

基于 Hilbert 映射的元胞自动机音乐生成算法

王存睿^{1,2}, 段晓东², 刘向东¹, 李志洁¹

(1 大连民族学院 非线性信息技术研究所, 辽宁 大连 116600; 2 东北大学 系统科学研究所, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 详细介绍了元胞自动机中各种元胞一维、二维音符映射规则, 而且详细讲解了其实现技术, 而且通过对音乐序列元胞规则的特征进行分析, 构建了基于 Hilbert 曲线映射元胞音符映射方案, 实验也表明该音符映射方案能够反映出二维元胞的图案周期变化。

关键词: 元胞自动机; 音乐生成; Hilbert 映射

中图分类号: TP18

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)01-0005-04

The Cellular Automata Music Algorithm Based-on Hilbert Mapping

WANG Cun-rui^{1,2}, DUAN Xiao-dong², LIU Xiang-dong¹, LI Zhi-jie¹

(1 Research Institute of Nonlinear Information Technology, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China;

2 Research Institute of System Science, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: This paper analyses the emergence of cellular automata, shows the feature of the rule which fits to create perfect Music Series and proposed a new mapping from two-dimensional cellular automata to music Series. Meanwhile, also shows the way to design CA music generator by Java MIDI class libraries and critical technologies.

Key words: cellular automata; music generator; Hilbert mapping

1 引言

创作音乐并不是人类独有的技能, 自然的序列也可以产生优美的音乐. 音乐序列是存在波动的复杂系列, 复杂是介于规律和混沌之间的一种状态. 很多学者利用混沌理论和分形技术来生成音乐, 都取得了一定效果. 元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 由数学家 Stanislaw M. Ulam 与 John von Neumann 于 20 世纪 50 年代提出的一种离散型动力系统. 元胞自动机的魅力在于可以利用简单、单一的规则产生复杂的行为, 其产生的优美演化图案与音乐曲谱具有一定的相似性, 很多科学家将元胞自动机产生的复杂图案通过变换将其表达为音乐, 这不仅丰富了元胞自动机的应用领域, 也为音乐自动生成技术提供一种新的方案^[1].

2 元胞自动机

CA 是一种时间、空间和状态都离散的动力系统^[1], 在空间上由一些特定规则的格子所组成, 每个格子看作一个元胞; 每一个元胞可以具有一些有限的、离散的状态, 某一时刻处于一种状态. 在每个离散的时间步, 格子上的每一个元胞根据其周围的元胞情况, 按照统一的局部规则改变状态.

规则是元胞自动机的核心, 决定了元胞自动机的演化形态. 规则是利用当前时刻邻居元胞的状态来确定下一时刻核心状态的动力学函数, 它可以记为 $f: s_i^{t+1} = f(s_i^t, s_N^t)$, s_N^t 为 t 时刻的邻居状态组合, s_i^t 为 t 时刻核心元胞的状态^[2].

一种规则和一种初始状态对应一种元胞自动机的状态, 不同规则和初始状态的元胞能够演化出不同的图案. 如一维元胞自动机, 其演化的状态可分为

收稿日期: 2009-01-12; 修回日期: 2009-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60573124); 辽宁省自然科学基金项目 (20072197); 高校科研项目计划项目 (20060146)

四种动力学行为,如图 1 所示,主要包括平稳型、周期型、混沌型和复杂型.平稳型为自任何初始状态开始,经过一定时间运行后,元胞空间趋于一个空间平稳的构形,不随时间变化而变化.周期型是经一定时间运行,元胞空间趋于一系列简单的固定结构(Stable Patterns)或周期结构(Periodical Patterns).混沌型为自任何初始状态开始,经一定时间,元胞自动机表现出混沌的非周期行为,所生成的结构的统计特征不再变化,通常表现为分形的分维特征.复杂型表现为出现复杂的局部结构,或者说是局部的混沌,其中有些会不断地传播.

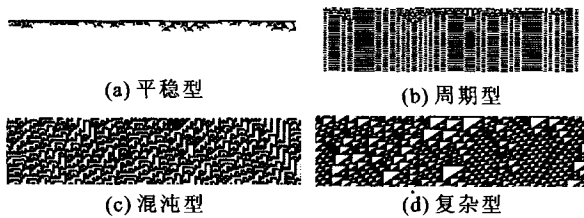


图 1 一维元胞自动机的四种动力学行为

不同规则下元胞自动机动力学行为之间的关系和各自所占的比例.可以看出,混沌型、周期型和平稳型的规则占绝大部分比例,复杂型规则所占比例较小.复杂型是介于周期和混沌之间的一种形态,能演化出复杂变幻图案^[3-4].

