

Autómatas Celulares: Historia y Aplicaciones

Monetti Julio^a, Tissera Cristian^b, Bianchini Germán^c, Caymes-Scutari Paola^{c,d}, Ontiveros Patricia^e, Poch Miguel^e, Rotella Carina^e, Tagarelli Sandra^f

^aLaboratorio de Integración de Tecnologías Aplicadas a Prototipos de Software, Departamento de Ingeniería en Sistemas de Información. Universidad Tecnológica Nacional, FRM. Rodriguez 273, (M5502AJE) Mendoza.

^bLaboratorio de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Computacional (LIDIC). Universidad Nacional de San Luis. Ejército de Los Andes 950, San Luis.

^cLaboratorio de Investigación en Cómputo Paralelo/Distribuido, Departamento de Ingeniería en Sistemas de Información. Universidad Tecnológica Nacional, FRM. Rodriguez 273, (M5502AJE) Mendoza

^dConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

^eLaboratorio de Gobierno Electrónico, Departamento de Ingeniería en Sistemas de Información. Universidad Tecnológica Nacional, FRM. Rodriguez 273, (M5502AJE) Mendoza

^fLaboratorio de Analítica de Datos, Departamento de Ingeniería en Sistemas de Información. Universidad Tecnológica Nacional, FRM. Rodriguez 273, (M5502AJE) Mendoza

jmonetti@frm.utn.edu.ar

RESUMEN

Mediante el uso de Autómatas Celulares (AC) se pueden analizar comportamientos complejos de un sistema, surgidos a través de la aplicación de procesos computacionales básicos. Los AC resultan ideales como herramientas de simulación, puesto que permiten realizar simulaciones basadas en el avance del tiempo a través de pasos discretos, representando físicamente el estado del sistema a través de una grilla regular de celdas. Han sido aplicados exitosamente en la simulación de una amplia cantidad de fenómenos como el crecimiento poblacional, tráfico vehicular, modelos electorales, entre otros. El concepto de AC se utiliza ampliamente en microsimulación de sistemas como una técnica centrada a nivel de individuo, y adecuada para observar comportamientos emergentes complejos. Se debe destacar que a pesar de que las reglas de un AC sean sencillas, generalmente el comportamiento global emanado es complejo, y muchas veces irregular. En el trabajo se presenta una breve historia de la

evolución de los AC. Por otro lado, se presenta un resumido ejemplo de instanciación de un framework destinado a la simulación con AC.

Palabras Clave: autómata celular – microsimulación – sistemas complejos.

CONTEXTO

La presente línea de trabajo se encuentra inserta y financiada mediante el Proyecto PID TETEUME0008760TC que se desarrolla en el LICPaD (Laboratorio de Investigación en Cómputo Paralelo /Distribuido), en el cual se cuenta con la participación tanto de docentes del propio laboratorio, como de docentes de los grupos ADA-Lab (Laboratorio de Analítica de Datos) y GE-Lab (Laboratorio de Gobierno Electrónico), LITAPS (Laboratorio de Integración de Tecnologías Aplicadas a Prototipos de Software) todos grupos pertenecientes al Departamento de Ingeniería en Sistemas de Información de

la UTN-FRM, y LIDIC (Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Inteligencia) perteneciente a la Universidad Nacional de San Luis, donde fue desarrollado el modelo original utilizado en el presente trabajo.

1. INTRODUCCIÓN

La primera referencia que se tiene sobre AC es de Stanislaw Ulam, quien a finales de la década de 1940 recomendó a John von Neumann su uso. Luego, se considera a este último como el precursor en el uso de AC [2]. El autómata originalmente descrito por Von Neumann se compone de una grilla bidimensional infinita compuesta de celdas uniformes, donde cada celda está conectada a sus cuatro vecinos ortogonales.

Los AC son modelos matemáticos computacionales discretos aplicados a sistemas discretos y dinámicos, adecuados para describir la evolución de sistemas naturales o artificiales a través del tiempo.

