

Game of Life Cellular Automata

Game of Life Music

Realizado por: Sergio Rodríguez Calvo

Fecha: 15 de febrero de 2016

Asignatura: Métodos Computacionales de la Vida Artificial

Máster: Computación, Lógica e Inteligencia Artificial (Universidad
de Sevilla)

Índice

Índice	1
Introducción	2
Autómata celular	3
Juego de la vida	5
Introducción a conceptos musicales	6
Sonido	6
Propiedades del sonido	7
Del sonido musical a la música	7
Melodía	7
Armonía	7
Métrica	7
Ritmo	7
Pentagrama, notas y compases	8
Renderización de formas musicales	9
CAMUS	9
CAMUS 3D	9
Radial	10
CAMUS	11
CAMUS 3D	15
Representación radial	16
Conclusión	18
Bibliografía	19

Introducción

Un autómata celular es como se conoce a un modelo matemático abstracto empleado para modelar sistemas dinámicos, obtenido o basado en cómo algunas especies han obtenido en su evolución mecanismos para generar formas y patrones en su aspecto.

Existen muchos tipos de autómatas, con diferentes dimensiones, reglas de evolución, vecindario y estados de sus celdas. Uno que se ha vuelto muy famoso es el juego de la vida de Conway, que consiste en un autómata celular de dos dimensiones, con vecindario de Moore, cuyas celdas toman dos estados: vivo o muerto. Sus reglas de evolución son las siguientes:

- **Nacimiento:** Una célula que está muerta en el tiempo t se vuelve viva en el instante $t + 1$ si exactamente tres de sus vecinos están vivos en el instante t .
- **Muerte por hacinamiento:** Una célula que está viva en el tiempo t morirá en el tiempo $t + 1$ si cuatro o más de sus vecinos están vivos en el tiempo t .
- **Muerte por exposición:** Una célula que está viva en el momento t morirá en el tiempo $t + 1$ si tiene uno o ningún vecino vivo en el tiempo t .
- **Supervivencia:** Una célula que está viva en el tiempo t permanecerá viva en el tiempo $t + 1$ sólo si tiene dos o tres vecinos vivos en el tiempo t .

Este autómata es, además, equivalente a una máquina universal de Turing. Además, es capaz de generar muy diversos tipos de patrones de acuerdo con un determinado estado inicial.

Esos patrones despertaron el interés de varios investigadores que consiguieron adaptar el juego de la vida de Conway para hacer música. El resultado es que generaba piezas musicales de especial interés.

Existen varias de implementaciones de autómatas celulares para hacer música, pero en este documento se presentan tres de ellas: CAMUS, CAMUS 3D y de simetría radial.

Autómata celular

En la naturaleza algunas especies en su evolución han obtenido la capacidad de mimetizarse con su entorno, lo que les permite defenderse de sus depredadores. De todas las formas de mimetización hay una que llama la atención debido a que forma determinados patrones.

Ciertas especies de conchas marinas, como se muestra en la Figura 1, presentan un aspecto en la parte exterior de su concha que parece seguir patrones, lo que al estudiarse resulta en un modelo matemático abstracto.



Figura 1. Concha marina que presenta un patrón especial en su concha.

Su funcionamiento consiste en que una célula para decidir qué pigmentación tomar lo hace en función de las células de su entorno.

Por tanto, un autómata celular se puede definir como un modelo matemático para un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos. Es apropiado para ser implementado en un ordenador y tiene numerosas aplicaciones en muchos campos (Física, Biología, etc.) ya que permite simular sistemas complejos.

En un autómata celular se distinguen las siguientes partes:

- **Red de nodos:** representa la estructura espacial, y puede ser finita o infinita.
- **Autómata:** cada celda de la red contiene uno, y debe ser finito. Aquellos nodos que cuenten con un autómata son llamados células o celdas.
- **Entorno:** espacio considerado alrededor de una celda para ser tomada en cuenta para su evolución. También llamado vecindario. Normalmente, es igual para todas las celdas, aunque puede haber excepciones.
- **Función:** determina la evolución del sistema, cambiando las celdas en base a su vecindario. Se aplica de forma simultánea a todas las celdas. Se le conoce como regla de evolución local.