3 元胞音符映射方案

并不是每种类型的元胞自动机都能衍生出优美的音乐.周期型和平稳型演化出的音乐旋律比较单一,音符周期性地来回波动,不符合音乐的特点.而混沌型演化出的音乐与白噪音相似,虽然有上下波动,但是波动不平滑,也没有平缓的音调.只有复杂型的演化规则包含周期和变幻的旋律,既有平滑的上下波动,又有平缓的音调,符合音乐的特点^[5].所以构造元胞音乐生成器,首先要找到复杂型的元胞演化规则.

音乐生成器的核心就是从元胞状态向音符的转换,其中元胞的演化规则和元胞到音符的映射就成了关键.将元胞的演化状态转化为直线性结构,使每一步迭代状态按照某种方法对应一个音符,配以一定的节拍、韵律和调式形成乐谱,就能够发出悦耳的声音^[6].不同维度的元胞自动机具有不同的变化模式,通常元胞音乐生成器采用一维或二维元胞自动机生成音乐.

3.1 一维元胞音符映射方法

一维元胞自动机的音符映射规则主要包含以下

5 种.其中前 4 种映射中的每个元胞的状态只有 0、1 两种状态,第 5 种是通过偏移量来构建的.

(1) 简单音乐的生成算法

每一列元胞代表一个固定的音符,将一维自动机的演化状态中的每个元胞对应一组八度音节.这种映射函数没有加任何的音乐节奏和控制,所以形成的音乐比较单调、枯燥.

(2) 随机音乐规则

这种映射就是每一列元胞对应的音符是随机选取的^[1-3],音符的转化和播放与第一种类似.

(3) 二进制法则

在元胞自动机的演化世界中任意截取七个元胞大小的区域,把该区域中每一步迭代的七个元胞的状态作为一个二进制码,然后转化成十进制数,然后将其对应为不同音阶的音符进行播放.

(4) 直接法

在元胞自动机世界的每一步迭代结果中截取十二个元胞大小的区域,截取的每个元胞对应一个音阶中的一个音,其中包括半音和全音.然后根据元胞的状态,来进行音符的转化.如果元胞的状态为 1,就播放对应音符的声音,元胞状态为 0 时,就不发声.如果有连续的 1 状态,这几个音就同时发声,形成合音.这种方法相对上面几种方法在声音的乐感有了很大的提高,并有合音出现^[4].

(5) 复杂型的音乐生成规则

如图 2 所示,每一列元胞对应一种具体的音符,八度音从左向右依次增加,每一行代表一个音节,每个元胞状态是当前行代表音节第一个音符的偏移量,然后把这些音符在当前行分配的时间片内全部播放出来^[1].

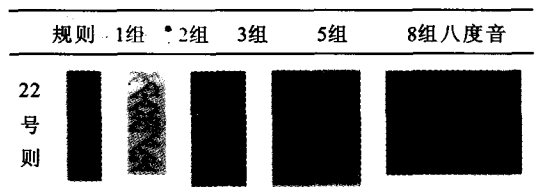


图 2 复杂型元胞音乐生成规则

3.2 二维元胞音符映射方法

一维元胞自动机当邻域半径为 1 时共有 256 种规则,二维元胞自动机包含更丰富的规则,因此更为复杂^[1].如图 3 所示^[4]的 CAMUCS 方法,其采用笛卡尔空间表示音乐 3 元组 {A, N, D}.二维元胞自动机包含两个维度,对于其中某个被激活的元胞,其水平坐标表示 A 与 N 之间的距离,垂直坐标表示 N 与 D 之间的距离,此距离可用半音或 1/4 音表示.