La discretización espacial se realiza a través de la configuración de un conjunto de celdas contiguas, proveyendo para cada celda un vecindario, que de acuerdo a la naturaleza del AC modelado puede considerar una celda como vecina de acuerdo a diferentes criterios. Se destaca la importancia de la existencia y comportamiento de una celda vecina, ya que por sus características los AC son sistemas cuyo comportamiento depende del estado de cada una de sus celdas y relaciones locales, es decir el estado de las celdas vecinas [3][4][5].

Es posible definir un AC formalmente como un conjunto ordenado $AC = \{C, Q, N, \delta\}$, donde C representa el espacio dimensional, Q el conjunto de estados que puede tomar cada celda, N la vecindad o conjunto de celdas que circunda una celda en particular, y δ un conjunto de reglas o funciones de transición de estados.

Una característica fundamental de los AC es que la misma función de transición es aplicada a todas las celdas del espacio celular al mismo tiempo.

En cuanto al comportamiento central de un AC, se observa que las celdas dispuestas sobre la cuadrícula toman un valor a partir de un conjunto finito de estados, caracterizándose además por su entorno, compuesto por el conjunto finito de celdas cercanas y sus correspondientes estados.

El modelo basado en AC opera aplicando a cada celda de la cuadrícula una función de transición que recibe como argumentos los valores de la celda procesada (estado) y los valores de las celdas vecinas. La función regresa un nuevo valor de estado perteneciente a Q , que la celda en cuestión contendrá en la siguiente etapa de tiempo. Esta función se aplica a todas las celdas en forma concurrente y en cada paso discreto de tiempo. De esta forma es posible obtener un comportamiento determinista, que dependerá del estado actual, y del protocolo de funcionamiento establecido por el conjunto de reglas; así, siempre se puede obtener una salida esperada del sistema en forma determinista, o bien asociar al sistema reglas de transición con funciones estocásticas, obteniendo un comportamiento no determinista.

Inicialmente los AC fueron interpretados por Von Neumann como un conjunto de células que crecían, se reproducían y morían a medida que pasaba el tiempo. Su nombre se debe a esta similitud con el crecimiento de las células. La historia de los AC podría dividirse en tres etapas principales [6]. La primera etapa de simulación surge en la década de 1940 a través de los aportes de Von Neumann, y su intento de autorreplicación. Otros aportes importantes durante esta época fueron realizados por Stanislaw Ulam quien propone soluciones a Von Neumann para la construcción de un universo abstracto para el estudio y análisis de la reproducción automática.

La segunda etapa, considerada a partir de mediados de la década de 1960, es marcada a través del aporte de una aplicación destacable desde el punto de vista computacional: el juego de la vida de John Conway [7]. El Juego de la Vida se basa en un AC desarrollado en 1969. El juego consiste en una grilla en la que pueden existir celdas sombreadas o no sombreadas. Cada celda contiene un solo número que representa su valor de vida o de muerte (si el valor es cero). En cada paso de evolución, cada celda se compara con tres celdas vecinas, para establecer si permanece viva o muere. Lo interesante del trabajo es que Conway descubre que emergen ciertos patrones con el paso del tiempo.

La tercera etapa llega a mediados de la década de 1980 de la mano del científico Stephen Wolfram, quien realiza una caracterización de los AC, la cual es ampliamente utilizada como base de los principales trabajos realizados. Wolfram acuñó el concepto de AC elemental, realizando una elegante descripción de su comportamiento.

Si bien los hitos sugeridos resultan determinantes en la historia de los AC, se podrían analizar otras experiencias y puntos de vista en la evolución de los mismos.

2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Para formalizar el modelo propuesto se parte de la expresión de AC en [1]. El mismo trata de un modelo general que puede ser instanciado para satisfacer la simulación de problemas particulares. El modelo general está compuesto por dos submodelos, el submodelo ambiental o espacial y el submodelo de agentes que habitan el submodelo ambiental [1].

En este trabajo se plantea el modelado de flujo vehicular, donde el submodelo ambiental es representado por un AC, mientras que el submodelo de agentes

representa los vehículos que se desplazan por el ambiente.