La aplicación sistemática de reglas locales simples produce patrones complejos y de muchos tipos. De hecho, esta capacidad para generar patrones son utilizados en muchas aplicaciones, tales como, generación de números aleatorios, generación de estructuras fractales, etc.

Existe una clasificación realizada por Stephen Wolfram en cuatro clases atendiendo a su evolución visual:

- **Clase 1:** desde casi todas las configuraciones iniciales se llega rápidamente a una configuración homogénea.
- **Clase 2:** la evolución del sistema lleva a configuraciones periódicas espacio y/o temporales en poco tiempo.
- **Clase 3:** la evolución lleva a patrones caóticos. Predominan las estructuras fractales.
- **Clase 4:** la evolución genera estructuras complejas que interactúan entre ellas.

Juego de la vida

El juego de la vida es un autómata celular diseñado por John Horton Conway en 1970. Como curiosidad, este autómata ha despertado gran interés porque, desde el punto de vista teórico, es equivalente a una máquina universal de Turing, o lo que es lo mismo, todo lo que se pueda computar algorítmicamente se puede computar en el juego de la vida.

Este autómata celular consta de una red de nodos de dos dimensiones y cuyos autómatas toman dos estados: vivo o muerto. En cuanto al vecindario, existen dos variantes: de Von Newmann o de Moore, siendo este último el más utilizado, como se muestra en la Figura 2.

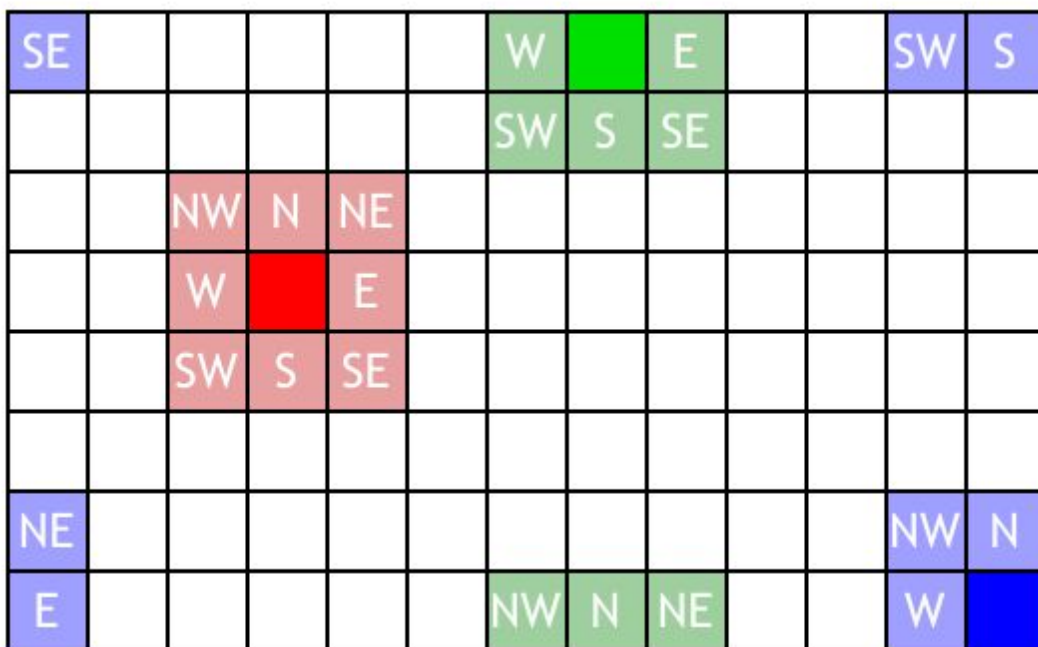


Figura 2. Autómata celular de dos dimensiones con vecindario de Moore.

Respecto de la regla de evolución local se tiene en cuenta lo siguiente:

- **Nacimiento:** Una célula que está muerta en el tiempo t se vuelve viva en el instante $t + 1$ si exactamente tres de sus vecinos están vivos en el instante t .
- **Muerte por hacinamiento:** Una célula que está viva en el tiempo t morirá en el tiempo $t + 1$ si cuatro o más de sus vecinos están vivos en el tiempo t .
- **Muerte por exposición:** Una célula que está viva en el momento t morirá en el tiempo $t + 1$ si tiene uno o ningún vecino vivo en el tiempo t .
- **Supervivencia:** Una célula que está viva en el tiempo t permanecerá viva en el tiempo $t + 1$ sólo si tiene dos o tres vecinos vivos en el tiempo t .

