

УДК 51.77

О дискретной модели движения людей с элементом анализа окружающей обстановки

Екатерина С.Кирик*

Дмитрий В.Круглов†

Институт вычислительного моделирования СО РАН,

Академгородок, 660036, Красноярск, Россия

Татьяна Б.Юргельян‡

Институт математики,

Сибирский федеральный университет,

пр. Свободный 79, Красноярск, 660041, Россия

Получена 15.03.2008, окончательный вариант 15.04.2008, принята 05.05.2008

В работе рассматривается дискретный подход к моделированию движения людей в различных пространственных ситуациях. Модель построена с использованием теории клеточных автоматов, является стохастической, однако вероятности переходов вычисляются так, что воспроизводится движение от случайного до строго направленного. Добавлен элемент анализа окружающей обстановки, обеспечивается возможность реализации стратегии «терпеливого человека». Представлены результаты численных исследований.

Ключевые слова: клеточные автоматы, вероятности переходов, модель движения людей.

Введение

Одной из важных составляющих обеспечения нормальной жизнедеятельности в городах является вопрос о безопасности движения людей в условиях ограниченного пространства и большого количества других движущихся людей. Так, жители современных городов часто сталкиваются с проблемой движения в толпе при пользовании общественным транспортом, в подземных переходах, в турникетах и на эскалаторах метро. Также существует серьезная проблема при эвакуации людей из зданий в экстренных случаях.

Поскольку реальный эксперимент требует значительных затрат, а иногда в качестве экспериментальных данных могут выступать лишь результаты уже произошедших ЧП, подчас с трагическим исходом, возникает необходимость компьютерного моделирования движения людей, например, с целью определения наилучшей геометрии пространства, где предполагается скопление людей, или определения времени эвакуации.

При математическом моделировании ситуаций, в которых активно действуют люди, возникает проблема, состоящая в том, что полное математическое описание поведения отдельно взятого человека на данном этапе развития науки не представляется возможным, поскольку его действия определяются очень большим количеством факторов, как рациональных, так и иррациональных.

*e-mail: kirik@icm.krasn.ru

†e-mail: tanyakub@torins.ru

‡e-mail: tanthik@krasu.ru

© Siberian Federal University. All rights reserved

Однако поведение большой группы людей в стандартной (не экстренной) ситуации поддается предсказанию и хорошо описывается вероятностным образом. Здесь работает закон больших чисел: даже если один человек по каким-то причинам решит действовать нетривиально, его действия весьма мало повлияют на движение группы в целом.

В последние несколько лет моделированию движения людей было посвящено много исследований. При этом следует отметить, что доля российских работ в этом потоке непросто мала. (И это один из факторов, стимулировавших авторов работы заняться данным исследованием.) Анализ существующих работ, даже не исчерпывающий, показывает, что в основном исследования проводятся с использованием следующих двух подходов: непрерывного (например, [1]) и дискретного (например, [2], [3], [4]).

Подход [1] основан на том, что движение людей описывается при помощи системы N (количество людей) дифференциальных уравнений (движение отдельного человека подчинено второму закону Ньютона со сложной правой частью, учитывающей силы взаимодействия человека с другими людьми и препятствиями). Такие модели позволяют учитывать массу и скорость отдельного человека. В среднем требуется $O(N^2)$ [5] вычислительных операций для одного временного шага.

Дискретный подход предполагает дискретизацию пространства и унификацию физических параметров вовлеченных в движение людей, однако отличается прозрачностью правил принятия решений на каждом временном шаге. Для одного временного шага в дискретной модели требуется $O(N)$ операций.

В данной работе рассматривается дискретная вероятностная модель движения людей в пространстве с заданной геометрией, основанная на теории клеточных автоматов (КА) [6]. Работа является продолжением исследований, начатых в [7], где использовались идеи [2], [3].

1. Постановка задачи

Пусть пространство (включая внешние стены) представляет собой плоскую область, разбитую на ячейки 40×40 см (это средний размер, занимаемый человеком в толпе [3]), которые могут быть либо свободными, либо занятыми только одним человеком (частицей):

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ячейка } (i, j) \text{ занята человеком;} \\ 0, & \text{ячейка } (i, j) \text{ свободна.} \end{cases}$$

Также ячейки могут являться стенами и препятствиями (недвижимыми):

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ячейка } (i, j) \text{ занята стеной (препятствием);} \\ 0, & \text{ячейка } (i, j) \text{ свободна.} \end{cases}$$

Геометрия рассматриваемого пространства (расположение стен, препятствий, выходов и т.д.) известна и отражена в так называемой «карте местности» — статическом поле S [3]. Оно дискретно, его размеры совпадают с размерами пространства, и каждая ячейка S_{ij} поля S отражает дискретное расстояние (наименьшее) от этой ячейки до ближайшего выхода.

