

面向蒙古族歌曲旋律的自动伴奏算法

曹西征^{1,2}, 牛靖雯¹, 吴瑞琪¹, 孙志勇¹

(1. 河南师范大学 计算机与信息工程学院, 河南 新乡 453007;

2. 智慧商务与物联网技术河南省工程实验室, 河南 新乡 453007)

摘 要: 自动伴奏技术基本建立在欧洲七声大小调式的基础上, 而针对中国五声民族调式的自动伴奏研究还非常薄弱。为此, 面向蒙古族歌曲旋律, 提出一种新的自动伴奏算法。根据蒙古族歌曲旋律的特征构建伴奏和弦生成算法, 利用该算法和预先构建的和声进行规则库为主旋律生成伴奏的和弦序列。设计伴奏音型匹配算法, 从预先构建的伴奏音型知识库中选取合适的伴奏音型, 对选取的伴奏音型进行模进, 从而生成伴奏。实验结果表明, 该算法对于基础薄弱人群的认可度较高, 可以满足他们对音乐的伴奏需求。

关键词: 自动伴奏; 蒙古族歌曲; 和弦序列; 伴奏音型; 模进

中文引用格式: 曹西征, 牛靖雯, 吴瑞琪, 等. 面向蒙古族歌曲旋律的自动伴奏算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(7): 304-309.

英文引用格式: Cao Xizheng, Niu Jingwen, Wu Ruiqi, et al. Automatic Accompaniment Algorithm for Mongolian Song Melody[J]. Computer Engineering, 2016, 42(7): 304-309.

Automatic Accompaniment Algorithm for Mongolian Song Melody

CAO Xizheng^{1,2}, NIU Jingwen¹, WU Ruiqi¹, SUN Zhiyong¹

(1. College of Computer and Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China;

2. Engineering Lab of Intelligence Business and Internet of Things, Henan Province, Xinxiang, Henan 453007, China)

【Abstract】 Automatic accompaniment technology is mainly based on the seven tones and the major and minor modes of Europe, and it is still very weak in the research on the five-tone national mode of China. For this reason, an automatic accompaniment algorithm is proposed, which is oriented to the melodies of Mongolian songs. Firstly, the accompaniment chord generation algorithm is constructed according to the melody features of Mongolian songs. And the accompaniment chord sequence for the main melody is generated by this algorithm and the pre-constructed harmony progression rule base. Secondly, the accompaniment figure matching algorithm is designed, and the appropriate accompaniment figure is selected from their pre-constructed knowledge base. Finally, the whole accompaniment is generated by sequencing to the accompaniment figure. Experimental results show that the proposed algorithm is highly recognized by people with little or no musical knowledge, and can meet the accompaniment demands of them.

【Key words】 automatic accompaniment; Mongolian song; chord sequence; accompaniment figure; sequence

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.07.051

1 概述

蒙古族是一个生活在北方草原、逐水草而居的游牧民族。在漫长的岁月里, 勤劳勇敢的蒙古族人民在创造自己美好生活的同时, 也创造了独特的音乐艺术。在蒙古草原上流传着许多优美动听的民

歌。长调悠扬、节拍自由, 特殊的真假声演唱给人留下深刻的印象; 短调节奏活泼、热情爽朗, 许多脍炙人口的小调至今盛唱不衰^[1]。像《草原上升起不落的太阳》、《敖包相会》、《美丽的草原我的家》都是家喻户晓的蒙古族风格歌曲。

自动伴奏是使用计算机模拟人在创作音乐伴奏

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61402153); 河南省重点科技攻关计划基金资助项目(122102210054); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划基金资助项目(2011GGJS-061); 河南师范大学青年骨干教师基金资助项目(2010-03)。

