

算法作曲的研究进展*

冯寅⁺, 周昌乐

(厦门大学 计算机科学系 人工智能研究所, 福建 厦门 361005)

Advances in Algorithmic Composition

FENG Yin⁺, ZHOU Chang-Le

(Institute of Artificial Intelligence, Department of Computer Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-592-2580156, E-mail: fengyin7842@hotmail.com, <http://www.xmu.edu.cn/>

Feng Y, Zhou CL. Advances in algorithmic composition. *Journal of Software*, 2006,17(2): 209-215.
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/209.htm>

Abstract: Some problems on Algorithmic Composition are discussed, and a survey for series of key techniques used in this approach is made, which include Markov chains, stochastic process, musical knowledge based system, musical grammar, artificial neural networks, and genetic algorithms. The conclusion is that the development of music composition system should involve a combination of the existing technologies, i.e. the Hybrid System development. In order to make the system become more practical and effective, there should be some flexible human intervenient ways for different level music composition in the system.

Key words: algorithmic composition; computer music; artificial intelligence; intelligence system; computer application

摘要: 讨论了当今算法作曲这一研究领域中存在的一些主要问题. 评述了这一领域所采用的一系列关键技术, 包括 Markov 链、随机过程、基于音乐规则的知识库系统、音乐文法、人工神经网络技术以及遗传算法. 得出的结论是, 作曲系统可以朝着集多种方法为一体的混合型系统(hybrid system)的方向发展. 系统应在音乐创作的各个层面上提供灵活的人机交互手段, 以便提高系统的实用性和有效性.

关键词: 算法作曲; 计算机音乐; 人工智能; 智能系统; 计算机应用

中图法分类号: TP18 文献标识码: A

算法作曲(algorithmic composition), 或称自动作曲(automated composition), 是试图使用某个形式化的过程, 以使人(或作曲家)在利用计算机进行音乐创作时的介入程度达到最小的研究^[1]. 无论是东方音乐还是西方音乐, 均有其一定程度的形式化基础. 有关旋律创作的形式化技术可以追溯到 11 世纪. 当时, 有一位名叫 Guido d'Arezzo 的人构造了一种可为一本宗教书籍中的每个元音设计不同音高的模型^[2]. 15 世纪的时候, 节奏模式就被系统地使用在具有均匀节奏的圣歌中^[2]. 在文艺复兴时期及巴洛克(Baroque)时代, 作曲家为旋律的对位发展

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60275023, 60373080 (国家自然科学基金); the Natural Science Foundation of Fujian Province of China under Grant No.A0210005 (福建省自然科学基金); the Science and Research Start-Up Project for the Recruit Talent of Xiamen University of China under Grant No.E43014 (厦门大学引进人才科研启动费)

Received 2005-07-03; Accepted 2005-08-15

了严格的规则.例如:复调音乐的创作几乎完全可以通过诸如对给定的主题动机(一个音乐小片段)实施倒影、主题延长、缩减这样系统化的过程来演绎.

音乐创作的形式化技术在 20 世纪再一次被使用.Arnold Schonberg 在 20 世纪初就引入了音列技术.而后由 Anton Webern 和他的后继者们对此作了进一步的系列化.在这一系列技术中,音乐被特征化地提取出诸如像音高、音长(时值)和音色这些参量并加以分别控制.从每个参量中,依次选择可能的值就可以组织成一个音列.参量值可以依据当前音列或该音列的倒置或逆行进行变化.20 世纪 50 年代初,Iannis Xenakis 就利用随机过程手工(不用计算机)生成音乐片段.那时,数字计算机已经存在.它们开始被作为音乐创作过程中的工具而使用.最先完全由计算机生成的音乐作品的是由 Lejaren Hiller 在 1956 年出版的弦乐四重奏 Illiac 组曲^[3].

探索算法作曲的问题一方面可以让我们了解和模拟作曲家在从事音乐创作这一特定过程中他(她)的思维方式;另一方面,基于算法作曲的研究技术而开发的作曲程序所创作出的不同形式的音乐作品同样可以娱乐于人.由著名的算法作曲家,音乐教授 David Cope 设计和开发的作曲程序能够继承已故作曲家的风格,并创作出同样风格的音乐作品^[4].这些作品中有类巴赫的创意曲、器乐协奏曲和组曲;有类莫扎特的奏鸣曲以及类肖邦的夜曲.大家可以从网上很容易地下载到这些由作曲程序创作出的或辅助作曲家创作出的音乐片段的 MP3^[5].当您欣赏了这些音乐片段之后,或许会觉得那些已故的音乐大师似乎又重返人间,继续为人类寻求欢乐和慰藉.