Начальное положение людей (частиц) известно. Целью передвижения частиц является ближайший выход. На каждом временном шаге каждая частица может переместиться в одну из четырех свободных (на текущий момент) соседних ячеек или остаться на месте (окрестность фон Неймана) — рис. 1, $i, j = \{-1, 0, 1\}$, т.е. $v_{\max} = 1$. Направление движения частицы предполагается, вообще говоря, случайным и определяется на основе вероятностей

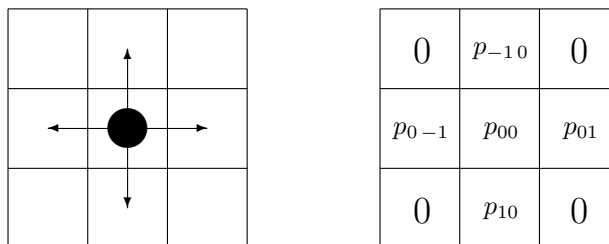


Рис. 1. Целевые ячейки для человека в следующий момент времени

переходов в каждом направлении для каждой частицы в каждый дискретный шаг времени и набора правил переходов частиц.

Таким образом, основным предметом исследований является определение способа вычисления вероятностей и правил переходов частиц.

2. Решение

Сложилась стандартная схема функционирования КА при моделировании движения людей: сначала вычисляются переходные вероятности и разыгрываются направления движения для каждой частицы, затем происходит разрешение конфликтов (если две и более частицы оказались претендентами на одну ячейку) и непосредственно само перемещение (одновременное для всех частиц).

Очевидно, что основной движущей силой для частиц, преследующих цель покинуть помещение, является минимизация поля S . Причем отметим, что желание двигаться к выходу не зависит от положения и текущего расстояния до ближайшего выхода. В то же время движение людей не может быть уложено в рамки движения неодушевленных частиц (например, сыпучих материалов). В нормальных (не экстренных) условиях эвакуации оно характеризуется, как минимум, следующими особенностями [5]:

- люди стараются избегать излишнего контакта друг с другом и выбирают свои траектории таким образом, чтобы как можно меньше задевать соседей. Такое же «отталкивание» (психологическое) происходит и по отношению к стенам и другим препятствиям. С увеличением плотности комфортное расстояние уменьшается;

- люди, двигаясь к цели, используют как минимум две стратегии: минимизировать длину пути и/или минимизировать время пути.

Таким образом, человек, двигаясь к цели, учитывает информацию и условия, предоставляемые окружающей обстановкой. Соответственно и модель должна воспроизводить (желательно максимально) эти особенности. В нашем случае они должны учитываться при расчете вероятностей переходов частиц на каждом временном шаге и в правилах переходов.

Анализ окружающей обстановки. Для осуществления анализа окружающей обстановки в модели вводится радиус видимости $r > 0$ (задаваемый параметр модели). Это расстояние (выраженное в количестве ячеек), в пределах которого окружающая обстановка влияет на значение вероятности в соответствующем направлении.

Из работы [2] было позаимствовано следующее формализованное представление проце-

дуры анализа окружающей обстановки:

$$A_{ij} = 1 - \frac{1}{r} \left(\sum_{m=i(l=j)}^{i \pm r_{ij}^* (j \pm r_{ij}^*)} f_{ml} + r - r_{ij}^* \right), \quad (1)$$

где (i, j) — номер ячейки, соседней с текущей ячейкой рассматриваемой частицы; $r_{ij}^* \in [0, r]$ — расстояние до ближайшего препятствия в направлении, определяемом ячейкой (i, j) ; $\sum_{m=i(l=j)}^{i \pm r_{ij}^* (j \pm r_{ij}^*)} f_{ml} = f$ — количество частиц, движущихся в этом направлении и находящихся в пределах расстояния r_{ij}^* от текущей позиции.

