Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра дискретной математики и
информационных технологий

Клеточные автоматы. Программная реализация саморазвивающейся системы «Жизнь» на основе клеточного автомата

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 421 группы
направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»
факультета компьютерных наук и информационных технологий
Очеретиной Ксении Александровны

Научный руководитель
профессор, д.ф.-м.н. ____________ В.А. Молчанов
подпись, дата

Зав. кафедрой
к. ф.-м.н., доцент ______________ Л.Б. Тяпаев
подпись, дата

Саратов 2016

ВВЕДЕНИЕ Саморазвивающаяся система «Жизнь» была предложена в 1970 г. Дж. Конвеем в качестве математического развлечения. В настоящее время достаточно велик интерес математиков к этой игре: доказано, что она является клеточным автоматом класса 4. Согласно существующим гипотезам, автоматы данного класса могут осуществлять универсальные вычисления, подобно машине Тьюринга, и применяться при моделировании развития турбулентности и возникновения диссипативных систем в экологии, биологии, экономике и т. д.

Целью настоящей работы является программная реализация саморазвивающейся системы "Жизнь", на основе клеточного автомата.

В работе рассматриваются следующие задачи:

1) применение клеточного автомата для построения дискретных динамических системных средств моделирования;

2) разработка концептуальных механизмов для изучения и формирования рисунка;

3) моделирование саморазвивающейся системы "Жизнь" с помощью клеточного автомата.

В первом разделе дается понятие клеточного автомата и его краткая история.

Во втором разделе приводятся основные определения, система классификации Вольфрама и классы 256 правил.

Третий раздел посвящен применению клеточного автомата к моделированию широко известной игры Дж. Конвея под названием Жизнь". Система «Жизнь» так же рассматривается как универсальная машина Тьюринга. Приводится доказательство этой универсальности.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Краткая история. В соответствии с [12] под клеточными автоматами понимаются сети элементов, меняющих свое состояние в последовательные дискретные моменты времени по определенному закону в зависимости от того, каким было состояние рассматриваемого элемента и его соседей в предыдущий дискретный момент времени.

Большая часть вычислительной структуры, в которой развиты клеточные автоматы, обязана работе Алана Тьюринга. В тоже время, стоит отметить, что отец клеточного автомата - Джон фон Нейман.

Работая над самоповторением структур биологического развития, фон Нейман пытался задумать систему, способную к производству точных копий себя. Фон Нейман решил сосредоточиться на дискретной, двумерной системе. Вместо простого «черно-белого», автомат фон Неймана использовал 29 различных структур и довольно сложную динамику, и был способен к самовоспроизводству. Клеточный автомат Фон Неймана был также первой дискретной параллельной вычислительной моделью в истории, которая, как формально показывают, была универсальным компьютером, т.е. способным к эмуляции универсальной машине Тьюринга и вычислению всех рекурсивных функций.

В начале шестидесятых, Мур (1962) доказал теоремы Сада Рая, заявляющие условия для существования так называемых Садов Рая, т.е., образцы, которые не могут появиться на решетке за исключением начальных условий.

Густав Хедлюнд (1969), чье воздействие на информатику было существенным, исследовал клеточные автоматы в рамках символической динамики. В 1970 математик Джон Конвей ввел свою игру «Жизнь», возможно, самый популярный автомат когда-либо, и одну из самых простых вычислительных моделей когда-либо.

В 1977 Томмазо Тоффоли использовал клеточные автоматы, чтобы непосредственно смоделировать физические законы, закладывая основы исследования обратимого клеточного автомата [2].

Рассмотрим основные определения, связанные с клеточными автоматами.

Во-первых, клеточные автоматы, пространственно и временно дискретны: набор «цветных» ячеек на сетке указанной формы, который развивается через шаги дискретного времени согласно ряду правил на основе состояний соседних ячеек.