Las reglas anteriores se aplican de manera simultánea en todas las celdas del autómata.

Introducción a conceptos musicales

Antes de entrar en los capítulos específicos sobre cómo hacer música con el juego de la vida, se necesita una breve introducción a conceptos y propiedades musicales, los cuales se introducen capítulo a capítulo, desde los más básicos (qué es el sonido) hasta los más complejos (qué es la melodía).

Sonido

El sonido se puede definir como la propagación de ondas mecánicas a través de un medio. Para ello, se necesita un cuerpo que vibre, lo cual produce un movimiento en un fluido, normalmente aire, que se propaga y llega a un sitio que se muestra sensible a dichas ondas.

Por tanto, se distinguen un cuerpo sonoro, un medio de transmisión y un receptor. Estas ondas producen dos tipos de fenómenos: sonido musical o ruido. El sonido musical se diferencia del ruido por ser ondas suaves, es decir, ondas que normalmente suelen ser de forma sinusoidal. En el ruido, por el contrario, no hay armonía o suavidad en la onda, como se muestra en la Figura 3.

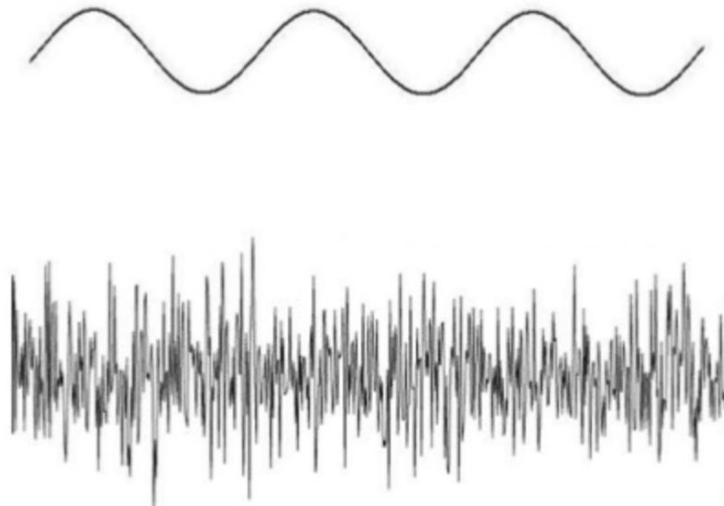


Figura 3. Sonido musical (arriba) frente a ruido (abajo)

Propiedades del sonido

Existen cuatro propiedades propias del sonido musical, que son:

- **Altura:** cuando se habla de altura, en realidad, se habla de frecuencia. La frecuencia es una medida de la cantidad de ciclos por unidad de tiempo que se dan en la onda. Esto nos permite distinguir entre un sonido grave, medio o agudo.
- **Intensidad:** cuando se habla de intensidad se hace referencia a la energía de la onda, y es definida por la amplitud de la onda. De esta forma, se distingue entre sonido fuerte o débil, y su unidad es el decibelio.
- **Timbre:** cuando se habla de timbre, en realidad, se hace referencia al sonido característico del instrumento que genera el sonido musical. Es decir, la parte de la onda que permite distinguir entre qué instrumento se está tocando. Esto se debe a que cada instrumento, por su material o forma, emite vibraciones de forma distinta.
- **Duración:** hace referencia al tiempo que dura un sonido, es decir, la amplitud del intervalo de tiempo.

Del sonido musical a la música

Hablar de música no es hablar de sonido musical. La música es aprovechar los sonidos musicales y darles orden lógico, junto con los silencios, mediante el uso de principios fundamentales, tales como, melodía, armonía y ritmo. Además, la música se combina en su mayoría con la voz humana, concretamente, para formar canciones.

Melodía

La melodía se define como la sucesión de sonido (y silencios) que es percibida como una sola entidad. De hecho, a aquellos instrumentos que no pueden tocar más de una nota a la vez, como por ejemplo la flauta, se les conoce como instrumentos melódicos.

Armonía

La armonía es el uso de alturas o acordes (tono, nota) de manera simultánea. Dicho de otro modo, la armonía es el conjunto de sonidos que suenan al mismo tiempo.