Очевидно, что $A_{ij} \in [0, 1]$. Значение A_{ij} зависит от конфигурации поля в текущий момент времени, местоположения частицы и ячейки (i, j) .

Если $A_{ij} = 0$, то перемещение в ячейку (i, j) невозможно ($w_{ij} = 1$ (т.е. $r_{ij}^* = 0 \Rightarrow f = 0$) или $r_{ij}^* = r$ и $f = r_{ij}^*$ или $r_{ij}^* < r$ и $f = r_{ij}^*$ (два последних случая соответствуют максимальной плотности частиц в рассматриваемом направлении)). Если $A_{ij} = 1$, то направление полностью свободно в пределах радиуса видимости. Если же $A_{ij} \in (0, 1)$, то в направлении клетки (i, j) в радиусе видимости либо находится стена или другое непреодолимое препятствие, либо в этом направлении наблюдается некоторое количество людей, либо и то и другое вместе.

Таким образом, с помощью коэффициента A_{ij} можно уменьшать вероятность движения в неблагоприятных для движения направлениях.

Правила переходов. На предварительном этапе рассчитывается поле S , каждая ячейка которого есть минимальное дискретное расстояние до ближайшего выхода, выраженное в длине шага. (При вычислении поля S диагональные переходы разрешаются и считается, что при горизонтальных и вертикальных сдвигах на одну ячейку длина шага равна 1, а при диагональных — $\sqrt{2}$.)

На каждом временном шаге функционирование КА происходит по схеме:

Шаг 1. Для каждой частицы вычисляется вероятность переместиться в ячейку с номером (i, j) , являющуюся одной из четырех соседних:

$$p_{ij} = \text{Norm}^{-1} A_{ij} e^{k_S \Delta S_{ij}}, \quad (2)$$

$k_S \geq 0$ — параметр чувствительности поля S ; ΔS_{ij} — разница между значением поля в текущей ячейке и ячейке (i, j) ; $\text{Norm} = \sum_{i,j} A_{ij} e^{k_S \Delta S_{ij}}$ — нормализатор, сумма берется по всем четырем соседним ячейкам.

Обратим внимание, что вероятность «остаться на месте» непосредственным образом не вычисляется. Другими словами, изначально она предполагается равной нулю, поскольку считается, что частицы имеют своей целью движение, и реализация возможности «остаться на месте» является мерой вынужденной — когда воспроизводится стратегия кратчайшего пути, но соответствующее направление на текущий момент занято. Эта процедура рассматривается ниже.

Шаг 2. Если $\text{Norm} = 0$ (все соседние ячейки заняты), тогда частица остается на прежнем месте, иначе — частица выбирает целевую ячейку с номером $(i, j)^*$ для перемещения, основываясь на вероятностях перехода (2).

Если $\text{Norm} \neq 0$ и $f_{ij}^* = 0$, тогда ячейка $(i, j)^*$ фиксируется.

Если $\text{Norm} \neq 0$ и $f_{ij}^* = 1$, тогда целевая ячейка для этой частицы выбирается снова, но уже среди оставшихся свободных соседних ячеек и текущей ячейки. Происходит пересчет

переходных вероятностей. Для соседних занятых клеток вероятность перехода будет нулевой. Случаю остаться на месте приписывается вероятность $\frac{p_{ij}^*}{\sum_{i,j} p_{ij}}$, остальным — $\frac{p_{ij}}{\sum_{i,j} p_{ij}}$, где сумма берется по всем текущим целевым клеткам. Таким образом, в данном алгоритме реализуется стратегия «терпеливого человека».

Шаг 3. Разрешение конфликтов: если две или более частицы претендуют на одно место, то перемещению всех этих частиц будет отказано с вероятностью $\mu \in [0, 1]$, с вероятностью $1 - \mu$ одна частица-кандидат переместится в новую ячейку, а остальные останутся на своих прежних местах [8]. μ — фрикционный параметр.

Шаг 4. Частицы, которым позволено перемещение, перемещаются в свои целевые ячейки.

Правила применяются ко всем частицам в один и тот же момент времени.

Когда частица попадает в ячейку, соответствующую выходу, она удаляется из рассмотрения, т.е. считается, что частица достигла своей цели — выхода.