作者简介: 曹西征(1977-), 男, 副教授、博士, 主研方向为人机交互、智能作曲; 牛靖雯, 硕士研究生; 吴瑞琪, 博士研究生; 孙志勇, 硕士研究生。

收稿日期: 2015-07-01

修回日期: 2015-07-29

E-mail: caoxizheng@126.com

时的逻辑过程,控制伴奏和声的自动生成,尽可能地降低人在伴奏创作中的介入程度,属于算法作曲(自动作曲)研究的一个分支^[2-4]。目前,自动伴奏使用的方法大部分源自于算法作曲领域中的方法,例如马尔可夫链^[5-7]、随机过程、人工神经网络、音乐文法、遗传算法和音乐知识库等^[8]。常见的自动伴奏软件有PG MUSIC公司的BAND IN A BOX系统和微软公司基于隐马尔可夫模型构建的Songsmith实时伴奏系统(又称Mysong)^[9-10]。国产伴奏软件有CuteMIDI、TT作曲家、作曲大师等。

这些自动伴奏技术和系统可以比较精确地分析大小调体系下旋律进行的局部特征,并已在提取和弦方面取得了很大的成效。但是,它们还存在下面的不足之处,例如旋律进行的全局特征分析的不够;在中国五声性调式方面表现出和声与旋律风格的不协调。这是因为五声调式和大小调式在音的倾向性方面是不同的,例如大调中“135”是稳定音,其余是不稳定音;而民族调式常以“三音列”进行,例如“123”,“235”等。这些技术具备大众化特征,缺乏个性,因此,难以对中国民族音乐尤其是蒙古族风格这一特定音乐进行有效处理。为此,本文提出一种面向蒙古族歌曲旋律的自动伴奏算法。该算法通过和弦能量叠加的方法获取伴奏和弦序列,然后根据伴奏音型知识库选择合适的伴奏音型,最终生成全局化的伴奏声部。

2 算法设计

为旋律添加伴奏声部首先需要将主旋律分解成若干个音列,并对每个音列进行和弦的内涵分析,从中提取可能的和弦,然后结合音乐风格与和弦进行的相关规则生成可接受的和弦进行。在此基础上,根据音乐风格及节奏特点选择合适的伴奏音型,以伴奏音型中各个音的关系为模板,对和弦进行中各个和弦聚合或展开,从而生成伴奏声部。

2.1 伴奏和弦生成算法

考虑到蒙古族歌曲的旋律特征,将旋律 M 按小节分解成若干个音列 NS ,如果是不完整小节则用休止符来补充。用公式可表示为 $M = \{NS_1, NS_2, \dots, NS_i\}$,第 i 个音列可表示为 $NS_i = \{n_1, n_2, \dots, n_s\}$,它对应的和弦集合表示为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}, n \leq 3s$ 。 c_n 为音列中音符 n_s 作为和弦音时对应的和弦。根据和声的相关音乐理论可知,伴奏和弦的提取与音符的时值、强弱拍以及音符在和弦中所处位置等因素相关,因此,可以用音符 n_s 的时值信息、位置信息以及音符 n_s 在和弦内的位置等参数来计算和弦 c_n 的能量值,如下:

$$E_{c_n} = \sum (t_s + p_s) \cdot cp_s \quad (1)$$

其中, t_s, p_s, cp_s 分别表示音符 n_s 的时值、音符 n_s 所处强弱拍位置、音符 n_s 和弦属性对 c_n 的能量分值。前2个参数可从乐谱的音符序列中直接提取,而参数 cp_s 的计算要复杂一些。当 n_s 作为 c_n 的和弦外音时, cp_s 置为0;当作为和弦音时,根据 n_s 在 c_n 内的位置,按照一元音、二元音、三元音的比例 $p = f:s:t$ 为 cp_{n_s} 分配相应的能量分值。若一元音、二元音、三元音是三度叠置的,则它对应着三度叠置三和弦的根音、三音、五音,否则是特殊形式的民族风格的和弦。 p 的值具有一定不确定性,为此,这里采用模糊推理来实现。

定义2个语言变量“一元比例 f ”和“三元比例 t ”,定义论域 $U = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$,在 U 上定义2个语言值: $\{\text{修饰}, \text{强调}\} = \{X, Q\}, X = (1, 0.9, 0.3, 0.05, 0, 0, 0), Q = (0, 0, 0, 0.05, 0.4, 0.9, 1)$ 。根据蒙古族歌曲的内涵特征,可抽象出如下模糊控制规则。