Число цветов (или отличных состояний) k клеточного автомата должно быть определено. Это обычно - целое число k=2 (двоичный файл), являющийся самым простым выбором. Для двоичного автомата 0 кодирует цвет «белый», и 1 – «черный».

В дополнение к сетке, на которой клеточный автомат «живет», и цветов, которые могут принять его ячейки, должно также быть определено окружение, по которому клетки влияют на друг друга. Самый простой выбор – «самые близкие соседи», в которых только клетки, непосредственно смежные с данной ячейкой, могут быть затронуты на каждом шаге.

Во-вторых, клеточные автоматы абстрактны, поскольку они могут быть определены в чисто математических терминах и осуществлены в физических структурах.

В-третьих, клеточные автоматы – вычислительные системы: они могут вычислить функции и решить алгоритмические проблемы.

Несмотря на функционирование отличное от традиционных машин Тьюринга, клеточные автоматы с подходящими правилами могут подражать универсальной машине Тьюринга, и поэтому вычислить, учитывая Тезис Тьюринга [10], что-либо вычислимое.

Рассмотрим клеточный автомат более подробно. Несмотря на разнообразие систем, которые в литературе называются клеточными автоматами, можно определить весь клеточный автомат, настроив всего четыре параметра, которые определяют его структуру:

1. Дискретная n-мерная решетка ячеек.

Мы можем иметь одномерную, двумерную, …, n-мерную решетку. Атомарные компоненты решетки могут быть сформированы по-другому: например, двумерная решетка может быть составлена из треугольников, квадратов или шестиугольников.

2. Дискретные состояния.

На каждом шаге дискретного времени каждая ячейка находится в одном и только одном состоянии, $\sigma \in \Sigma$, Σ является набором состояний, имеющим конечное количество элементов $| \Sigma | = k$.

3. Локальные взаимодействия.

Поведение каждой ячейки зависит только от того, что происходит в ее локальном окружении. У решеток с той же основной топологией могут быть различные окружения. Крайне важно, что не может быть «действий на расстоянии».

4. Дискретная динамика.

На каждом шаге, каждая ячейка обновляет свое текущее состояние согласно детерминированной функции перехода φ: $\Sigma^n \to \Sigma$ отображающей конфигурации окружения (n-кортежи состояний Σ) к Σ. Также обычно, предполагается, что обновление синхронно, и φ берет в качестве входа в такте t состояния окружения в предыдущем такте $t - 1$.

Система классификации Вольфрама.

Это представление является также основой широко принятого кода Вольфрама. Назначив каждому правилу номер: с черным цветом = 1 и белым = 0, нижний ряд может быть считан как двоичное число (01011010); преобразование этого числа в десятичное дает имя правила.

Так как правила для клеточного автомата с $r = 1$ и $k = 2$ (где k – количество цветов или отличных состояний клеточного автомата; r – определяет диапазон, т.е. сколько ячеек является соседями к данной ячейке) отличаются только в нижнем ряду схемы, это схема кодирования эффективно идентифицирует каждое возможное правило в классе.

Одномерный клеточный автомат с $r = 1$ и $k = 2$ являются простейшими, но их поведение иногда довольно многозначно. При r = 1, существует 8 возможных соседей, если сопоставить с {1, 0}, что в сумме дает $2^8 = 256$ правил.

Начиная с клеточного автомата со случайными начальными условиями, Вольфрам продолжал наблюдать за поведением каждого правила во многих симуляторах. В результате, он смог классифицировать качественное поведение каждого правила в одном из четырех различных классов.

Классы 256 правил.

Класс 1 – развитие приводит к гомогенному состоянию, в котором, например, у всех у ячеек есть значение 0:

Класс 2 — правила, приводящие к стабильным структурам или простым периодическим образцам:

Класс 3 – правила, приводящие к хаотическому, апериодическому поведению:

Класс 4 — правила, приводящие к сложным образцам и структурам, распространяющим локально в решетке:

Класс 1 включает правила, которые быстро производят универсальные конфигурации. Правила в классе 2 производят универсальный заключительный образец или циклическое повторение между заключительными образцами, в зависимости от начальных конфигураций. Конфигурации, произведенные элементами класса 3, в значительной степени выглядят случайными, несмотря на то, что некоторые регулярные образцы и структуры могут присутствовать.