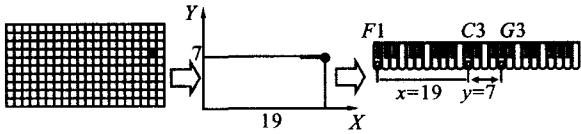


图 3 二维元胞自动机的音乐生成规则

音节 3 元组 {A, N, D} 的演奏顺序根据该激活元胞的 8 个邻居决定. A、N、D 的演奏顺序包含 10 种顺序, a 代表起始音符, n 代表中间音符, d 代表最后的音符, 括号表示两个音符同时发音. 定义二维元胞自动机的邻居状态集合为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_8\}$, 定义序列 $w_1 = s_1, s_2, s_3, s_4, w_2 = s_4, s_3, s_2, s_1, w_3 = s_5, s_6, s_7, s_8$ 和 $w_4 = s_8, s_7, s_6, s_5$. 其中 {A, N, D} 由 8 位的 Tgg + Dur 序列决定, $Tgg = w_1 \vee w_2$ 表示音节触发的起始时间, $Dur = w_3 \vee w_4$ 表示持续的时间. Tgg 与 Dur 按表 1 所示的对应关系.

表 1 序列映射关系

状态	0000	0001	0010	0011	0101	0110	0111	1001	1011	1111
对应	$a[dn][dna]$	and	dna	and	dan	nad	$d[na]$	nda	$n[da]$	

例如某一元胞, 其坐标为 (5, 5), 对应的邻居状态为 $S = [0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0]$, $w_1 = 0100$ 可以计算 $Tgg = 0110$, 由 $w_3 = 1000$ 可计算 $Dur = 1001$, 所以演奏次序为 $dan \rightarrow d[na]$.

二维元胞自动机的音符映射, 应考虑二维元胞的具有周期或无周期的演化图案, 其演化具有周期性和复杂性, 更适合形成音乐的旋律. 如图 4 所示, 二维元胞自动机在生命游戏规则下的具有周期和复杂性为的演化图案.

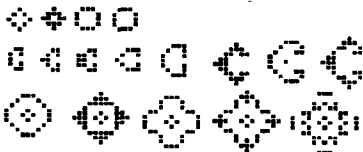


图 4 生命游戏中的复杂周期图案

文中提出一种新的二维元胞映射方案. 先将元胞空间划分 16 个正方形区域, 每个区域对应不同的演奏顺序. 然后, 如图 5 所示, 利用 Hilbert 曲线填充二维元胞空间, 再通过 Hilbert 曲线将二维元胞映射为一维序列, 再将该序列按 7 位进行分割, 演化元胞自动机, 根据两次演化每段序列之间的汉明距离对应十进制, 进而对应相应的 128 位音符, 并按正方形区域进行演奏.

优美的旋律需要序列包含周期和变幻的旋律, 既有平滑的上下波动, 又有平缓的音调. 二维元胞如图 5 所示, 其周期的变换图案非常适合音乐旋律的

生成, 但需要转换能够反映局部的图案变化. Hilbert 曲线具有步长平均距离短, 其能更好的反映各种元胞图案的局部变化和波动性. 而且生成的旋律比较连贯, 符合音乐的特点, 实验结果也表明该映射方案在相应规则的条件下能够生成优美旋律的音乐.

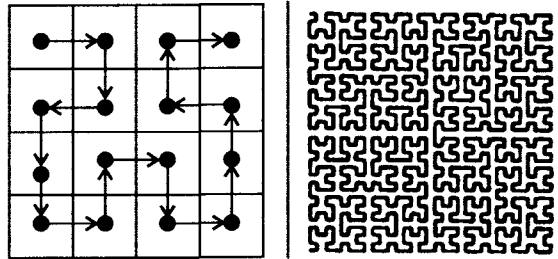


图 5 Hilbert 曲线映射

4 基于 Java MIDI 的音乐生成器实现

文中实现的元胞音乐生成器主要采用在 Java API 中的 Javax. media. sound. midi 类库. 程序包实现了 MIDI 事件的传送、MIDI 数据的合成以及序列化、控制声音设备的播放等功能, Javax. media. sound. midi 程序包中的接口和类实现的主要功能如图 6 所示.