Métrica

La métrica trata de la aparición periódica, normalmente en intervalos regulares, de sonidos musicales.

Ritmo

El ritmo es el resultado final de los elementos anteriores, es decir, melodía, armonía y métrica, a veces creando variaciones notorias para crear determinados contrastes.

Pentagrama, notas y compases

Los últimos conceptos de la música, de cara a entender mejor lo que se presenta en los siguientes apartados, que tratan sobre cómo hacer música a partir de determinadas implementaciones de autómatas celulares, son el pentagrama, las notas y los compases.

Apoyado en todo lo anterior, surge la necesidad de cómo representar la música, y así poder transmitir y/o reproducir la música entre distintos instrumentos, orquestas, etc.

El pentagrama es el lugar donde se escriben las notas u otros signos musicales. Consta de filas que tienen cada una cinco líneas horizontales y equidistantes.

Por su lado, las notas son sonidos determinados por una vibración cuya frecuencia fundamental es constante. Se habla de nota musical cuando se hace referencia a determinadas frecuencias que están etiquetadas para ser identificadas y que son de uso común en occidente, tales son: DO-RE-MI-FA-SOL-LA-SI.

Dichas notas se representan sobre el pentagrama, aprovechando tanto las líneas como los espacios entre las líneas.

Sobre el pentagrama se dibujan a veces rayas verticales, lo que se conoce como compás. El compás es la forma de ordenar la música, consiste en dividir el pentagrama en lotes cuya cantidad de tiempo es igual.

Renderización de formas musicales

La primera necesidad para poder utilizar el juego de la vida de Conway es poder hacer música a partir del mismo. Se necesita un método adecuado para pasar patrones generados por el autómata celular a formas musicales, en lugar de formas visuales o además de ellas.

Aquí se presentan tres formas, o enfoques de mapeo, para el juego de la vida. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los tres enfoques que se describen en los capítulos posteriores:

Nombre	Dimensión del Autómata	Sistema de coordinación	Notas por celda
CAMUS	2	Cartesiano 2D	3
CAMUS 3D	3	Cartesiano 3D	4
Simetría radial	2	Radial 2D	1

Tabla 1. Resumen comparativo entre sistemas musicales con juego de la vida de Conway

CAMUS

Su nombre viene de Cartesian Representation of Note Sets (en español conjuntos de notas de representación cartesiana), y consiste en hacer evolucionar el juego de la vida de manera normal (con vecindario de Moore) y, a partir de cada célula viva en cada iteración obtener un conjunto ordenado de tres notas musicales.

Su representación musical se obtiene mediante las coordenadas cartesianas de cada célula viva, a partir de la cual, dada una nota de referencia, se obtiene el intervalo entre las mismas.

CAMUS 3D

Es una variante, o ampliación, del CAMUS que toma un juego de la vida tridimensional cartesiano. En realidad, se puede resumir como un conjunto de juegos de la vida bidimensionales apilados.

En este caso, cada célula de cada plano que representa un juego de la vida tiene cuatro notas, en lugar de tres. Esto se debe a que además de las tres notas de referencias del CAMUS, ahora se obtiene un cuarto parámetro que indica la posición del plano sobre la pila total de juegos de la vida.

Radial

Es una modificación del CAMUS en la cual el sistema de representación es radial, en lugar de cartesiano. Se trata, por tanto, de una matriz bidimensional de nuevo. En este caso, el número de notas por células de la matriz es uno, frente a los tres del CAMUS o los cuatro del CAMUS 3D.

CAMUS

Como se ha introducido previamente, CAMUS son las siglas de Cartesian Autómata Music, y trata de usar el juego de la vida que, junto a un sistema cartesiano, se obtiene un conjunto ordenado de tres notas.

En primer lugar, se necesita un mecanismo que permita decidir qué tres notas musicales se reproducen en cada momento por cada célula viva del juego de la vida.

Para ello, se toma una nota de referencia, y se mide la distancia en intervalos de la segunda nota respecto de la nota de referencia, y también, la distancia en intervalos entre la tercera respecto de la segunda. En la Figura 4, se muestra sobre un piano.