规则1 如果 f 为修饰,那么 t 为强调。

规则2 如果 f 为强调,那么 t 为修饰。

下面计算这2种控制规则的真域,分别如下:

$$\begin{aligned} \mu_{R_1}(f, t) &= [\mu_X(f) \wedge \mu_Q(t)] \vee [1 - \mu_X(f)] \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.05 & 0.4 & 0.9 & 1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.4 & 0.9 & 0.9 \\ 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 0.95 & 0.95 & 0.95 & 0.95 & 0.95 & 0.95 & 0.95 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{R_2}(f, t) &= [\mu_Q(f) \wedge \mu_X(t)] \vee [1 - \mu_Q(f)] \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.95 & 0.95 & 0.95 & 0.95 & 0.95 & 0.95 & 0.95 \\ 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 \\ 0.9 & 0.9 & 0.3 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 1 & 0.9 & 0.3 & 0.05 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

接下来,需要进行模糊推理,具体如下:

$$x = \text{Rand}(1, 7) \quad (4)$$

$$\mu(f_i) = \begin{cases} (11 - U_i)/10 & 1 \leq x \leq 4 \\ (U_i + 3)/10 & 5 \leq x \leq 7 \end{cases} \quad (5)$$

$$R = \begin{cases} \mu_{R_1}(f, t) & 1 \leq x \leq 4 \\ \mu_{R_2}(f, t) & 5 \leq x \leq 7 \end{cases} \quad (6)$$

$$t = f \circ R \quad (7)$$

$$y = \max(\mu(t)) \rightarrow U_i \quad (8)$$

$$p = x : (10 - x - y) : y \quad (9)$$

其中, x 为输入值,它对应着论域 U 中的一个随机元

素; $\mu(f_i)$ 为隶属度函数值; R 为真域的条件取值;式(7)为求解 t 的模糊推理的合成运算;式(8)为模糊判决; y 是输出的精确值; \max 为取最大值算符;箭头表示映射; U_i 表示论域中的元素;式(9)为最终的三元音比例模糊推理的计算结果。

通过式(1)~式(9)可以求出集合 C 中每个元素的能量分值,并选取能量分值最大的前5个元素按从大到小的顺序排列后存入另一集合 $cs_n = \{cs_1, cs_2, cs_3, cs_4, cs_5\}$ 作为候选的伴奏和弦,如果不足5个则用0补齐。

伴奏和弦的选取还需考虑和声进行。由于蒙古族歌曲具有一定的规则模式,特征明显,例如调性强、节奏性弱、音域宽,曲调起伏大等,因此构建蒙古族特色的和声进行规则数据库是一种有效的处理方法,在以前的研究中已基本完成了此项工作,这里将在此基础上进行和弦的选取。首先将主旋律按照乐句分成 i 个旋律片段,根据每小节对应候选伴奏和弦集合,分别选取第一个元素 cs_1 ,构成一个和弦序列集合 $HC = \{HC_0, HC_1, \dots, HC_i\}$,然后将和弦序列 HC 中的元素 HC_i 与和声进行规则库中的规则 HP_i 进行逐个匹配,最终找出与 HC 相似度最大的和声进行规则。若 HC 与该规则匹配率大于某个阈值 C_{th} (本文在实验时取75%),则将元素 HC 存入伴奏和弦序列 FC ;若匹配率低于 C_{th} ,则依次将 HC 中不匹配的和弦元素替换为候选伴奏和弦 cs_n 中的下一个元素,直至总体匹配率大于 C_{th} 为止。