本文讨论了目前算法作曲的研究中存在的几个关键性问题,并通过评述这一领域所采用的主要技术,即马尔科夫(Markov)转换表(或称马尔科夫链)、随机过程、算法作曲研究中的知识库系统、音乐文法、人工神经网络技术和遗传算法来阐述当今算法作曲这一领域的研究和进展.

1 算法作曲研究中存在的问题

1.1 音乐的知识表达问题

音乐的知识表达问题涉及如何建立音乐的表层结构和音乐深层逻辑的对应关系.不同的作曲系统有不同的策略.由于不同的表达框架各有优缺点,所以不存在一个“完美的”统一表示法.例如,在以调性、传统和声为基础的主调音乐的多声部(为主旋律配置其他声部)创作系统中,多采用符号化的规则表达模式,以使系统变得更为有效.而对于试图模拟某位作曲家或某一时代特定风格的旋律生成系统,则可以通过收集该作曲家或代表这一时代风格的作品来训练一个人工神经网络.希望受训后的神经网络可以生成类似风格的旋律等等.问题的关键是这些知识表达机制是否实用、有效以及构造的代价是否高昂.

1.2 创造性和人机交互性问题

一个离开作曲家、完全自动的作曲算法是否有创造性?这里的创造性应是以听众的知识、直觉以及美学标准为其判断基础的(随机生成的噪音自然不应是有创意的音乐).把创造性的概念融合到作曲算法中是一个相当困难的问题.这涉及到我们需要模拟作曲家自身的音乐创作过程,还是要模拟创作的结果的问题.二者的关系就是要建立作曲家认知模型还是音乐知识工程的问题.Bruce L Jacob^[6]认为,创新来自两个方面:“天资”和“努力”.而前者可以产生更有“灵感”的音乐,要完全理解其中之奥妙看来是不太可能的.因此,试图在机器上再现这种能力的机会基本上几乎是微乎其微的.后者是编辑一个算法以图在重复音乐创作过程时能获取某些最优化的功效.这样,计算机程序的实现就容易得多.算法作曲系统的目标只能是再现作曲家以“努力”的方式创作音乐.音乐创作可以通过人机交互的过程来实现.例如,作曲家可以先给系统输入一个富有创意的种子动机(音乐小片段),而后,要求系统按照一定的创作风格及已建立好的音乐规则来演绎输入的种子动机,以便生成指定曲式结构的音乐织体.这些种子动机,可以从大量由机器随机生成出来的小音乐片段中人工挑选,也可以通过收集现有的不同音乐风格的音乐片段并且建立这些片段的数据库,而后再从中进行挑选.被挑选的音乐片段还可以通过后面将要介绍的交互式遗传算法一代一代地演化.关键在于人(或作曲家)应如何介入这一人机交互过程,以使音乐创作变得更为有效.同时,最终的作品又富有创意.这也是算法作曲的研究者所要面对的问题.

1.3 音乐创作风格问题

人们可以通过收集某一作曲家或代表某一时代风格的作品来训练一个人工神经网络,受训后的神经网络可以生成类似风格的旋律^[7].这是回避人们难以对音乐创作风格给予一个清晰的定义所采用的一种作曲系统的研究方法.问题是这种方法往往不实用,而且受到诸多因素的制约^[8].另一种模拟音乐创作风格的代表是 David Cope(2001)的工作^[4].他把音乐创作视为一个互相拼凑的超级过程,并在他的系统里提供较清晰的风格定义.Cope 把已故作曲大师一系列作品的例子编码成若干模式,并将其存放在一个数据库中.然后,使用若干计算函数来填充模式中缺省的内容,从而构造出已故作曲家作曲风格的新作品.这一做法使其获得巨大的成功(见 http://arts.ucsc.edu/faculty/cope/biography_page_2.htm).由于 Cope 是基于一种所谓的 SPEAC 音乐分析模型来统计和获取音乐作品中的风格特征的,而这一做法是否也同样适合其他作曲风格(例如,中国不同地区民族音乐的创作风格)的作品,却有待我们作进一步的研究.