Обратим внимание на тот факт, что даже если соседняя ячейка занята ($f_{ij} = 1$), вероятность перейти в эту ячейку вычисляется и не обязана быть равной нулю. В этом случае вероятность может быть интерпретирована как мера желания двигаться в этом направлении. А тот факт, что занятая ячейка является фиктивным кандидатом для передвижения при разыгрывании направления, дает возможность перераспределить вероятность занятого направления (в случае его выбора) на возможность «остаться на месте». Тем самым вводится способ моделирования «терпеливого человека», т.е. предоставляется возможность остаться на месте и подождать, пока желаемое направление освободится. Последнее позволяет избежать ненужных метаний и колебаний частиц. Так, например, в базовой модели [3], [4] частица могла остаться на прежнем месте, только если все соседние ячейки заняты.

Параметры модели. С помощью параметров модели можно воспроизводить различные ситуации.

Так, k_S , параметр чувствительности поля S , определяет степень знания «карты местности» или желание двигаться по направлению к выходу. Чем выше k_S , тем более направленно в совокупности частицы двигаются к выходу. Если $k_S = 0$, то частицы не используют информацию о поле S и двигаются ненаправленно.

Радиус видимости r определяет степень информированности частиц об окружающей обстановке. Если $r = 1$ (что соответствует модели [3]), то ситуацию можно интерпретировать как движение в темноте «на ощупь». Чем больше радиус видимости, тем более окружающие стены, препятствия и люди влияют на значение вероятности в соответствующем направлении и, как результат, на выбор направления и индивидуальную и коллективную динамику в целом.

Фрикционный параметр $\mu > 0$ призван моделировать эффекты конкурентного поведения в ситуациях поспешного покидания помещения, которые в наибольшей степени возникают в областях максимального увеличения плотности (это территория перед сужениями, на поворотах и т.п.).

3. Численные исследования

Рассмотрим несколько примеров эвакуации людей. Под эвакуацией понимается неэкстренный выход людей из помещения, $\mu = 0$.

Пример 1. Эвакуация одного человека.

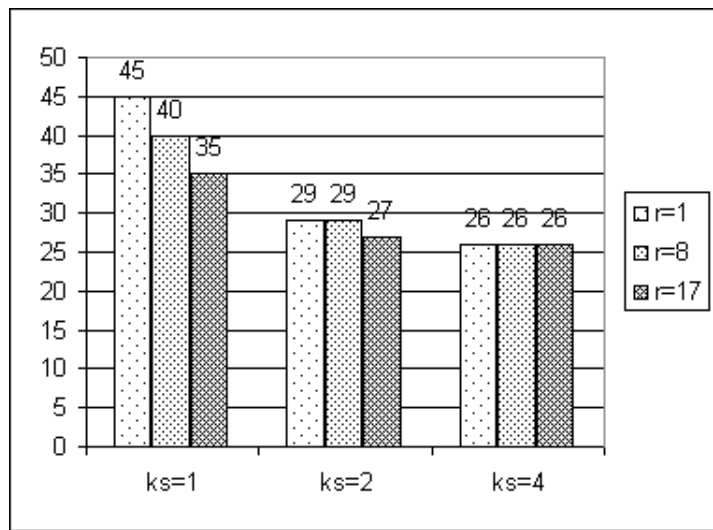


Рис. 2. Наиболее вероятное время выхода T_{m_0} для одного человека при различных параметрах k_S и r

Рассматривается комната $6,8 \times 6,8$ м (17×17 клеток) с выходом $0,8$ м, расположенным посередине правой стены. Частица располагается в левом нижнем углу. Для такой геометрии пространства и такого расположения частицы минимальное время эвакуации равно 26 шагам. Исследовалось время эвакуации и траектории движения при различных параметрах модели k_S и r . Результаты по 500 наблюдениям представлены на рис. 2 и 3. Напомним, что при $r = 1$ представленная модель соответствует базовой FF-модели [4].

Из рис. 2 видно, что при малом $k_S = 1$ наиболее вероятное время эвакуации T_{m_0} очень чувствительно к изменению r . При увеличении k_S радиус видимости перестает оказывать влияние на время, и при $k_S = 4$ наиболее вероятное время покидания комнаты равно минимальному для любого r . Т.е. увеличение k_S минимизирует время эвакуации, даже без увеличения радиуса видимости. Но при увеличении r становится более естественным путь, который выбирают частицы: траектории более близки к линии, соединяющей начальную точку и выход (рис. 3f). Это позволяет утверждать, что введение данного параметра обоснованно с точки зрения улучшения индивидуальной динамики по сравнению с базовой моделью.