La instanciación del modelo genérico tiene por objetivo una definición particular para el espacio celular C , el conjunto de estados Q , el tipo de vecindario, y las funciones de transición de estado correspondientes. Esto es:

C: El espacio celular es representado por un arreglo bidimensional finito, donde cada celda representa un espacio físico de $m*n$ metros (ver figura 1).

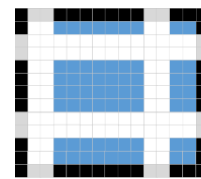


Fig. 1. Blanco: celdas que pueden contener un vehículo, Azul: espacio no transitable, Negro: borde del espacio celular, Gris: celdas de intercambio con el exterior.

Q: El conjunto finito de estados para una celda. Los estados determinan el tipo de celda a tratar y como puede evolucionar o no la misma a lo largo del tiempo. Luego, Q está compuesta por el conjunto de estados $Q=\{e,i,t,o,p\}$, donde

- e: Celda extremo. Ubicada en la frontera del arreglo que se encuentran a continuación de un carril, representa el borde para la simulación.
- i: Celda de intercambio con el exterior. Son las encargadas de realizar el intercambio de información con el entorno.
- t: Celda transitable. Estas celdas representan los espacios por los cuales puede circular un vehículo.
- o: Celda obstáculo. Celda transitable, pero temporalmente deshabilitada.
- p: Celda peatonal no transitable (en color azul en la figura).

N: Conjunto de celdas que constituyen el vecindario para cada celda c_i . Se utiliza el vecindario de Moore que está compuesto por las ocho celdas inmediatas que rodean

a la celda. Luego, se establece que el conjunto de celdas destino posible para una celda $c_i \in C$, está dado por el conjunto c_k , con $k=1..n$ cantidad variable de celdas posibles a las cuales se puede transitar desde la celda c_i . Generalmente un vehículo puede transitar solamente a la próxima celda dentro del carril actual; y en otros casos se da la situación de cambio de carril o posibilidad de giro en una esquina.

θ : conjunto de propiedades de celda, donde $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_k\}$, de manera tal que cada θ_i denota el conjunto de variables de información de estado asociado a cada celda c_i . Algunos ejemplos de valores componentes para cada θ_i son ka : Variable de tipo booleana. Indica la presencia o ausencia de un vehículo sobre la celda, kt : Variable discreta que describe el tipo de terreno de la celda en un momento dado. Refleja condiciones de terreno o climáticas, y puede ser utilizada como factor para determinar la velocidad, kp : Par ordenado de variables del tipo real (x,y) que representan la coordenada cartesiana de la celda para el geoposicionamiento de la misma. Estos valores se utilizan con el fin de aportar información gráfica en tiempo de simulación, kc : Variable discreta que describe el tipo de cruce entre carriles (cruce simple, cruce múltiple, en el caso de una rotonda por ejemplo), $kcirc$: Determina el sentido de circulación de la celda (por ejemplo: este-oeste).

δ : Es la función de transición de estados que actualiza el valor de cada celda a través del tiempo. Al aplicar la función de transición δ , el AC evoluciona del tiempo t hacia el tiempo $t+1$.

Para actualizar el estado de la celda c_i , la función tiene en cuenta como parámetros de entrada la celda actual c_i , el conjunto de celdas en el vecindario, y el estado y propiedades de cada una de ellas. Particularmente, un vehículo se puede mover a una celda en su vecindario, cuyo estado sea transitable y no denote la presencia de otro vehículo en sus variables de propiedad de celda. La función de

transición δ evalúa tanto el estado actual de las celdas, como así también las propiedades de la celda destino para verificar que se trate de una celda disponible. Algunas consideraciones de aplicación de la función son:

- Una celda borde no puede cambiar su estado a lo largo de la simulación.
- Una celda de intercambio con el exterior no puede cambiar su estado. La aparición y destrucción de entidades se ve reflejada en el conjunto de propiedades de la celda.
- Una celda obstáculo puede cambiar su estado a celda transitable o celda peatonal dependiendo por ejemplo de la simulación del estado del terreno.
- Una celda transitable puede convertirse en celda obstáculo.