1.4 系统生成的作品之质量评估问题

由作曲算法生成出来的音乐片段是否能真正娱乐听众并符合传统的音乐理论呢?显然,作曲系统中的质量评估机制是一个很重要的部分.它往往会引导创作的方向,甚至最终确定作品的成败.我们可以在一个作曲系统中建立形式规则库,以此对系统生成旋律作质量评估.例如,可以建立一系列旋律的约束集合.旋律的质量可以通过测试其是否能很好地匹配一个给定的约束集合来评估.这些约束集合涉及两类范畴,即,描述一个作曲家风格的规则和由音乐理论推演出的一般规则.旋律的质量无法作为整体被定量地测量.但是,我们可以基于它对由音乐理论所形成的一系列创作规则的满足度如何来评估旋律.我们给每个规则赋予一个权重,而旋律得到每个权重的百分数,将全部得分相加就是该旋律所要描述的质量.由于推演一个准确的形式规则并非易事,对生成的旋律作质量评估也可以通过人(或作曲家)的介入来完成.在一个有人(或作曲家)介入的计算机辅助作曲系统里,人(或作曲家)就被要求对作曲程序当前生成的一系列旋律小片段作直观的比较和评估.而后,再从中选择较好的,让作曲程序作进一步的演绎或互相拼凑.这一过程不断重复,直到整个作品完成为止.这样,最终的作品已经包括了人(或作曲家)的质量评估.交互式的计算机辅助作曲系统虽然需要人(或作曲家)的介入,但是,它的好处是我们不需要开发一个形式规则库来评估作品.如何把握人(或作曲家)的介入程度,不同的系统可以针对其自身所面对的具体问题采取不同的策略.这自然也是算法作曲的研究者所需考虑的问题.

2 当今各种算法作曲方法述评

2.1 使用Markov转换表的算法作曲方法

在算法作曲中,一个简单但有趣的技术是按照一个转换表来依次选择音符.这个转换表就像一个函数.其自变量是当前的音符,而函数值则是下一个要出现音符的可能性^[9,10].转换表可以按照一定的标准手工构造,并且嵌套一个特定的音乐风格.针对某一特定(如某一作曲家或某一时期)风格的音乐作品(样板集合)进行收集和统计,就可以构造出相应的转换表.而这个转换表定义了这些特定音乐风格的作品(样板集合)中音符导向的可能性.

很显然,在任意复杂的旋律中,音乐结构不能通过这样的 2 维统计来描述.为了获取更多的结构,上述的转换表可以从 2 维扩充到 n 维.在 n 维转换表(常称之为 $n-1$ 阶表)中,下一音符出现的可能性是由该音的前 $n-1$ 个音来确定的.自然,增多考虑前面音符的个数来确定下一音符出现的可能性,将使转换表变得更为上下文敏感.该表就会更忠实于样板集合上旋律的风格.然而,用这种方法来扩充转换表,首先将使转换表的大小呈指数级增长,这使其自身变得难以管理;其次是描述高阶结构的表会屏蔽低阶结构的描述.一般来说,系统可以交替地一方面使用高阶表,以便生成较忠实于样板集上风格的音乐;另一方面使用较低阶的表,生成较新风格的音乐.关键是如何恰当地对高阶结构进行描述^[11].

转换表的作曲方法有两个弊端:其一是不能用来预示音符个数大于 1 个的后继音符串;其二是这些音符的符号表达不便于描述像从一个音乐的上下文生成若干感性上类似的其他上下文这样的过程.例如,像八度的一

致性以及“小三度”这样的抽象音程概念就无法在转换表的方法中有所体现。

2.2 算法作曲的数学模型——随机过程

随机过程,特别是 Markov 链(即前一节所述的 Markov 转换表),一直被广泛地应用于算法作曲领域(例如文献[12])。之所以如此,一个重要的理由大概是其具有较低的计算复杂度。这适合于实时的应用系统。很多商业程序因此而使用随机过程。Cybernetic Composer 系统^[13]就是这类模型的一个范例。该系统可以创作出诸如爵士乐、摇摆乐及拉格泰姆(Regtime)乐这些不同风格的音乐片断。这一系统的一个有趣特点是:它先用 Markov 链推演出旋律的节奏(前一节的 Markov 转换表中关于旋律的音高推演,亦可平行地用在节奏的推演上),而在较后的阶段再推演音高。