Элементы класса 4, привлекли внимание Вольфрама. Если мы наблюдаем вселенную, сгенерированную Правилом 110, мы видим регулярные образцы (несмотря на то, что не столь регулярные как в Правиле 108.

Теперь основной характеристикой клеточного автомата, является выполнение вычисления: способность создания своего правила перехода «подобного частице персистентных образцов распространения», т.е. локализованных, стабильных, но апериодических конфигураций групп ячеек, которые могут сохранить форму.

Применение клеточного автомата. Саморазвивающаяся система «Жизнь».

Наиболее известным из клеточных автоматов, можно считать клеточный автомат под названием игра «Жизнь». Саморазвивающаяся система «Жизнь» была в 1970 году Джоном Хортоном Конуэем, математиком Кембриджского университета.

Возникающие в процессе игры ситуации очень похожи на реальные процессы, происходящие при зарождении, развитии и гибели колонии живых организмов. По этой причине «Жизнь» можно отнести к быстро развивающимся в наши дни категории игр, имитирующих процессы, происходящие в живой природе.

Рассматривается бесконечная плоская решётка квадратных ячеек-клеток. Время в этой игре дискретно (t=0, 1, 2, ...). Клетка может находиться в двух состояниях: она может быть живой (значение 1), или мертвой (значение 0). Окружение каждой ячейки составлено из восьми соседних ячеек.

Основная идея состоит в том, чтобы, начав с начального расположения клеток, проследить за эволюцией исходной позиции под действием «генетических законов» Конуэя, которые управляют рождением, гибелью и выживанием клеток.

Рассмотрим типичные структуры, появляющиеся в игре «Жизнь». Простейшими являются стационарные, то есть не зависящие от времени структуры. С помощью этих стационарных структур можно получить множество других.

Стационарные структуры повторяют себя на каждом шаге по времени. Но есть и другие конфигурации, повторяющие себя через N шагов, так называемые N-циклы (периодические структуры).

В саморазвивающейся системе «Жизнь» существуют конфигурации, которые могут передвигаться по плоскости. Одной из них является «планер» (или «глайдер») – конфигурация из 5 клеток.

Существуют и другие не менее интересные структуры, например корабли, планерное ружье, так же существует конфигурация из 5 клеток, демонстрирующая эффект резонансного возбуждения (*r*-пентемино), и многие другие.

Для анализа ситуаций, возникающих в саморазвивающейся системе «Жизнь», применяется компьютер. В программе, моделирующей этот клеточный автомат, используется квадратная матрица, которая и является полем для игры. При смене хода анализируется каждый элемент старой матрицы и строится на её основе новая, которая соответствует конфигурации на следующем шаге эволюции.

«Жизнь» как универсальная машина Тьюринга.

Как любой другой клеточный автомат, клеточный автомат «Жизнь» можно рассматривать, как вычислительное устройство: начальная конфигурация автомата может закодировать входную строку. В некоторый момент времени считать текущую конфигурацию как результат вычисления, декодируя его в выходную строку.

Но что же может вычислить клеточный автомат «Жизнь»?

Оказывается, что «Жизнь» может вычислить все, что и универсальная Машина Тьюринга, и поэтому, учитывая Тезис Тьюринга [9], функционировать как универсальный компьютер: подходящий выбор начальных условий может гарантировать, что система выполнила произвольные алгоритмические процедуры.

Доказательство универсальных вычислительных мощностей «Жизни», представленное Конуэем, состоит в том, что основные стандартные блоки или примитивы стандартного цифрового вычисления могут быть эмулированы надлежащими образцами, сгенерированными «Жизнью».