Рис. 3а, 3б, 3с можно интерпретировать как движение в темноте. Минимальное значение параметров соответствует почти случайному блужданию «на ощупь». Максимальное значение k_S при минимальном радиусе видимости соответствует ситуации, когда человек «знает, хочет, но не видит, куда идти», (движение в темноте в хорошо знакомой комнате). Увеличение k_S приводит к более направленной эвакуации.

Другой крайний случай ($r = 17$, $k_S = 4$) соответствует ситуации «знаю, хочу и вижу, куда идти».

Пример 2. Эвакуация большого количества человек.

Рассматривается комната 16×16 м (40×40 клеток) с выходом $0,8$ м. В начальный момент времени в ней случайным образом располагалось 300 человек. На рис. 4 представлены типичные стадии эвакуации при различных параметрах k_S и r . Видно, что динамика раз-

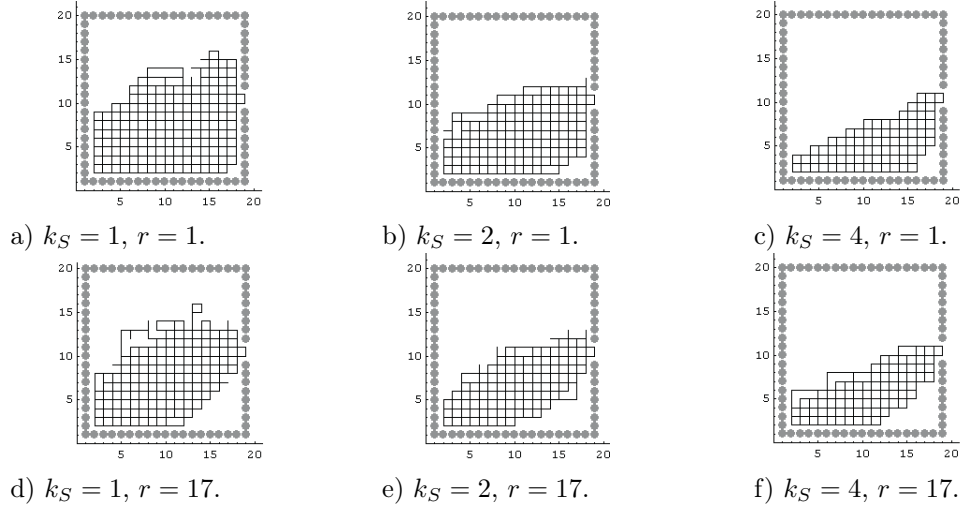


Рис. 3. Траектории выхода для одного человека при различных параметрах k_S и r по 500 наблюдениям