我们也可以见到一些无序的非线性系统。例如,在文献[14]中所提及的 Chaos 旋律理论。然而,我们很难判断由这些模型所构造的系统,其所生成音乐的质量。因为在这些系统中有关音乐的“知识”不像所有其他的方法,是由人基于某一音乐理论或者从人的作品中“推演”而来的。随机过程的主要缺点是:

- 如果系统要创作并模拟某种音乐风格的作品,必须先分析很多这种风格的音乐片段,以发现某些必要特征的概率;
- 随机生成的片段和音乐之间有偏差,而将这样的片段整合成标准的音乐是困难的。这是因为获取较高层次及较抽象层次的音乐概念是较困难的。

2.3 算法作曲中基于规则的知识库系统

音乐知识库的使用,似乎是很自然的一种选择。特别是当我们试图在已定义完善的领域内建立模型或者是介绍一个清晰的结构或规则时尤其如此。其主要优点是:它们具有清晰的推理,并能够为行为的选择作出解释。EbcioIn^[15]专门建立了一种回溯说明语言(backtracking specification language,简称 BSL),并且用它来实现 CHORAL——一个基于规则的专家系统。它可以构造具有巴赫风格的四声部合唱曲。该系统包含大约 350 条规则,它们以一阶谓词的演算形式书写(即这里的回溯说明语言)。这些规则从合唱曲的多个角度来描述音乐知识,例如,和弦骨架以及多个单声部的旋律线等。

虽然知识库系统看来似乎是算法作曲系统最合适的选择,但其仍存在某些严重问题:

- 知识引导机制的建立既困难,又费时,特别在音乐领域尤其如此;
- 构造知识库系统的“音乐专家”需要有清晰的概念,甚至需要为有关音乐知识寻找灵活的表达,而这通常是很困难的事;
- 在音乐创作领域,收集所有的“例外规则”以及这些规则的先决条件,往往是非常复杂的。

2.4 算法作曲的音乐文法

正如语言有文法一样,音乐也是有音乐文法的。Steedman^[16]发明了一种生成文法,用以描述爵士乐 12 小节蓝调的和弦进程。后来他又使用范畴文法,对其原有工作作进一步的精炼。他的系统允许对传统上被视为右分叉的结构作左分叉分析,从而提高了系统从左到右的解释能力。这使得系统能够模拟出更接近听者的直觉,且所产生的和弦演绎进程更容易让人接受。

音乐家 David Cope 从事的音乐智能实验(experiments in musical intelligence,简称 EMI),是一个注重音乐风格的理解以及复制各作曲家创作风格的研究课题^[4]。EMI 系统需要至少两个作品作为其输入。它可以发现两个或多个作品中共有的模式。模式的检测是通过一个“几乎”匹配的过程(与正规的模式匹配技术不同)。这些模式被称为“信号”,并依据它们出现的次数被赋予权重。系统通过使用一个扩充转移网络文法 ATN 来安排所获取的“信号”,以便生成在风格上和输入作品类似的音乐。

结合统计的方法,使用音乐文法可以匹配(或捕获)现有作品中的各种音乐事件(如音程、节奏等)的概率分布,并能基于这些特征生成出类似风格的作品。但是,音乐文法并非总能被有效地使用。例如,大多即兴的音乐作品通常没有文法那样的层次结构。

2.5 神经网络在算法作曲中的应用

神经网络在过去几年已广泛地使用在音乐应用系统中^[7,17,18],并且已取得相当大的成功.特别是在感知和认知方面,神经网络能够从一个样板集合中学习,以避免需要对规则的形式化.

Mozer 使用递归神经网络技术构造了 CONCERT^[19],并用反向传播学习算法来训练 CONCERT.CONCERT 能够以一音接一音的方式来创作旋律(note-by-note composition).欲进一步了解递归神经网络的旋律创作过程,可参见文献^[19].