В частности:

1. Хранение данных или запоминание;
2. Передача данных и внутренние часы;

3. Обработка данных, требующая универсального набора логических элементов, как отрицание, соединение и дизъюнкция — фактическая Машина Тьюринга была позже явно реализована в «Жизни» [10].

Доказательство универсальности.

Доказательство универсальных вычислительных мощностей «Жизни», представленное Конуэем, состоит в том, что основные стандартные блоки или примитивы стандартного цифрового вычисления могут быть эмулированы надлежащими образцами, сгенерированными «Жизнью».

В частности:

4. Хранение данных или запоминание;

5. Передача данных и внутренние часы;

6. Обработка данных, требующая универсального набора логических элементов, как отрицание, соединение и дизъюнкция — фактическая Машина Тьюринга была позже явно реализована в «Жизни» [10].

Единственная ячейка с определенным значением в одном клеточном автомате может быть моделирована фиксированным блоком ячеек в другом; после определенного числа шагов, развитие этих блоков ячеек подражает единственному развитию ячейки в первом клеточном автомате.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ В работе рассмотрены такие задачи как применение клеточного автомата для построения дискретных динамических системных средств моделирования; разработка концептуальных механизмов для изучения и формирования рисунка; моделирование саморазвивающейся системы "Жизнь" с помощью клеточного автомата.

Также в работе дано понятие клеточного автомата и его краткая история. Приведены основные определения, система классификации Вольфрама и классы 256 правил. Описано применение клеточного автомата к моделированию широко известной игры Дж. Конвея под названием Жизнь". Система «Жизнь» так же рассматривается как универсальная машина Тьюринга. Приводится доказательство этой универсальности.

В заключительной части работы приводится программная реализация саморазвивающейся системы «Жизнь» на основе клеточного автомата.

Реализация алгоритма включает в себя:

1) Меню выбора входных данных;
2) Ручное или случайное построение начального состояния системы, или загрузка из файла;
3) Наглядное изображение динамики развития системы;
4) Возможность пошагового выполнения;
5) Сохранение выходных данных на экране или в файл.

В результате была программно реализована саморазвивающаяся система «Жизнь», отвечающая поставленным целям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Crutchfield, J. P., 1994 , «The Calculi of Emergence: Computation, Dynamics, and Induction» *;*

2. Epstein, J.M., 1999, «Agent-based computational models and generative social science»;

3. Ilachinski, A., 2001, Cellular Automata, Singapore: World Scientific Publishing.

4. Wolfram S. Cellular automation Fluids.// J.Stat.Phys. 1986. Vol. 45. PP. 471-526.

5. Тоффоли Т., Марголус Н. Машины клеточных автоматов. М.: Мир, 1991. 280 с.

6. Cook, M., 2004, «Universality in Elementary Cellular Automata», *Complex Systems*, 15: 1–40.

7. Chopard B., Droz M. Cellular automata model for heat conduction in a fluid. Physics Letters A. 1988. Vol. 126. N 8/9. PP. 476-480.

8. Stream Cyphers with One- and Two-Dimensional Cellular Automata

9. Tomassini M., Perrenoud M. [Электронный ресурс] / Google [Электронный ресурс]. URL: https://books.google.ru/books?id=9E_nwkCXX7oC&pg=PA286&lpg=PA286&dq=0M.%2C%20and%20TwoDimensional%20Cellular%20Automata&f=false (дата обращения 15.04.2016).

10. Fredkin, E., 1990, «Digital Mechanics: An Information Process Based on Reversible Universal Cellular Automata» Physica D, 45:254–270.

11. Dennett, D., 1991, «Real Patterns», Journal of Philosophy, 88: 27–51.

12. Лоскутов А. Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. — М.: Наука, 1989.

13. Crutchfield, J. P. Hanson J. E., 1993, «Turbulent Pattern Bases for Cellular Automata» Physical D69: 279–301