

Применение клеточных автоматов для моделирования движения группы людей

М. А. Кантуреева

Аспирант, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
010000, Астана, Казахстан, ул. Сатбаева, 2, e-mail: monsiko@mail.ru

Аннотация: В данной работе речь идет о моделировании движения множества людей. Используется конечно-автоматная (КА) модель. Проведен анализ методов моделирования поведения толпы, в том числе изучалась зависимость плотности, скорости толпы и пропускной способности различных сооружений от различных внешних параметров. Основным инструментальным средством для выполнения данной работы является программная система AnyLogic. Автором была реализована модель небольшого аэропорта.

Ключевые слова: клеточные автоматы, моделирование движения людей, полевая модель движения людей, КА-модель, FF-модель, модель аэропорта, AnyLogic

Введение

Клеточные автоматы являются частным случаем конечных автоматов. В частности, они используются для моделирования динамического поведения однородных сред. Поведение клеточных автоматов определяется в терминах локальных зависимостей. Каждая клетка представляет собой конечный автомат, состояние которого в очередной момент времени определяется состояниями ее соседей в некоторой окрестности. Обычно рассматриваются так называемая окрестность фон Неймана (четыре соседа, расположенные ортогонально клетке) и окрестность Мура (четыре соседа, примыкающие по диагоналям).

Первые конечно-автоматные модели (КА-модели) движения людей основывались на моделях дорожного трафика. Динамика таких моделей в основном была детерминистическая. Например, изучалось двунаправленное движение в длинном коридоре. Обновление положения частиц происходило последовательно. Частицам задавалось только направление для перемещения. Если «желаемая» ячейка была занята другой частицей, двигающейся в противоположном направлении, то частица могла случайным образом выбрать себе другую незанятую ячейку для перемещения. Фактически, движение частиц рассматривалось как аналог многополосного дорожного движения.

В дальнейшем появились расширения и вариации данных моделей. Например, различные специальные типы обновления положения частиц, возможность обратного движения. Исследовалось влияние формы частиц, другие геометрии, обобщения для полноценного двухмерного движения, когда передвижение частиц не ограничивалось только близлежащими клетками, частицы могли передвигаться на две, три или четыре клетки за один шаг.

Чтобы избегать конфликтов между частицами, которые пытались двигаться в одну и ту же позицию, обновление положения частиц происходило последовательно [1,2]. В каждой ячейке пространства назначались очки на основе ее близости к другим частицам. Очки описывали «отталкивающие» взаимодействия, а передвижение определялось посредством конкуренции между этими силами отталкивания, и их рост приближал частицу к цели.

1. Полевая модель движения людей

Широкое распространение получила полевая модель Floor Field (FF). В ее основе лежит использование так называемых полей [3] для моделирования движущей силы и

взаимодействия с другими частицами. В модели используются два поля: динамическое D и статическое S . Эти поля имеют такую же дискретную структуру, как и само пространство, по которому передвигаются частицы в КА-моделях. Динамическое поле D соответствует виртуальному следу, который создается движением частиц и оказывает влияние на движение других. Оно имеет свою собственную динамику, а именно: рассеивание и забывание. Статическое поле S или поле расстояний не изменяется со временем, представляет своего рода карту местности, где каждая ячейка содержит обратное расстояние до ближайшего выхода с учетом всех неподвижных препятствий. Поле S не зависит от наличия или отсутствия частиц в рассматриваемой области. Значение S увеличивается с приближением к выходу.

Переходные вероятности для всех частиц зависят от значений полей S и D в соседних клетках. Формула вычисления вероятностей устроена так, что наибольшая вероятность придается направлениям с наибольшими значениями поля. Влияние обоих полей на движение частицы контролируется константами k_s и k_D соответственно. Чем больше значение k_s , тем более направленное движение к выходу и более короткий путь выбирают частицы. При сильном привязывании к динамическому полю, т. е. при увеличении k_D наблюдается все более выраженное «стадное» поведение, когда индивидуумы пытаются следовать за другими.

Классическая формула переходных вероятностей (например, в направлении φ) имеет вид

$$\rho_{\varphi} = Norm^{-1} e^{k_D D_{\varphi}} e^{k_s S_{\varphi}} (1 - f_{\varphi}) \omega_{\varphi},$$

где $Norm$ – нормализующий коэффициент (сумма всех переходных вероятностей), k_s, k_D – параметры модели, S_{φ}, D_{φ} – значения статического и динамического полей в ячейке по направлению φ . Величина f_{φ} задает занятость или свободность ячейки. Если $f_{\varphi} = 0$, то ячейка свободна, и если $f_{\varphi} = 1$, то ячейка занята. Величина ω_{φ} указывает на наличие ($\omega_{\varphi} = 1$) или отсутствие ($\omega_{\varphi} = 0$) стены и других неподвижных препятствий. Перемещение в занятую ячейку или ячейку, относящуюся к препятствию, запрещено. Частица может остаться на прежнем месте только в случае, когда все соседние клетки заняты или относятся к препятствиям.