递归神经网络能够成功地获取一个旋律经过句的表层结构,并以这样获取的知识为基础,产生出新的旋律.但是,所生成的旋律缺乏音乐的全局连贯性,即它无法获取较高级的音乐特征.例如,那些和乐段或调性功能相关的信息^[8].这与递归神经网络中学习梯度的逐渐消失有关^[20].一种被称为长的短时记忆 LSTM 递归神经网络可以解决这一问题^[21].Douglas Eck^[22]已成功地开发了一个使用 LSTM 递归神经网络来学习蓝调音乐(blues music)并能够生成类似风格的新音乐的系统.神经网络为算法作曲在方法上提供了一种选择.它能够松散地模拟人脑中的活动,但似乎并不有效.因为在一个人工神经网络能创作旋律之前,首先需要收集大量的作品来训练它.因此,神经网络技术更适合用于分析音乐作品而不是创作^[3].另一方面,与知识库的方法相比,神经网络通常只能解决简单得多的游戏性质的音乐创作问题^[8].

2.6 使用遗传算法的算法作曲系统

遗传算法(genetic algorithms)是一个使用适应函数(fitness function)来演化候选者(染色体)的全局优化算法.在使用遗传算法进行音乐创作的工作中,主要是构造适应函数,以此来评估及选择系统生成的旋律问题.遗传算法中状态空间的解被描述为染色体的种群.搜索由再生操作和一个选择过程所控制.而音乐领域知识可存放在:

- 染色体中:音乐信息(即音高、音程、时值、音长)被描述在染色体中.
- 选择过程中:适应函数(涉及相关的音乐信息)判断每个染色体的适应度,并决定染色体的再生机会.
- 再生操作中:搜索控制知识嵌入于再生操作中.使用这些再生操作可以保证所有状态空间的点,均可搜索得到.

作曲系统可以通过建立适应函数的计算模型来演化旋律(染色体)或连接旋律的和声结构.进一步的细节可参见文献^[23].在使用遗传算法进行自动作曲的研究中,适应函数其实是很难准确定义的.于是,出现了让人代替适应函数来直接评估染色体的一种方法,即交互式的遗传算法 IGA(interactive genetic algorithm).这方面比较有代表性的系统和研究包括:Biles^[24,25]构造的一个被称为“GenJam”的交互式即兴演奏系统.它是一个和人一起演奏爵士乐的作曲家 Agent.另外,Unemi^[26]用模拟繁殖的方法开发了一个音乐作曲工具 SBEAT.音乐初学者可以使用 SBEAT,通过人机交互的方式创作自己喜爱的音乐.Unhera M 和 Onisawa T^[27]研发的音乐作曲系统,允许无音乐技能的人介入其作曲系统来创作音乐,而且所生成的旋律长度可达 16 小节.所有和交互式的遗传算法 IGA 相关的方法主要有两个弊端,即主观性(人的评估决定了最后的结果)和无效性(用户必须听到所有可能潜在的解,才能作出具有普遍性的评估).这两个弊端被称为适应函数的瓶颈问题.为克服这一难点,Biles 将他的 GenJam 系统扩展为 Autonomous GenJam^[25,28].Autonomous GenJam 没有评估阶段,故不使用适应函数,取而代之的是判断新繁殖的爵士乐段是否具备当前爵士乐数据库中的爵士乐段所具备的两个标准特征^[29].这使得 Autonomous GenJam 的最终结果偏向于现存爵士乐数据库中的爵士乐段的风格.

2.7 各种方法在各典型作曲系统中的使用情况

本节讨论前述的各种方法在一些代表性的算法作曲系统中的使用情况、相关结果以及存在的问题.

1. Cybernetic Composer 系统^[13]

由 Ames 和 Domino 研制的 Cybernetic Composer 是成功地使用 Markov 链和随机过程的典型系统.该系统能创作出诸如爵士乐、摇摆乐及拉格泰姆(Regtime)乐这些不同风格的音乐片断.其主要技术特点是,先用 Markov 链推演出节奏,而在较后阶段,再推演音高.其存在的问题是,必须先分析很多这些风格的音乐片段来发

现某些必要特征的概率.

2. CHORAL 系统^[15]

EbcioIn 的 CHORAL 系统是一个基于规则的专家系统.该系统可以为单声部主旋律构造具有巴赫风格的四声部合唱曲,且有一定的实用价值.它包含大约 350 条规则,并以一阶谓词的演算形式(一种回溯说明语言 BSL)书写.这些规则从合唱曲的多个角度来描述音乐知识.例如,和弦骨架以及多个单声部的旋律线等.其存在的问题是,知识引导机制及相关规则的建立既困难又费时,且难以进一步扩充.