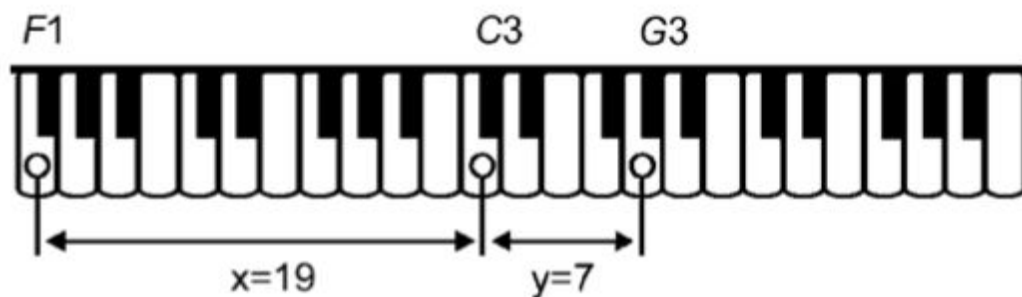


Figura 4. Ejemplo de notas de referencia en función de F1.

Desde el punto de vista del autómata se utiliza sus coordenadas cartesianas para obtener los intervalos anteriormente citados, cuyo ejemplo se muestra en la Figura 5. Es decir, su coordenada x representa el intervalo de la nota respecto la nota de referencia, y su coordenada y representa el intervalo de la tercera nota respecto de la segunda nota.

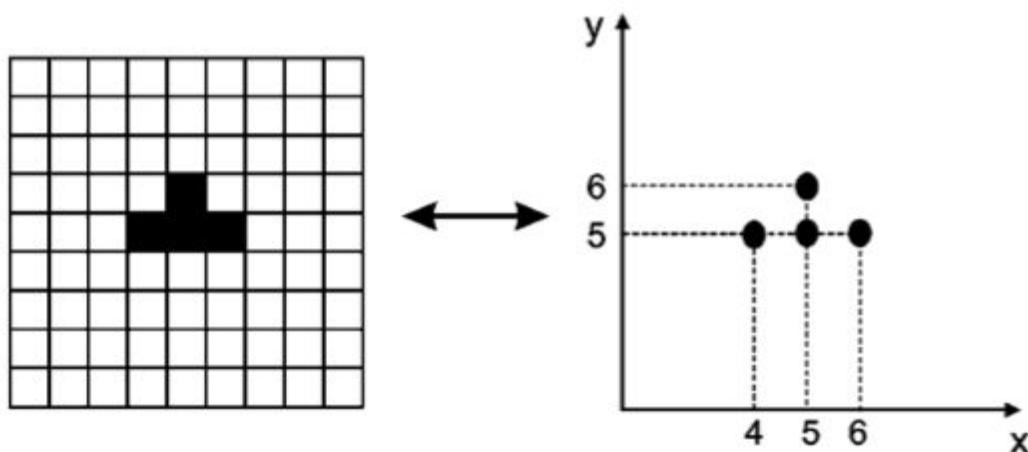


Figura 5. Ejemplo de obtención de coordenadas a partir del autómata en CAMUS.

De cara a la reproducción de la música, se recorre el autómata por columnas, y desde la celda primera a la última, reproduciendo en cada caso las notas correspondientes según sus coordenadas cartesianas.

Pero aún no se ha terminado de resolver el problema. Se necesita, además de qué notas tocar, cuándo se tocan y, cuándo ocurre y cuánto dura.

Para ello, al igual que en el juego de la vida para evolucionar, se emplea el vecindario. A cada componente del vecindario, como se muestra en la Tabla 2, se le asigna una letra, la cual valdrá 0 o 1 dependiendo de si la célula está viva o no.

p	b	n
d	-	c
m	a	o

Tabla 2. Vecindario utilizado en CAMUS y asignación de letras.

De este modo se obtienen dos palabras de 4 bits. La palabra de disparo, y la palabra de duración, como se muestra en la Figura 6. Para ello se hace lo siguiente:

- La palabra de inicio se obtiene haciendo una operación OR inclusiva con las cadena 'abcd' y 'dcba'.
- La palabra de duración se obtiene haciendo una operación OR inclusiva con las cadenas 'mnop' y 'ponm'.

$$\begin{aligned} Tgg &= abcd \mid dcba \\ Dur &= mnop \mid ponm \end{aligned}$$

Figura 6. Palabras necesarias para componer la morfología temporal.