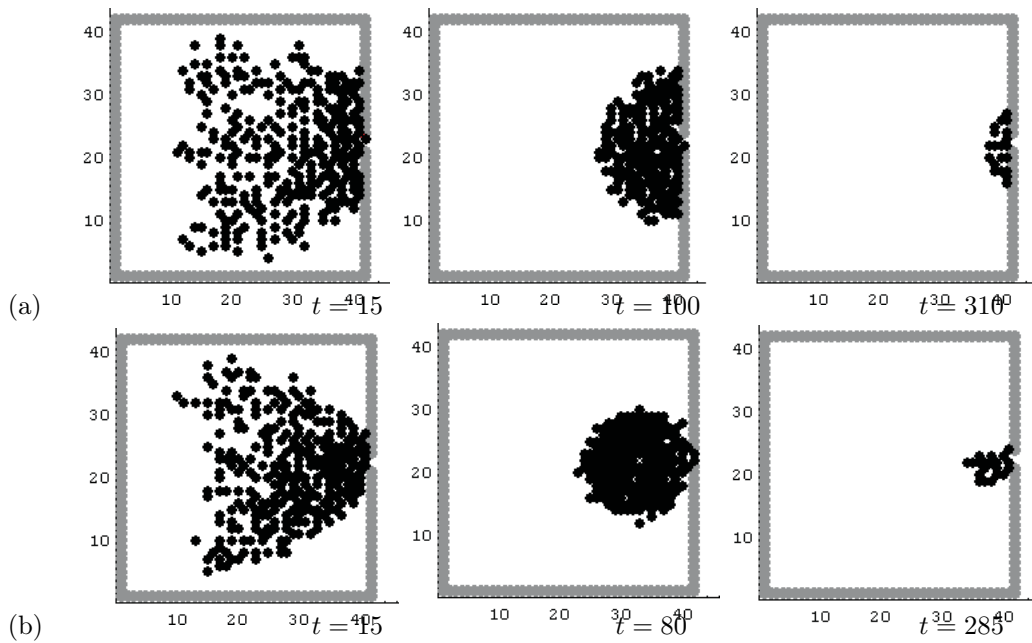


Рис. 4. Стадии эвакуации для 300 человек, $k_S = 3$. (a) $r = 1$, общее время выхода $T_{tot}^{3,1} = 336$.
 (b) $r = 40$, общее время выхода $T_{tot}^{3,40} = 317$

личается при $r = 1$ и $r = 40$. Причина этого явления кроется в том, что большое значение параметра r вынуждает частицы «отталкиваться» от стен и, вообще говоря, придерживаться кратчайшего пути до выхода. И если в других случаях это желаемый эффект, то подобное поведение вблизи выхода при коллективном движении дает приведенный эффект и должно быть редуцировано (поскольку человеку свойственно адаптировать свою стратегию движения в зависимости от текущей ситуации). Этот факт наводит на мысль о пространственной адаптации параметра r . Для помещения с простой геометрией (состоящего из одной комнаты без препятствий) это может быть реализовано введением множителя $\frac{S_{ij}}{\max S_{ij}}$, тогда $\tilde{r} = \left[r \frac{S_{ij}}{\max S_{ij}} \right]$. Для более сложных помещений требуется другой подход.

Заслуживает внимания сравнительный анализ количественных показателей коллективной динамики. На рис. 5 f_α суммарная частота выбора направления $\alpha = \{N, E, S, W, C\}$ за время эксперимента для каждой пары параметров. Литеры N, E, S, W обозначают соответствующие стороны света, C — остаться на месте.

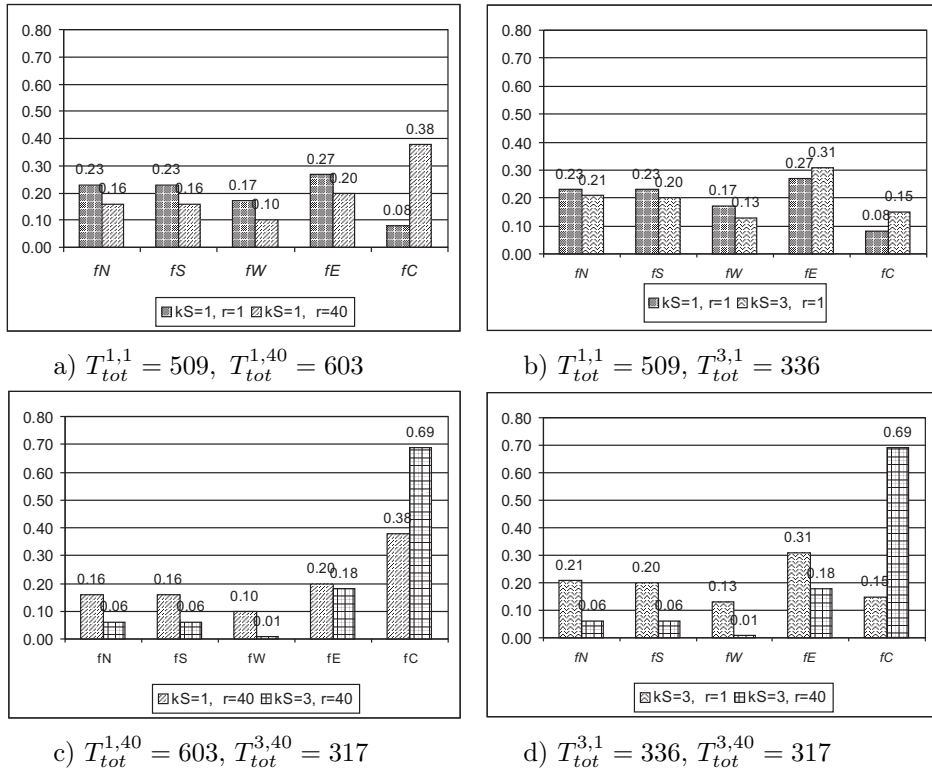


Рис. 5. Частоты выбора направлений для различных пар параметров k_S и r

Результаты, представленные на рис. 5а и рис. 5д, показывают, что увеличение параметра r (т.е. добавление «терпеливости» у частиц) при неизменном k_S ведет к значительному перераспределению частот. Причем чем больше k_S , тем более существенно изменяется динамика потока.

