图2可见,模块1中表明这段音乐的编码信息被分为2部分:第一部分是“无装饰”记录和音符对应的“具体说明”,以及音符开始时间和每个音符的持续时间;第二部分涉及音符演奏的附加说明,例如有关节奏信息、连奏、断奏和踏板等演奏基本方式。在MIDI播放演奏系统的初始阶段,只考虑第一部分的基本信息(模块2)和添加默认值节奏、音

量和踏板(模块3、4),从而生成一个MIDI文件(模块5)。这种基于确定演奏文件的MIDI演奏是一种简单机械演奏,没有引入情感表现的演奏规则模糊解释。

3.2 音乐演奏的模糊解释

在演奏系统信息处理的第二步,使用一个附加的信息块(模块6)来修改音乐表现解释;使用一个可选的查询表(模块7),将整块附加符号的每一种符号类型转换为音乐表现解释的固定修改;将这些修改(模块8)叠加到音乐表现解释上,得到了一个MIDI文件(模块9),代表了改进的音乐演奏解释,意味着可以听到乐谱中明确包含的所有音乐符号。但是,这种演奏效果并不是演奏家演奏的音乐。

为了改进原有的机械描述,通过采集音乐专家演奏信息和音乐文献分析,运用模糊计算来模拟演奏家的音乐表现效果,具体处理步骤如下:

(1)对音乐要素的编码信息进行预处理,以评估规则前提中考虑的预定义变量/特征的值(模块10)。

(2)将这些值输入模糊修正器(模块11)。这是一个由模糊化单元、规则库、推理机和反模糊化单元组成的模糊系统。

(3)模糊修正器的输出值通过一个后处理单元(模块12)进行细化,并显示透明的调整参数,允许

交互式调整模糊修正器的输出值,即具有个性化特征。

(4)将后处理单元的输出值叠加(模块13)到改进的力学解释上。此外,叠加单元显示出可实时调谐的透明参数。

(5)得到模糊解释(模块14)。本文的音乐演奏系统,是在现有的机械音乐演奏系统中,引入了音乐要素的模糊解释,也是对传统MIDI自动音乐演奏进行了智能化改进,在一定程度上提升了音乐情感的表现力。

4 结束语

本文在MIDI系统中引入模糊计算,提升了音乐演奏审美智能化,为演奏者和学习者提供了一个音乐演奏感知与认知学习平台。利用模糊计算方法可以为许多类似风格的音乐作品设置通用演奏规则,从而接近演奏者的音乐情感表达特点。研究表明,一个音乐演奏解释系统是基于演奏家的演奏实例,将其音乐表现力的音乐处理过程建立相对应的规则,不同演奏家的音乐意向与个性化特征是通过模糊形式化描述来处理的,通过对各种特点的音乐意向与个性化音乐演奏的组合分析,达到了音乐表现审美智能化的目的。

参考文献

[1] MIRANDA R. Handbook of artificial intelligence for music [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2021.

[2] TOJO S. Computational reconstruction of cognitive music theory [J]. New Generation Computing, 2013, 31(2):89-113.

[3] 梁晓晶,李子晋. 音乐与计算机的跨学科对话—2018 音乐人工智能发展研讨会侧记[J]. 人民音乐, 2019(3):82-84.

[4] JUSLIN P N, KARLSSON J, LINDSTRÖM E, et al. Play it again with feeling: Computer feedback in musical communication of emotions [J]. Journal of Experimental Psychology: Applied, 2006, 12(2):79-95.

[5] ZANON P, POLI G D. Estimation of time-varying parameters in rule systems for music performance [J]. Journal of New Music Research, 2003, 32(3):295-315.

[6] WELLHAUSEN J. Towards automatic music transcription: Extraction of MIDI-data out of polyphonic piano music [J]. Systemics, Cybernetics and Informatics, 2004, 3(3):39-45.

[7] SANTORO A, BARTUNOV S, BOTVINICK M, Wierstra, Daan, and Lillicrap, Timothy. Meta-learning with memory-augmented neural networks [C]// Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning. New York: dblp, 2016: 1842-1850.

[8] MAZUROWSKI L. Computer models for algorithmic music composition [C]// Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems. Wroclaw, Poland: IEEE, 2012:733-737.

[9] JUN S, RHO S, HAN B J, et al. A fuzzy inference-based music emotion recognition system [C]// 2008 5th International Conference on Visual Information Engineering (VIE 2008). Xi'an, China: IEEE, 2008: 673-677.

[10] 井音吉,李圣辰. 计算机自动作曲综述:一种通用框架[J]. 复旦学报(自然科学版), 2020, 59(6):639-657.

[11] CHELARUC. Sense and intuition in music [C]// Proceedings of the 2011 3rd International Conference on Future Computer and Communication (ICFCC 2011). Romania: ASME Press, 2011: 1-6.

[12] ZHAO Wei, LI Xiaoli, LI Yang. Extraction and evaluation model for the basic characteristics of MIDI file music [C]// Proceedings of the 2014 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Changsha, China: IEEE, 2014:2083-2087.

[13] HANK M, ZIN T, TUN H M. Extraction of audio features for emotion recognition system based on music [J]. International Journal of Scientific & Technology Research, 2016, 5(6):53-56.

[14] 何雨梦. 键盘演奏与实践智慧[M]. 北京:中国书籍出版社, 2020.

[15] HE Yumeng, HE Ping. Computing model of musical multiple perception based on memory mapping perception inversion [C]// Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer, 2020:95-101.

[16] ZADEHL A. A new direction in AI: Toward a computational theory of perceptions [J]. AI Magazine, 2001, 22(1):73-84.

[17] KIENDL H, KISELIOVA T, RAMBININTSOA Y. Fuzzy interpretation of music [EB/OL]. [2004-05-24]. <http://dx.doi.org/10.17877/DE290R-5778>.

[18] MOREIRAP S D C, TSUNODA D F. Recognition of emotions in music through the Adaptive-Network-Based Fuzzy (ANFIS) [J]. Journal of New Music Research, 2021(50):342-354.

[19] HE Yumeng, HE Ping. Design of artificial music intelligence system based on fuzzy perception learning [J]. Journal of Physics, 2019(1237):1-7.

[20] HE Yumeng. Design of musical performance mode based on cooperative learning [M]// WU Y. Software engineering and knowledge engineering: Theory and practice. Advances in Intelligent and Soft Computing book series (AINSC). Berlin/Heidelberg: Springer, 2012, 115:271-276.