3. EMI 系统^[4]

由算法作曲家 David Cope 开发的 EMI 系统能够继承已故作曲家作品的风格,并创作出同样风格的音乐作品.这些作品有类巴赫的创意曲、器乐协奏曲和组曲,还有类莫扎特的奏鸣曲以及类肖邦的夜曲.与现有的其他系统相比较,EMI 生成的音乐作品质量较高,且有相当的实用性.它所采用的方法涉及音乐文法和建立风格数据库.EMI 基于一种所谓的 SPEAC 音乐分析模型^[4]来构造新的音乐片段,所以其缺陷是忽略了此模型之外的其他音乐进程和动机的可能性^[30].

4. 旋律创作系统 ERNN^[29]

Chen CCI 开发的旋律创作系统 ERNN 是一个递归神经网络.它可以模拟并生成类似于 Bela Bartok 风格的作品,并以一小节接一小节的方式来创作短小的旋律.Chen CCI 使用遗传算法来演化 ERNN.具体来说是基于音乐基本理论和 Bela Bartok 的作品风格,构造一系列 4 音组细胞结构约束集、5 声音阶约束集、音高及节奏变化约束集,并以此作为适应函数来演化 ERNN.该系统可视为基于客观适应函数进行演化的旋律创作系统的代表.这类创作系统的结果通常都比较简单,很难谈得上具有实用价值.需要结合基于规则的方法,引入更多的音乐知识规则,才能使系统变得实用和有效.

5. 交互式即兴演奏系统 GenJam^[24,25]

Biles 采用交互式遗传算法 IGA 的方法,开发了一个称为 GenJam 的交互式即兴演奏系统.GenJam 能在一个给定的和弦序列上生成爵士乐器独奏旋律.该系统通过人来监控和判断系统即兴演奏结果的好坏,并将判断的结果实时回馈给系统,以供系统作进一步的演化.GenJam 最终能够生成比较满意的结果,但是,因为人的评估决定了最后的结果,所以,与基于规则的方法相比,它具有主观片面性且并不有效.

3 结 论

本文评述了当今算法作曲领域的各种研究方法及其存在的问题.基于此研究,我们认为:

- 由于各种作曲算法各有其自身的优点和存在的问题.当今的作曲系统可以朝着集多种方法为一体的混合型系统(hybrid system)的方向发展.
- 系统应具有较高的灵活性,可以在音乐创作的各个层面上提供不同程度的人机交互手段,以便提高作品的质量以及系统的实用性和有效性.
- 计算机作曲系统的研发在中国几乎是空白,而在国外这方面的研究非常活跃.我们有必要将国际上现有的算法作曲技术引用到中国民族音乐的分析和创作中,并建立有自己民族特色的计算机作曲系统.

References:

- [1] Alpen A. Techniques for algorithmic composition of music. 1995. <http://alum.hampshire.edu/~adaF92/algocomp/algocomp95.html>
- [2] Grout DJ. History of Western Music. 5th ed., New York: W. W. Norton & Company, 1996.
- [3] Järveläinen H. Algorithmic musical composition. 2000. <http://www.tml.tkk.fi/Studies/Tik-111.080/2000/papers/hanna/alco.pdf>
- [4] Cope D. Virtual Music: Computer Synthesis of Musical Style. Cambridge: MIT Press, 2001.
- [5] Cope D. MP3 Files of David Cope and Experiments in Musical Intelligence. 2005. <http://arts.ucsc.edu/faculty/cope/mp3page.html>
- [6] Jacob BJ. Algorithmic composition as a model of creativity. Organised Sound, 1996,1(3):157-165.
- [7] Leman M. Artificial neural networks in music research. In: Marsden A, Pople A, eds. Computer Representations and Models in Music. London: Academic Press, 1992. 265-301.