2.2 伴奏音型选取算法

通过对 HC 中每个元素的处理,最终可以得到伴奏和弦序列 FC ,接下来的问题便是根据蒙古族歌曲的特征对和弦进行聚合或分解处理,为每个音列选取对应的伴奏音型。

蒙古族音乐基本是以不带半音的五声音阶构成,遵循中国的五声音阶调式体系。蒙古族民歌主要分为长调、短调2种体裁。蒙古长调音调高亢、音域宽广、曲调优美流畅、旋律起伏较大、节奏自由而悠长^[11]。蒙古短调曲调短小、节奏工整、结构匀称。蒙古族民歌既存在风格上的统一性,又存在地区色彩的多样性。在蒙古族音乐形成和发展的漫长岁月里,大致形成了5个基本地域性风格,即科尔沁风格、呼伦贝尔风格、鄂尔多斯风格、阿拉善风格和锡林郭勒风格^[12-13]。鉴于蒙古族音乐的这些特点,在对和弦伴奏音型的选择方法上,采取基于知识库的方法,将不同体裁、不同地域风格的音乐,分类处理,构建关于伴奏音型的知识库。伴奏音型选取算法主要分为:(1)伴奏音型知识库构建,提取样本歌曲特征统一编码,根据样本歌曲的调式、风格等因素分类存储,供伴奏音型匹配算法选择;

(2)伴奏音型匹配算法设计,依据伴奏和弦以及音列相似性等特性,设计一种能够选取合适伴奏音型的匹配算法。

2.2.1 伴奏音型知识库构建

首先根据样本歌曲的节奏、调式将其分类,然后将样本歌曲根据其特点分解成若干音列,这里还是以小节为单位进行分割。利用伴奏和弦生成算法计算出相应的伴奏和弦,凝练样本歌曲旋律中的伴奏音型,编码后存入知识库。伴奏音型知识库主要存储音乐的调式、节奏、歌曲的音符音高和时值信息、歌曲中每个音列对应的伴奏和弦以及伴奏和弦对应的伴奏音型信息。

构建数据库需要解决音乐信息的数字化问题,本文设计一种音符编码方式使样本音乐的信息方便存储。

(1)音符的编码。将小字一组的7个音编码为 $Nc = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$,基于小字一组的音,高 i 个八度便编码为 $Nc + 10^i$,低一个八度则编码为 $-Nc$,低于2个八度以上便编码为 $-NC - 10^{i-1}$, $i \geq 2$,音符之间以英文符号“,”表示。如小字二组的C编码为11,小字组的D编码为-2。

(2)音符时值的编码。以四分音符为一拍,用数字1表示,其他音符根据与四分音符的时值比转换,如八分音符为0.5、附点八分音符为0.75。

(3)伴奏音型的编码。将伴奏和弦的根音、三音、五音分别用数字1,3,5来编码,遇到和弦外音或转位和弦时,用和弦外音或转位和弦音到和弦根音的音程来表示,柱式和弦和半分解和弦,用&连接多个音符。

2.2.2 伴奏音型匹配算法

由于旋律由音高和时值等两方面的要素构成,因此可以对输入歌曲各音列的音高序列和时值序列与知识库中拥有相同伴奏和弦的音列进行相似性度量,相似性最高的音列对应的伴奏音型即为输出。音高和时值对旋律走向起着同样重要作用,所以,这里设定音高序列和时值序列对匹配的贡献比例为1:1。由于旋律进行可以包含同音反复、级进、跳进等多种手法,因此可以通过计算相邻音符音程距离来估算相似度。设音列中音符串为 N_1, N_2, \dots, N_n ,知识库中待比较的音列为 R_1, R_2, \dots, R_n ,对音高序列匹配因子的计算如下:

$$P_n = \frac{\sum_{i=2}^n (N_i - N_{i-1})}{\sum_{j=2}^n (R_j - R_{j-1})} \quad (10)$$

对匹配因子 P_n 归一化,如下:

$$P'_n = \begin{cases} P_n & P_n \leq 1 \\ 1/P_n & P_n > 1 \end{cases} \quad (11)$$

通过式(10)和式(11),可得音列中音高序列与知识库中每条规则的匹配因子 $P'_n = \{P'_n[i]\}$ 。采用类似方法,得出时值序列的匹配因子 $P_d = \{P_d[i]\}$ 。通过式(12)可获取各音列的匹配因子 $P = \{P[i]\}$ 。将匹配因子最大音列对应的伴奏音型作为该音列的伴奏音型。

$$P[i] = P'_n[i] + P_d[i] \quad (12)$$

通过以上计算,可以得到一个伴奏音型序列 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 。通常在歌曲伴奏中,每个伴奏和弦对应几种伴奏音型,所以,这里对 A 中伴奏音型进行合并处理,最终使每个伴奏和弦对应确定的伴奏音型。处理方法为统计伴奏音型序列中每个伴奏和弦对应的各种伴奏音型的概率,选取概率最高的伴奏音型作为该伴奏和弦的伴奏音型。另外,一般伴奏声部比主旋律低 2 个八度,因此,将伴奏音型序列中各元素进行十六度模进,即可得到最终的伴奏声部。