Правила переходов устроены следующим образом: вычисляется статическое поле S , динамическое поле D в начальный момент времени имеет нулевое значение, для каждой частицы и для каждого направления перемещения определяются переходные вероятности и на основе полученного распределения возможных направлений выбирается направление для перемещения. Если в модели используется синхронное обновление положения частиц, то возникают конфликты, связанные с тем, что на одну ячейку могут претендовать несколько частиц [4]. После разрешения таких конфликтов частицы перемещаются на новые позиции, динамическое поле обновляется.

В настоящее время динамическое поле D практически не учитывается при моделировании ($k_D = 0$). Но идея использования поля расстояний S для моделирования движущей силы явилась существенным улучшением по сравнению с другими моделями и позволила легко воспроизводить направленное движение людей.

На основе FF-подхода было разработано много конкретных моделей. Анализ работ показывает, что FF-модели различаются по следующим особенностям:

- 1) способ дискретизации пространства, размеры и форма ячеек;
- 2) шаблон соседства;
- 3) скорость движения частиц (перемещение на одну ячейку или на несколько);
- 4) способ вычисления поля S ;

- 5) режимы работы КА, синхронный или асинхронный;
- 6) способ вычисления вероятностей переходов;
- 7) правила переходов;
- 8) способ разрешения конфликтов.

В FF-моделях обычно используется обратное поле расстояний, т. е. значения поля S увеличиваются при приближении к выходу. Также в FF-моделях обычно используется синхронный режим работы КА. Все частицы перемещаются на новые позиции одновременно. При таком режиме возникают конфликтные ситуации, когда две или более частицы претендуют на одну ячейку. Асинхронный режим исключает возникновение конфликтных ситуаций. В этом случае частицы для перемещения, как правило, выбираются случайным образом [2,3].

В работах А. Кирхнера, К. Нишинари и А. Шадшнайдера [5] исследуются способы разрешения конфликтов. Основная идея состоит в следующем. С вероятностью $\mu \in [0,1]$ одной из частиц, которая выбирается случайно из всех кандидатов, разрешается переместиться в спорную ячейку, остальные остаются на месте. Это позволяет описывать эффект затруднения движения между частицами. Параметр μ можно интерпретировать как некоторый вид локального давления между частицами. Если значение μ близко к единице, тогда соседние частицы могут сильно мешать друг другу достичь желаемых ячеек. Величину μ называют фрикционным параметром. В простейшем случае при возникновении конфликтной ситуации случайным образом выбирается одна частица для перемещения, остальные остаются на прежних местах [4,5]. Формула для вычисления вероятностей переходов – самая вариативная часть в моделях движения людей.

Приведем некоторые более точные определения, касающиеся КА-моделей [1].

Клеточный автомат обычно определяется множеством клеток, плотно заполняющих дискретное D -мерное пространство. Паре $\langle i, j \rangle, (0 < i < N, 0 < j < M)$ соответствует ячейка, левый нижний угол, который имеет данные координаты [4]. Считаем, что в каждой точке задан $\varphi(i, j)$ – потенциал, который отражает некоторое поле, действующее на людей. Потенциал можно задать посредством непрерывной функции $\varphi(x, y)$. Далее производим дискретизацию функции. Как обычно с потенциалом можно связать «напряженность поля» в узле сетки:

$$E_{ij}^x = \varphi(i, j + 1) - \varphi(i, j - 1),$$

$$E_{ij}^y = \varphi(i + 1, j) - \varphi(i - 1, j).$$

Следующий шаг – это задание вероятностей перехода объекта в соседние ячейки.