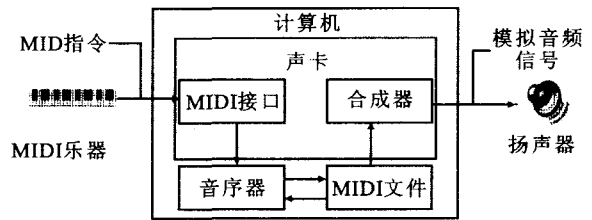


图 6 Javax. media. sound. midi 的示意图

音乐生成器的设计大体分为四部分: 输入初始化、元胞自动机演变、元胞状态到音符的映射、输出音乐. 因为初始 5316 的不同会导致演化状态的不同, 针对某一规则, 需要通过大量随机初始化找出能够生成复杂图案的初始化状态.

元胞状态到音符的映射部分虽很关键, 但如果只有音符, 而没有节奏, 音乐的乐感会较差. 因此输出音乐部分可以利用 MIDI 类库的加入节奏等进行调节. 例如, 可以通过 setMono 等函数设置单复音调、声音的力度和速度等参数, 也可以通过 MIDI 中的音序合成器 Synthesizer 接口进行各种音效合成, 再利用 Sequence. PPQ 设置音乐中的节拍. 也可以将几个元胞自动机演化出的音乐用 Track 类分隔成单独组、并行组, 从而实现合音的功能, 并生成声音文件进行持久化存储.

5 结束语

元胞自动机是一种很适合算法作曲的方法,通过寻找能够演化出复杂现象的规则和初始化方案,再通过相应的映射机制,配以节奏和音色,就可以生成美妙的音乐.目前的问题在于复杂且适合构建音乐的规则需要大量的实验进行寻找,其次评价生成音乐是否悦耳的量化指标体系还不完善,有待于更深入的研究.

参考文献:

- [1] Bilotta E, Pantano P, Talarico V. Synthetic harmonies: an approach to musical semiosis by means of cellular automata[J]. Artificial Life VII, 2000, 35(2): 153-159.
- [2] 雷霆, 余镇危. 网络流量行为分析的一维元胞自动机模型[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(10): 99-102.
- [3] Bilotta E, Pantano P, Talarico V. Music, mathematics and artificial life [C]// 11th ECMI Symposium. Italy

Palermo, 2000.

- [4] Eduardo Reck Miranda. Introduction to cellular automata music research[J]. DIGITAL music online tutorials on computer music, 2003(8): 1-5.
- [5] Dave Burraston, Ernest Edmonds. Cellular automata in generative electronic music and sonic art [C]// Historical and Technical Review, Faculty of Information Technology. Sydney, Australia, 2005, 16(3): 165-185.
- [6] Wolfram S. Cellular automation [EB/OL]. [2009-01-19] (2005-09-12). http://mathworld.wolfram.com/new/2005-09-12/wolfram_tones/.

作者简介:

王存睿 男, (1980-), 讲师. 研究方向为系统仿真.

段晓东 男, (1963-), 博士, 教授. 研究方向为复杂网络与非线性信息处理技术.

刘向东 男, (1967-), 博士, 教授. 研究方向为非线性信息处理和算法复杂性.

李志洁 女, (1980-), 博士, 讲师. 研究方向为算法设计.

(上接第4页)

- [4] 邓高明, 张鹏, 陈开颜, 等. Cache 在旁路攻击中的理论应用及其仿真实现[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(5): 82-85.
- [5] Suresh Chari, Josyula R Rao, Pankaj Rohatgi. Template attacks [C]// Cryptographic Hardware and Embedded Systems (CHES 2002). Berlin: Springer-Verlag, 2002: 13-28.
- [6] Agrawal D, Rao J R, Rohatgi P, et al. Templates as master keys [C]// Cryptographic Hardware and Embedded Systems (CHES 2005). Edinburgh: Springer, 2005: 15-29.
- [7] Francois-Xavier Standaert, Cedric Archambeau. Using subspace-based template attacks to compare and combine

power and electromagnetic information leakages [C]// Cryptographic Hardware and Embedded Systems (CHES 2008). Berlin: Springer, 2008: 411-425.

- [8] International Electrotechnical Commission. IEC 61967: integrated circuits - measurement of electromagnetic emanations, 150 kHz to 1 GHz [S]. New York: IEC, 2003.
- [9] Raymond A Serway, John W Jewett. Physics for scientists and engineers [M]. 6th ed. Saunders: Saunders college publishing, 2003.

作者简介:

邓高明 男, (1983-), 博士研究生. 研究方向为电磁信息检测与主动防护技术.