$Pr\delta$: Es la función probabilística de transición de estados, que aporta la componente estocástica en la evolución de la simulación. El modelo considera comportamientos humanos, por lo tanto, requiere no solamente simular el proceso natural de la evolución del tráfico, sino otros comportamientos emergentes. $Pr\delta: \delta \rightarrow [0,1]$ especifica las transiciones estocásticas, tal que si $v \rightarrow q\epsilon\delta$ es una regla de evolución, $Pr=Pr\delta(v \rightarrow q)$ denota el hecho que cuando el vecindario de una celda actual es v , el próximo estado de la celda será q con una probabilidad de ocurrencia de Pr .

Por ejemplo: una celda transitable puede pasar a no transitable con una probabilidad que depende de la cantidad de celdas no transitables a su alrededor. Esto es: el agente que circula sobre el espacio celular cuenta con mayores posibilidades de circulación para el tiempo $t+1$.

Se considera por otro lado un submodelo que contenga y simule los vehículos que se ubican sobre el espacio celular: el submodelo vehicular. Cada vehículo es simulado individualmente como un agente inteligente autónomo, el cual percibe el

ambiente e interactúa con él y el resto de los agentes. El submodelo vehicular es la parte del modelo híbrido propuesto que se enfoca en la representación de los comportamientos humanos. El movimiento de cada agente está dado en función tanto de sus preferencias y necesidades, como así también del estado del vecindario donde se encuentra, donde posiblemente se encuentren otros agentes. Cada agente tiene asociado un conjunto de características, como por ejemplo el nivel de stress.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

La utilización del framework propuesto en [1] permite organizar las variables de medición para así conformar el AC en función de dos submodelos. Esta instanciación del modelo formal [1] es una primera aproximación a una herramienta capaz de satisfacer situaciones de simulación, donde serán especificados detalladamente los parámetros de los componentes arriba mencionados, de tal forma que tales valores puedan ser alojados en variables y objetos en un *software* de simulación.

En el trabajo se presenta una breve historia de la evolución de los AC en diferentes ámbitos del conocimiento. Por otro lado, se presenta un ejemplo de instanciación de un framework destinado a la simulación con AC. Si bien no se ha implementado hasta el momento el modelo en software, la instanciación del mismo de acuerdo a lo especificado en [1] da un grado de formalidad aceptable para la implementación, y se dejan sentadas las bases para la tarea de diseño y codificación.

Como trabajo futuro se prevé crear en lenguaje de programación de propósito general las estructuras de datos necesarias, basadas estas en programación orientada a objetos, para contener el modelo descrito.

4. FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

La línea es conducida principalmente por el Ing. Julio Monetti, miembro del LITAPS. Los demás participantes trabajan en diversas áreas y contribuyen en la realización de distintas líneas mediante actividades de colaboración. Del mismo modo, en el grupo se cuenta con estudiantes y becarios de grado.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tissera, C. (2014). Modelo Basado En Autómatas Celulares Extendidos Para Diseñar Estrategias De Evacuaciones en Casos de Emergencia. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de San Luis. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales. San Luis, Argentina.
- [2] Sarkar, P. (2020). A Brief History of Cellular Automata. Indian Statistical Institute. ACM Computing Surveys, Vol. 32, No. 1.
- [3] Tissera, P., Printista, M. & Luque, E. (2011). Implementing Sub Steps in a Parallel Automata Cellular Model. Journal of Computer Science & Technology (JCS&T). XVII. Argentina. Pp 324-336.
- [4] Reyes Gomez, D. (2011). Descripción y Aplicaciones de los Autómatas Celulares. Departamento de Aplicación de Microcomputadoras. Universidad Autónoma de Puebla. México.
- [5] Mahmoud, Z., Alzahrani, S., Natto, L., Alshehri, W. & Alrashidy, M. (2015). Survey on Cellular Automata (1-Dimension and 2-Dimension CA). IJISSET-International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol. 2 Issue 7.
- [6] Cano Rojas, A. & Rojas Matas, A. (2016). Autómatas celulares y aplicaciones. Revista Iberoamericana de Educación Matemática. Número 46.
- [7] Johnston, N. & Greene, D. (2021). Conway's Game of Life Mathematics and Construction. Editorial Lulu.com. USA.