Con ambas palabras se hace una equivalencia de la forma en que se muestra en la Figura 7. Las notas de referencia son B, M y U, y se corresponden con F1 (nota de referencia), C3 (segunda nota) y G3 (tercera nota) respectivamente según la Figura 4.

0000 = $B[UM]$
 0001 = $[UMB]$
 0010 = BUM
 0011 = UMB
 0101 = BMU
 0110 = UBM
 0111 = MBU
 1001 = $U[MB]$
 1011 = MUB
 1111 = $M[UB]$

Figura 7. Equivalencia entre las palabras Tgg y Dur, respecto de la morfología temporal.

De esta forma, se obtiene una solución al problema de qué nota se toca antes, después o a la vez. En la Figura 8 se muestra la misma equivalencia de la Figura 7 pero de una manera más gráfica.

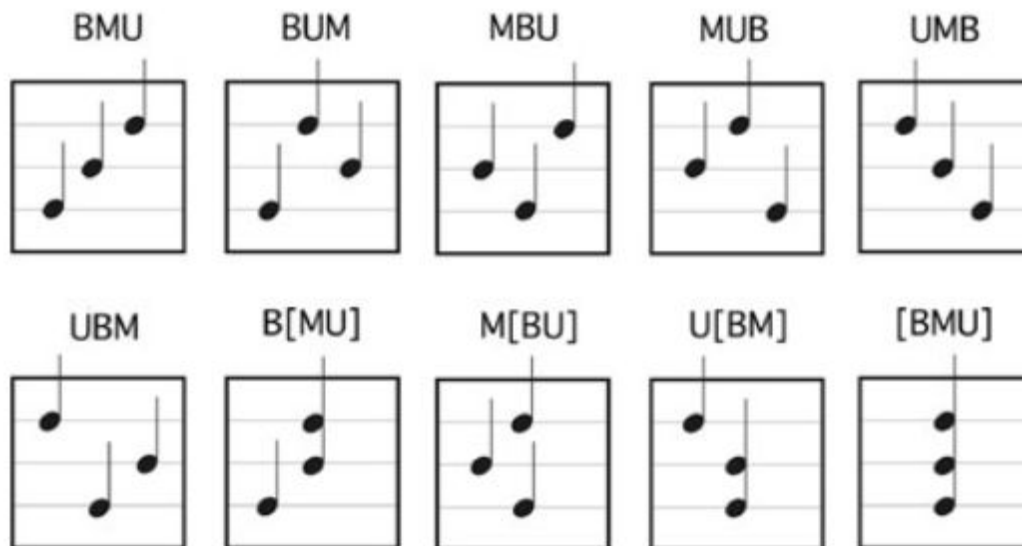


Figura 8. Morfología temporal por cada conjunto de tres notas.

Una vez realizado este paso, ya sólo se necesita obtener la morfología temporal tal y como se muestra en la Figura 9, para lo cual se emplea un generador de números pseudoaleatorios.

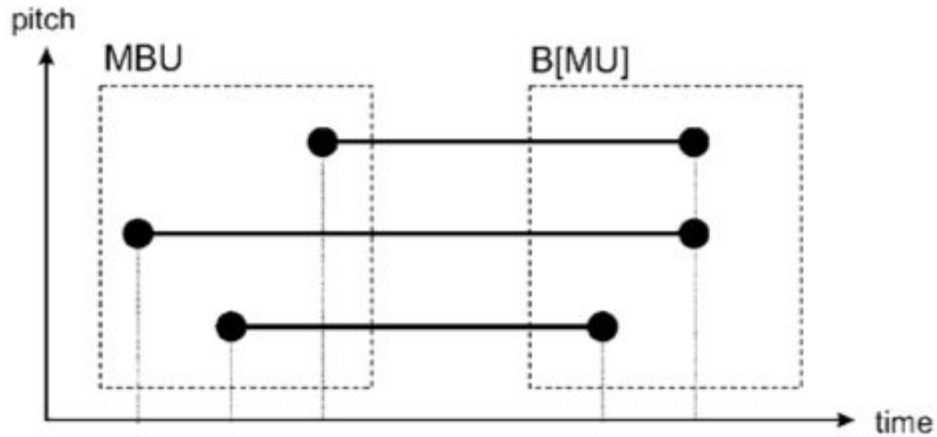


Figura 9. Morfología temporal final empleando Tgg y Dur en cada celda del autómata.