3 实验结果与分析

为了验证上述算法的有效性,需要搭建一个自动伴奏系统并将前面 2 种算法应用其中,本文采用 VC++ 来实现。输入一段主旋律,输出该旋律伴奏声部的伴奏和弦序列和带伴奏声部的 MIDI 音乐。实验系统处理流程如图 1 所示。系统中构建的 2 个知识库中包含有歌曲风格、节奏、调式等信息。只用输入歌曲的曲谱信息,系统根据上面算法与数据库进行交互、生成和弦序列和带伴奏的旋律。

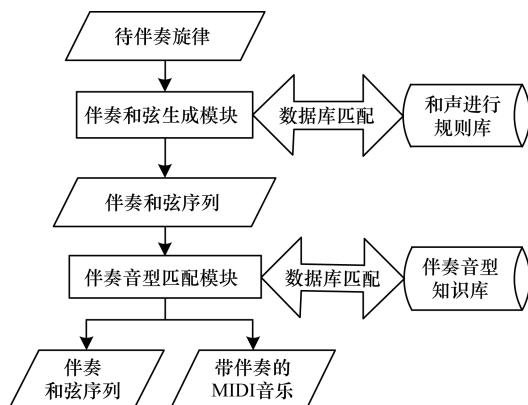


图 1 自动伴奏系统处理流程

下面将生成的伴奏结果以表格和五线谱图片的形式呈现出来,限于篇幅,考虑一般性问题,这里选取评估结果(在后面陈述)处在中等水平的歌曲《我的根在草原》和《草原上升起不落的太阳》为例,将其伴奏结果呈现出来,即输入主旋律曲谱,经过自动伴奏系统的处理,生成和弦序列如表 1 所示,和弦用首调的根音唱名进行标记,生成伴奏效果如图 2 和图 3 所示。

表 1 生成的和弦序列

歌曲	和弦序列
《我的根在草原》	La-La-La-Mi-Re-Mi-Re-La-La-La-Mi-
	Re-Sol-La-La-Re-Sol-La-Sol-La-Mi-
	Re-La
《草原上升起不落的太阳》	La-Re-Mi-La-Re-Mi-La-La-Mi-La-Mi-
	Mi-La-Re-La-La-Mi-Mi-Mi-Mi-La-Re-
	La-La



图 2 《我的根在草原》自动伴奏结果



图 3 《草原上升起不落的太阳》自动伴奏结果

自动作曲常用的评估方法有对比分析、受众群体的主观评价等^[14]。对比分析主要用于实验结果与作曲家作品内容、风格等方面的相似度或者比较 2 种算法的性能。受众群体主观评价主要用于以特定群体为目标的算法作曲设计,根据受众个人偏好、

知识架构等因素作为内在指标来评价算法性能。因为本文算法的设计目的是解决蒙古族歌曲旋律的伴奏问题,受众是音乐基础薄弱甚至无音乐基础的普通大众,所以采用受众群体评价的方法。挑选 30 名实验者 10 人为一组,分为专业组、有音乐基础组、无音乐基础组 3 个评估小组评价实验结果。专业组由音乐学院教授及研究生组成,有音乐基础组主要为音乐学院大一、大二本科生,无音乐基础组由不懂乐理的其他专业本科生组成。

对伴奏和弦序列进行评估,伴奏和弦的选取涉及专业知识,因此,本次评测只面向专业组。输入 20 首蒙古族音乐,将输出的伴奏和弦交予专业组人员,让其评测每首歌的伴奏和弦序列是否合适,只有合适与需修改 2 个选项。经过统计评测结果,选择合适的比例如表 2 所示,通过计算后得到平均合适率为 83.5%。由于艺术问题的多解性,平均合适率超过 75% 即可认为伴奏和弦计算的争议微小,因此 83.5% 的平均合适率结果令人满意。