Сначала определяем шаблон соседства $T(i, j)$. Например, если перемещение возможно в четырех направлениях (по горизонтали и по вертикали), то шаблон соседства имеет вид:

	$(i - 1, j)$	
$(i, j - 1)$	(i, j)	$(i, j + 1)$
	$(i + 1, j)$	

С движением частицы можно связать (ассоциировать) случайную величину σ . При этом имеет место формула $\sigma = u_{ij-1} + u_{ij+1} + u_{i-1,j} + u_{i+1,j}$, а следующие величины

$$\rho_1 = \frac{u_{ij-1}}{\sigma}, \quad \rho_2 = \frac{u_{ij+1}}{\sigma}, \quad \rho_3 = \frac{u_{i-1j}}{\sigma}, \quad \rho_4 = \frac{u_{i+1j}}{\sigma}$$

трактуются как вероятности перехода объекта налево, направо, вниз и вверх соответственно, очевидно, что $\sum_{i=1}^4 \rho_i = 1$.

Рассмотрение только четырех направлений не означает серьезного ограничения. Переходы по диагональным направлениям могут быть легко осуществлены [5]. Направление движения частицы определяется на основе вероятностей переходов в каждом направлении для каждой частицы на каждом дискретном шаге времени и набором правил переходов [6,7].

Способы задания потенциалов. Традиционная схема пошаговых вычислений для дискретного подхода, основанного на теории КА, заключается в следующем. Сначала вычисляются переходные вероятности, в соответствии с этим выбираются направления движения для каждой частицы, затем происходит разрешение конфликтов, если две или более частицы оказались претендентами на одну ячейку, и непосредственно перемещение.

Если $i_0 j_0$ – некоторая точка, то можно задать потенциал, принимающий максимально значение в этой точке, имеющей форму «шапочки». «Шапочку» можно задать с помощью нормального распределения:

$$f(x, y) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2}}$$

Обычно рассматривают частный случай $\sigma_x = \sigma_y, \mu_x = \mu_y$.

По нашему мнению, более интересно рассмотреть функции, исследуемые в размытой логике Заде [8, 9]. Например, функции, задающие нечеткие числа.

Нечетким числом называют нормализованное и выпуклое нечеткое множество A , определенное на множестве действительных чисел \mathbf{R} , т. е. для функции принадлежности которого $\mu_A(x)$ выполнено:

- 1) $\max_{x \in \mathbf{R}} \mu_A(x) = 1$, нечеткое число нормализовано;
- 2) $\mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min(\mu_A(x_1); \mu_A(x_2))$, число выпукло.

2. Результаты исследования модели движения людей

Проведен обзор и анализ многих натуральных наблюдений за поведением реальных толп, в том числе изучение зависимости плотности, скорости толпы и пропускной способности различных сооружений от различных внешних параметров. Основным инструментальным средством для выполнения данной работы является программная система AnyLogic [10]. Автором данной работы была создана модель небольшого аэропорта.

AnyLogic является уникальным программным продуктом, поддерживающим три методологии имитационного моделирования, называемых системной динамикой, дискретно-событийным и агентным моделированием. Система включает набор примитивов и библиотечных объектов для эффективного моделирования производства и логистики, бизнес-процессов и персонала, финансов, потребительского рынка, а также окружающей инфраструктуры в их естественном взаимодействии.

В первой разработанной модели имеется возможность 2D-анимации (рис. 1). В следующей модели используется 3D-анимация (рис. 2). Добавлена камера, возникает соответствующее 3D-окно, и пассажиры также отображаются в виде 3D-объектов.