Por último, se muestra el diagrama (Figura 10) de actividad con los pasos a seguir por el algoritmo que implemente el CAMUS.

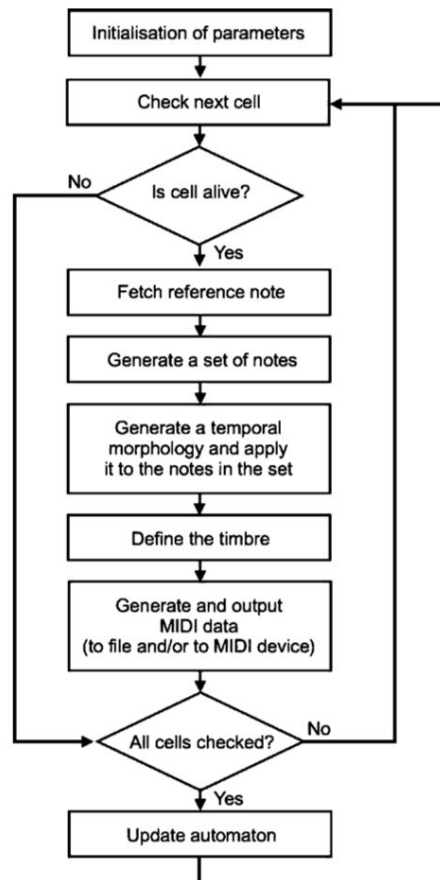


Figura 10. Algoritmo completo del CAMUS.

CAMUS 3D

CAMUS 3D es una variante del CAMUS, de modo que, se tiene una pila sobre el plano $x=0$ de autómatas celulares independientes. Es decir, se tiene una pila de n CAMUS, que evolucionan todos de la misma manera sin tener dependencia entre ellos.

En este caso, el número de notas musicales por celda es de 4, frente a las 3 del CAMUS. Esto se debe principalmente a que el algoritmo a la hora de evaluar las celdas para obtener las notas musicales, necesita centrar su foco en un autómata de la pila con valor $x=a$, siendo a un valor que indica cual autómata se está reproduciendo en cada momento de entre todos los que componen la pila.

El resultado es que se cuenta con una cuarta nota en función del valor del plano en el que se está actuando.

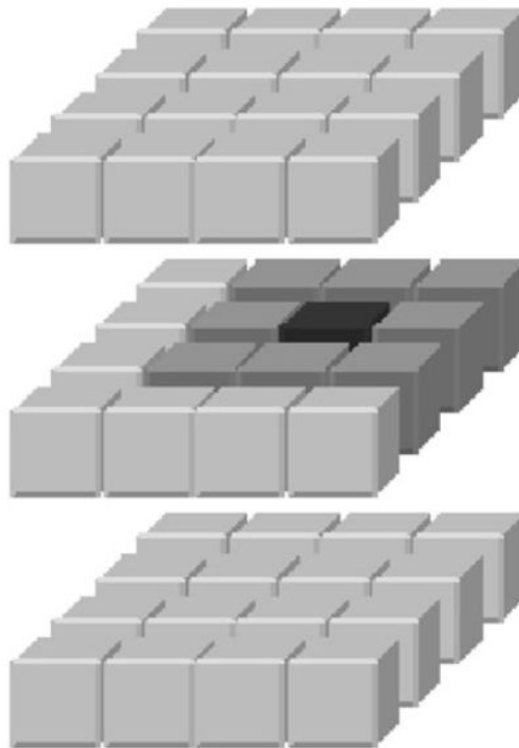


Figura 11. CAMUS apilados sobre plano x para formar CAMUS 3D.

Representación radial

En el juego de la vida de Conway se cree que el motivo por el que genera patrones simétricos e inspiradores desde el punto de vista de la música es porque girar la matriz 90, 180 o 270 grados no tiene ningún efecto en su evolución.

En este método se pretende capturar la simetría radial inherente del juego de la vida de Conway. Para ello emplea las coordenadas polares, frente a las coordenadas cartesianas.

Como se observa en la Figura 12, se sitúa el origen en el centro de la matriz del juego de la vida de Conway. Cada célula viva es mapeada en el dominio musical según su coordenada (r, θ) , donde r es la distancia del origen y θ el ángulo que forma.