表 2 专业组评测结果统计

歌曲	合适率	歌曲	合适率
乳香飘	0.8	远去的母亲	0.9
上马酒之歌	0.8	蓝色的蒙古高原	0.8
牧场飘香	0.9	洁白的蒙古包	0.9
阿妈的炉火	0.7	我的根在草原	0.8
苍狼白鹿	0.9	鄂尔多斯恋	0.7
梦中的额吉	0.9	阿尔斯楞的眼睛	0.9
放驼的母亲	0.8	雕花的马鞍	0.9
达古拉	0.9	吉祥鄂尔多斯	0.7
蒙古汉	0.8	草原敬酒歌	0.9
阿爸	0.9	圆蹄的枣骝马	0.8

接下来对生成伴奏 MIDI 音乐进行评估。让专业组、音乐基础组、无音乐基础组的评估人员试听实验结果,并被要求回答是否对实验结果认可,最后统计各小组的平均认可率。3 个小组的平均认可率分别用 P_1, P_2, P_3 来表示。由于本文系统主要是面向没有音乐基础或音乐基础薄弱的人群,因此将 3 个小组的分值权重分别设置为 15%, 30%, 55%。根据式(13)可计算出最终认可度 P 。评测结果如表 3 所示。经过式(13)的计算,认可度 P 的结果为 82.2%。通过这组数据可以看出,专家组对实验结果的满意度小于其他组,这是由他们的职业特点所决定的,其他组尤其是无基础组对实验结果的满意度很高,因此,可满足特定人群的伴奏需求,此结果也印证了艺术评判的特殊性和模糊性^[15]。

$$P = P_1 \times 15\% + P_2 \times 30\% + P_3 \times 55\% \quad (13)$$

表 3 带伴奏旋律的评测结果统计

歌曲	专业组	基础组	无基础组
乳香飘	0.7	0.7	0.9
上马酒之歌	0.6	0.7	0.9
牧场飘香	0.7	0.8	0.9
阿妈的炉火	0.5	0.6	0.8
苍狼白鹿	0.6	0.8	1.0
草原上升起不落的太阳	0.7	0.7	0.9
放驼的母亲	0.5	0.7	0.9
达古拉	0.5	0.7	0.8
蒙古汉	0.8	0.9	0.9
阿爸	0.7	0.8	1.0
远去的母亲	0.6	0.8	1.0
蓝色的蒙古高原	0.6	0.7	0.9
洁白的蒙古包	0.9	0.9	1.0
我的根在草原	0.6	0.8	0.9
鄂尔多斯恋	0.7	0.7	0.8
阿尔斯楞的眼睛	0.9	0.9	0.9
雕花的马鞍	0.6	0.7	1.0
吉祥鄂尔多斯	0.6	0.6	0.8
草原敬酒歌	0.7	0.8	1.0
圆蹄的枣骝马	0.6	0.6	0.9

4 结束语

本文设计一种面向蒙古族歌曲旋律的自动伴奏算法。包括以下内容:(1)伴奏和弦生成模块,由一个生成算法和一个和声进行规则库组成,通过该模块处理可以得到一首旋律的伴奏和弦序列;(2)伴奏音型匹配模块,在模块(1)输出的结果上,匹配合适的伴奏音型,该模块包括一个伴奏音型知识库和一个匹配算法,通过该模块输出最终的伴奏结果。在和弦音比例的处理模块中,本文引入了模糊推理的有关方法,使得处理更符合艺术的模糊性特征。实验结果证明了该算法的有效性。

然而,通过专业组人员偏低的认可度(对输出结果的认可度往往与评估群体的音乐知识背景有关)可以发现,该算法在关于音乐知识文法方面的设计还不太完善。因此,接下来的研究工作将结合专业组反馈的问题,在伴奏音型匹配算法和伴奏音型知识库中融入更多的音乐文法知识,完善系统,以取得更好的伴奏效果,满足专业人员的需求。