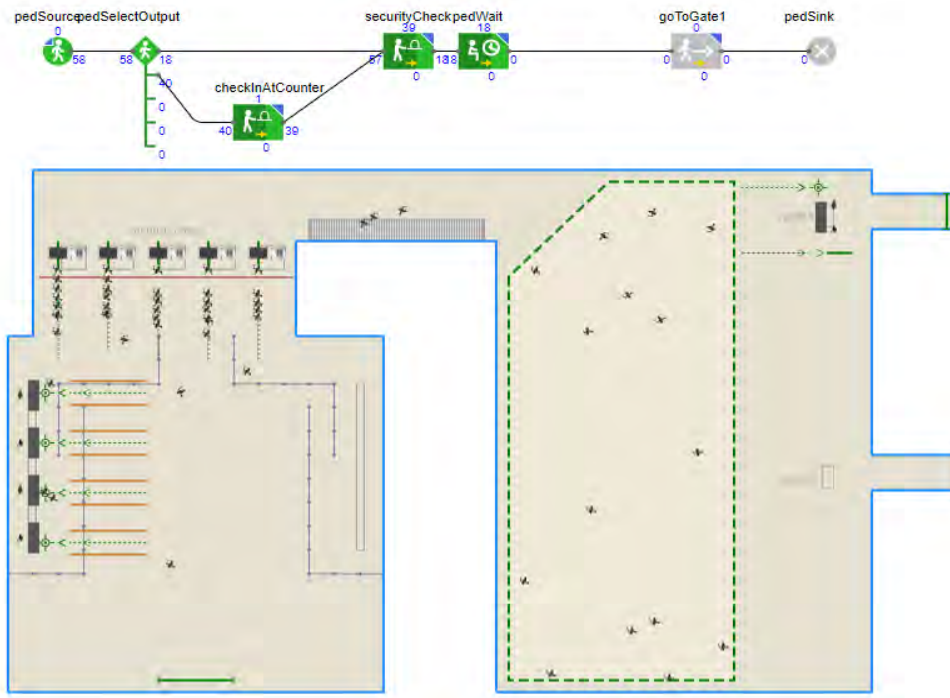


Рис. 1. 2D-модель аэропорта

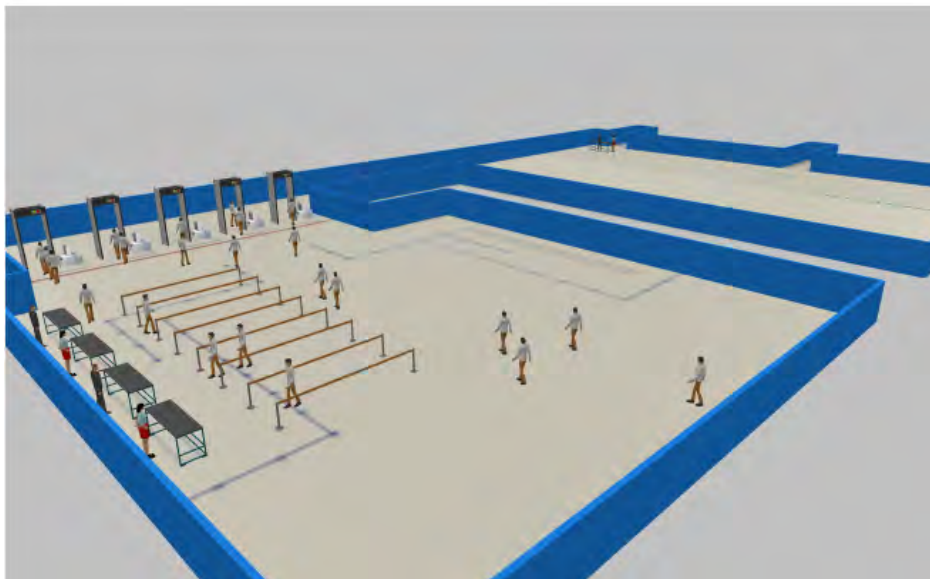


Рис. 2. 3D-модель аэропорта

Пассажиры, прибывающие в аэропорт, регистрируются на рейс. Затем все пассажиры должны будут пройти процедуру предполетного досмотра, после чего они смогут направиться в зону ожидания перед гейтами, дожидаясь начала посадки на свой рейс. При объявлении начала посадки пассажиры направляются к соответствующему гейту. У гейта служащие аэропорта проводят проверку посадочных талонов, после чего пассажиры проходят на посадку на самолет.

Изменения скоростей движения участников толпы зависят от многих причин, трудно подчиняющихся точному расчету. Поэтому при оценке скорости движения неизбежно приходится прибегать к средним значениям, которые можно считать надежными, если они установлены на основании статистических методов.

В значительной степени скорость движения зависит от плотности людской массы. В рассмотренных моделях движение людских потоков носит спокойный характер. Если предположить, что в таких скоплениях неожиданно возникнет аварийная ситуация, легко представить себе к каким серьезным последствиям она может привести. Изучение подобных ситуаций требует усложнения математических моделей.