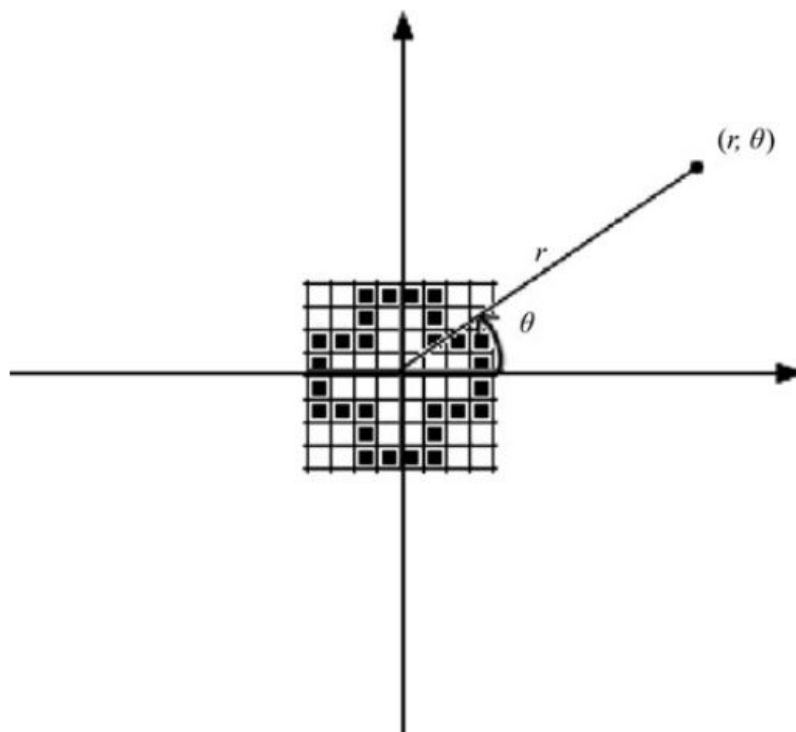


Figura 12. Ejemplo de representación radial.

El problema ahora es cómo hacer música a partir de esto. Para ello se sigue el siguiente algoritmo:

1. Elija un valor de BPM (golpes por minuto). Inicializar una variable `baseBeat` a 0, elegir una duración de nota fija `D`.
2. Ejecutar una generación de la GoL.
3. Itere θ alrededor de la matriz de 0 a 2π en 127 pasos. Para cada uno de los 127 valores de θ , iterar `r` desde el centro de la matriz hasta su borde, una célula a la vez.
4. Para cada uno de los valores iterados de `r`, examine la celda en (r, θ) . Si está "vivo" genera una nota MIDI con paso proporcional a `r`, y de duración `D`. Busque la nota MIDI en el compás: $\text{baseBeat} + D + (16 * (\theta / (2\pi)))$.
5. Después de completar las iteraciones anidadas de (r, θ) sobre toda la matriz, actualice `baseBeat` al compás de la última nota MIDI generada.
6. Vuelva a 2 y repita.

Conclusión

El autor del libro, para concluir, comenta la idoneidad de usar un autómata como el juego de la vida de Conway para hacer música debido a que genera patrones simétricos y regulares, así como, es sencillo controlarlo mediante reglas.

Comenta que existen más formas de mapeado, además, de las vistas en este libro. Respecto al sistema de mapeado de simetría radial existe un error de cuantización que se ve acentuado por el uso de un sintetizador MIDI.

A veces, las piezas generadas por estos autómatas requiere de intervención manual para realizar ajustes debido a que en muchas ocasiones generan piezas musicales que no se pueden tocar con instrumentos. Estos sistemas no producen música teniendo en cuenta este factor.

Bibliografía

- Wikipedia
- Memoria PFC de Juan Carlos Soriano Ramírez titulado “Del Autómata Celular a la Composición Musical”.
- Presentación sobre Autómatas Celulares de la asignatura Métodos Computacionales de la Vida Artificial, impartida por Agustín Riscos Núñez, para el máster de Lógica, Computación e Inteligencia Artificial de la Universidad de Sevilla.
- Libro “Game of Life Cellular Automata” de Andrew Adamatzky (2010), con ISBN: 978-1-84996-216-2978-1-84996-216-2