参考文献

- [1] 贾晓楠. 蒙古族音乐活态传承之衍变[D]. 天津:天津师范大学,2013.
- [2] Al-Ghawanmeh F, Al-Ghawanmeh M N. Toward an Improved Automatic Melodic Accompaniment to Arab Vocal Improvisation [C]//Proceedings of the 9th Conference on Interdisciplinary Musicology. Berlin, Germany: Springer, 2014:4-6.
- [3] Al-Ghawanmeh F M, Zaid R S. Automatic Accompaniment to Arab Vocal Improvisation: From Technical to Commercial Perspectives[J]. Journal of Software Engineering and Applications, 2015, 8(1): 16-25.
- [4] Conklin D, Rafael R, José M I. New Directions in Music and Machine Learning [J]. Journal of New Music Research, 2014, 43(3): 251-254.
- [5] Streeter E, Matthew E P D, Joshua D R, et al. Computer Aided Music Therapy Evaluation: Testing the Music Therapy Logbook Prototype 1 System [J]. The Arts in Psychotherapy, 2012, 39(1): 1-10.
- [6] Ventura D. Computational Creativity Research: Towards Creative Machines [M]. Paris, France: Atlantis Press, 2015.
- [7] Nakamura E, Nakamura T, Saito Y, et al. Outer-product Hidden Markov Model and Polyphonic MIDI Score Following [J]. Journal of New Music Research, 2014, 43(2): 183-201.
- [8] 冯寅,周昌乐. 算法作曲的研究进展[J]. 软件学报, 2006, 17(2): 209-215.
- [9] Simon I, Morris D, Sumit B. MySong: Automatic Accompaniment Generation for Vocal Melodies [C]//Proceedings of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, USA: ACM Press, 2008:725-734.
- [10] Morris D, Rebecca F. Using Machine Learning to Support Pedagogy in the Arts [J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2013, 17(8): 1631-1635.
- [11] 王光祈. 中国音乐史 [M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2005.
- [12] 乌兰杰. 蒙古族音乐史 [M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1999.
- [13] 呼格吉乐图. 蒙古族音乐史: 汉文 [M]. 沈阳: 辽宁民族出版社, 1997.
- [14] Cont A, José E, Jean-Louis G. The Cyber-physical System Approach for Automatic Music Accompaniment in Antescofo [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 135(4): 2377-2377.
- [15] 陈玉. 论音乐鉴赏的模糊性——兼谈高校公共音乐鉴赏课程的教学 [J]. 长沙铁道学院学报: 社会科学版, 2012, 13(2): 141-143.
- [12] 刘菲, 刘学亮. 基于稀疏编码的多模态信息交叉检索 [J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(9): 1170-1176.
- [13] Wang Wei, Ooi B C, Yang Xiaoyan, et al. Effective Multimodal Retrieval Based on Stacked Auto-encoders [J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2014, 7(8): 649-660.
- [14] Kiros R, Zemel R, Salakhutdinov R R. A Multiplicative Model for Learning Distributed Text-based Attribute Representations [C]//Tsauro G, Tourtzky D S, Ln T K, et al. Advances in Neural Information Processing Systems. [S. l.]: Morgan Kaufmann Publishers, 2014: 2348-2356.
- [15] Kiros R, Salakhutdinov R, Zemel R. Multimodal Neural Language Models [C]//Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning. [S. l.]: International Machine Learning Society, 2014: 595-603.
- [16] Pourian N, Manjunath B S. Retrieval of Images with Objects of Specific Size, Location, and Spatial Configuration [C]//Proceedings of 2015 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 960-967.
- [17] Shi Jianbo, Malik J. Normalized Cuts and Image Segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(8): 888-905.
- [18] Rasiwasia N, Jose C P, Coviello E, et al. A New Approach to Cross-modal Multimedia Retrieval [C]//Proceedings of 2010 International Conference on Multimedia. New York, USA: ACM Press, 2010: 251-260.
- [19] Zhen Yi, Yeung D Y. A Probabilistic Model for Multimodal Hash Function Learning [C]//Proceedings of the 18th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York, USA: ACM Press, 2012: 940-948.
- [20] Jia Yangqing, Salzman M, Darrell T. Learning Cross-modality Similarity for Multinomial Data [C]//Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Computer Vision. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 2407-2414.

编辑 刘冰

编辑 金胡考

(上接第303页)