Список литературы

1. *Малинецкий Г. Г., Степанцов М. Е.* Применение клеточных автоматов для моделирования движения группы людей // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2004. № 11. С. 2094–2098.
2. *Bandini S., Rubagotti F., Vizzari G., Shimura K.* A Cellular Automata Model for Pedestrian and Group Dynamics: Motivations and First Experiments // Parallel Computing Technologies. Berlin Heidelberg : Springer, 2011. LNCS 6873. P. 125–139.
3. *Leng B., Wang J., Zhao W., Xiong Z.* An extended floor field model based on regular hexagonal cells for pedestrian simulation // Physica A. 2014. P. 119–133.
4. *Varas A., Cornejo M. D., Mainemer D. et al.* A Cellular automaton model for evacuation process with obstacles // Physica A.: Statistical Mechanics and its Applications. 2007. P. 631–642.
5. *Kirchner A., Nishinari K., Schadschneider A.* Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics // Physical Review E. 2003. May. Vol. 67(5 Pt 2). P. 056122.
6. *Bandini S., Gorrini A., Vizzari G.* Towards an Integrated Approach to Crowd Analysis and Crowd Synthesis: a Case Study and First Results // Pattern Recognition Letters. 2014. P. 16–29.
7. *Кирик Е. С., Юргельян Т. Б., Круглов Д. В., Малышев А. В.* О непрерывно-дискретной стохастической модели движения людей // Материалы XIII Всерос. семинара Моделирование неравновесных систем. Красноярск : ИВМ СО РАН, 2010. С. 81–85.
8. *Заде Л. А.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М. : Мир, 1976. 165 с.
9. *Пивкин В. Я., Бакулин Е. П., Кореньков Д. И.* Нечеткие множества в системах управления: учеб. пособие. Новосибирск : Изд-во НГУ, 1997. 52 с.
10. AnyLogic (XJ Technologies). URL: <http://www.gpss.ru/systems/anylogic.html> (accessed: 20.10.2018).

UDK 519.63, 519.688

APPLICATION OF CELLULAR AUTOMATA FOR MODELING THE GROUP OF PEOPLE MOVEMENT

M. A. Kantureeva

Ph.D. student, L. N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Astana, Kazakhstan, Satbayev str., 2, e-mail: monsiko@mail.ru

Abstract: In this paper, we are talking about modeling the group of people movement. A finite automaton (FA) model is used. The analysis of methods for modeling the crowd behavior was carried out, including the dependence of density, crowd speed and ability of throughput in various buildings for various external parameters. The main tool for developing this work is AnyLogic software system. The author has implemented a model of a small airport.

Keywords: cellular automata, simulation of the movement of people, field model of movement of people, FA model, FF model, airport model, AnyLogic

References

1. *Malinetsky G. G., Stepantsov M. E.* Primeneniye kletochnykh avtomatov dlya modelirovaniya dvizheniya gruppy lyudei [The use of cellular automata to simulate the movement of a group of people] // Zhurnal vychislitelnoi matematiki i matematicheskoi fiziki = Journal of computational mathematics and mathematical physics. 2004. № 11. P. 2094–2098. (in Russian)
2. *Leng B., Wang J., Zhao W., Xiong Z.* An extended floor field model based on regular hexagonal cells for pedestrian simulation // Physica A. 2014. P. 119–133.
3. *Bandini S., Rubagotti F., Vizzari G., Shimura K.* A Cellular Automata Model for Pedestrian and Group Dynamics: Motivations and First Experiments // Parallel Computing Technologies. Berlin Heidelberg : Springer, 2011. LNCS 6873. P. 125–139.
4. *Varas A., Cornejo M. D., Mainemer D. et al.* A Cellular automaton model for evacuation process with obstacles // Physica A.: Statistical Mechanics and its Applications. 2007. P. 631–642.
5. *Kirchner A., Nishinari K., Schadschneider A.* Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics // Physical Review E. 2003. May. Vol. 67(5 Pt 2). P. 056122.
6. *Bandini S., Gorrini A., Vizzari G.* Towards an Integrated Approach to Crowd Analysis and Crowd Synthesis: a Case Study and First Results // Pattern Recognition Letters. 2014. P. 16–29.
7. *Kirik E. S., Yurgelyan T. B., Kruglov D. V., Malyshev A. V.* O nepreryvno-diskretnoi stokhasticheskoi modeli dvizheniya lyudei [On the continuous-discrete stochastic model of the movement of people] // Materialy XIII Vserossiiskogo seminara Modelirovaniye neravnovesnykh sistem = Proceedings of the XIII All-Russian Seminar Simulation of non-equilibrium systems. Krasnoyarsk : ICM SB RAS, 2010. P. 81–85.
8. *Zadeh L. A.* Ponyatiye lingvisticheskoi peremennoi i yego primeneniye k prinyatiyu priblizhonnykh reshenii [The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning]. M. : Mir, 1976. 165 p. (in Russian)
9. *Pivkin V. Ya., Bakulin E. P., Korenkov D. I.* Nechetkiye mnozhestva v sistemakh upravleniya [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions]: uchebnoye posobiye = the tutorial. Novosibirsk : NSU, 1997. 52 p. (in Russian)
10. AnyLogic (XJ Technologies). URL: <http://www.gpss.ru/systems/anylogic.html> (accessed: 20.10.2018).