- [8] Toiviainen P. Symbolic AI versus connectionism in music research. In: Miranda E, ed. Readings in Music and Artificial Intelligence. Amsterdam: Harwood Academic Publishers, 2000. 47–67.
- [9] Basset BA, Neto JJ. A stochastic musical composer based on adaptive algorithms. 1999. http://gsd.ime.usp.br/sbcm/1999/papers/Bruno_Basseto.pdf
- [10] Bartetzki A. CMask, a stochastic event generator for Csound. 1997. <http://gnom.kgw.tu-berlin.de/~abart/CMaskMan/CMask-Manual.htm>
- [11] Lewis JP. Creation by refinement and problem of algorithmic music composition. In: Todd PM, Loy DG, eds. Music and Connectionism. Cambridge: MIT Press/Bradford Books, 1991. 212–228.
- [12] Capanna A. Iannis xenakis—Architect of light and sound. Nexus Network Journal, 2001,3(2). <http://www.nexusjournal.com/Capanna-en.html>
- [13] Ames C, Domino M. Cybernetic composer: an overview. In: Balaban M, Ebcioğlu K, Laske O, eds. Understanding Music with AI. Cambridge: AAAI Press, 1992. 186–205.
- [14] Walker E. Chaos melody theory. 2001. <http://www.ziaspace.com/elaine/chaos/ChaosMelodyTheory.pdf>
- [15] Ebcioğlu K. An expert system for harmonizing chorales in the style of J. S. Bach. In: Balaban M, Ebcioğlu K, Laske O, eds. Understanding Music with AI. Cambridge: AAAI Press, 1992. 294–334.
- [16] Steedman M. The blues and abstract truth: Music and mental models. In: Garnham A, Oakhill J, eds. Mental Models in Cognitive Science. Erlbaum, 1996. 305–327.
- [17] Todd PM, Loy G. Music and Connectionism. Cambridge: MIT Press, 1991.
- [18] Griffith N, Todd PM. Musical Networks. Cambridge: MIT Press, 1997.
- [19] Mozer MC. Neural network composition by prediction: Exploring the benefits of psychophysical constraints and multiscale processing. Cognitive Science, 1994,6:247–280.
- [20] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory. 1996. <http://citeseer.ist.psu.edu/hochreiter96long.html>
- [21] Gers FA, Schmidhuber J. LSTM recurrent networks learn simple context free and context sensitive languages. IEEE Trans. on Neural Networks, 2001,12(6):1333–1340.
- [22] Eck D. Finding temporal structure in music: Blues improvisation with LSTM recurrent networks. In: Boulard H, ed. Neural Networks for Signal Processing XII, Proc. of the 2002 IEEE Workshop. New York: IEEE, 2002. 747–756.
- [23] Wiggins G, Papadopoulos G, Phon-Amnuaisuk S, Tuson A. Evolutionary methods for musical composition. 1998. <http://citeseer.ist.psu.edu/wiggins98evolutionary.html>
- [24] Biles JA. Genjam: A genetic algorithm for generating jazz solos. In: Proc. of the Int'l Computer Music Conf. San Francisco: ICMA, 1994. 131–137.
- [25] Biles JA. GenJam in transition: From genetic jammer to generative jammer. 2002. <http://www.generativeart.com/papersGA2002/8.pdf>
- [26] Unemi T. A tool for multi-part music composition by simulated breeding. In: Gedau A, ed. Artificial Life VIII. Cambridge: MIT Press, 2002. 410–413.
- [27] Unehara M, Onisawa T. Construction of music composition system with interactive genetic algorithm. 2003. http://www.idemployee.id.tue.nl/g.w.m.rauterberg/conferences/CD_doNotOpen/ADC/final_paper/549.pdf
- [28] Biles JA. Autonomous genJam: Eliminating the fitness bottleneck by eliminating fitness. 2002. http://www.cs.usyd.edu.au/~josiah/gecco_workshop_biles.pdf
- [29] Chen CCJ, Mikkulainen R. Creating melodies with evolving recurrent neural networks. 2001. <http://www.cs.utexas.edu/users/nn/downloads/papers/chen.ijcnn01.pdf>
- [30] Johnson R, Cope D. Computer and musical style. 1991. <http://csml.som.ohio-state.edu/Music839C/Notes/Cope.html>



冯寅(1963 -),男,福建福州人,博士,副教授,主要研究领域为算法作曲,计算机音乐,自然语言处理。



周昌乐(1959 -),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为计算语言学,神经动力学,计算机艺术(包括诗歌谱曲)。