Наряду с этим заметим, что при несущественно разном перераспределении частот на рис. 5б и рис. 5с увеличение k_S приводит к существенному уменьшению времени эвакуации

$T_{tot}^{ks,r}$. Причем время эвакуации, как и в предыдущем примере, можно считать не зависящим от параметра r .

4. Обсуждение

Отметим следующие особенности представленной модели. Формула вычисления переходных вероятностей (2) такова, что наибольший вес имеет множитель $e^{k_S \Delta S_{ij}}$, отвечающий за направленность движения. Поэтому максимальное значение вероятности преимущественно имеет направление, минимизирующее поле S . A_{ij} в этом случае еще и усиливает это значение. В результате преобладающим образом реализуется стратегия кратчайшего пути. При $r > 1$ в простых помещениях этот факт отражается лишь в образовании шароподобного облака в преддверии выхода при эвакуации большого числа людей (при малых плотностях эвакуация воспроизводится наиболее реалистичным образом) и мало сказывается на времени эвакуации. Очевидно, что при наличии поворотов на пути к выходу преобладание этой стратегии приведет к нереалистичным заторам на поворотах и, как следствие, — неадекватной оценке как самой динамики, так и времени эвакуации. В связи с этим возникает идея представления A_{ij} в виде $A_{ij} = e^{-g1(r^*, dens_{ij})} e^{-g2(r^*, r)}$ ($0 \leq g1(\cdot) \leq \text{const}$ — функция, возрастающая с ростом плотности частиц в направлении ячейки (i, j) , $0 \leq g2(\cdot) \leq \text{const}$ — функция, возрастающая с уменьшением расстояния до стены в направлении ячейки (i, j)), что «поставит на одни весы» обе стратегии — кратчайшего времени и кратчайшего пути.

Также отметим, что предлагаемый алгоритм предполагает разыгрывание сложных сценариев, когда вовлеченные люди имеют разные конечные цели в процессе эвакуации. Такие ситуации, например, свойственны большим развлекательным и торговым центрам. Это позволит изучать встречные, пересекающиеся, неупорядоченные потоки с целью наилучшей организации пространства и времени эвакуации.

Заключение

Итак, в работе рассмотрена дискретная модель передвижения человека в условиях ограниченного пространства. В рамках этой модели может имитироваться характер движения от случайного до направленного, осуществляется анализ окружающей обстановки и реализуется стратегия «терпеливого человека». В целом в нормальном режиме эвакуации индивидуальная и коллективная динамика улучшаются в сравнении с базовыми моделями. Было исследовано влияние параметров модели на время эвакуации и на характер движения, проведено сравнение с базовой моделью, намечены шаги по совершенствованию и унификации модели.

Список литературы

- [1] D.Helbing, I.Farkas, T.Vicsek, Simulating dynamical features of escape panic, *Nature*, **407**(2000), 487-490.
- [2] М.Е.Степанцов, Математическая модель направленного движения группы людей, *Математическое моделирование*, **16**(2004), no. 3, 43-49.

- [3] A.Kirchner, A.Schadschneider, Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics, *Physica*, **312**(2002), 260-276.
- [4] K.Nishinari, A.Kirchner, A.Namazi, A.Schadschneider, Extended floor field CA model for evacuation dynamics, *IEICE Trans.Inf., & Syst.* E87-D., 2004, 726.
- [5] D.Helbing, Traffic related self-driven many-particle system, *Rev. Mod. Phys.*, **73**(2001), no. 4.
- [6] Т.Тоффоли,Н.Марголуc, Машины клеточных автоматов, М., Мир, 1991.
- [7] E.Kirik, T.Yurgel'yan, D.Krouglov. An intelligent floor field cellular automation model for pedestrian dynamics. *Proceedings of The Summer Computer Simulation Conference 2007*, The Mission Valley Marriott San Diego, California, 2007, 1031–1036.
- [8] K.Nishinari, A.Kirchner, A.Schadschneider, Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics, e-print cond-mat/0209383.

On Discrete People Movement Model with Environment Analysis

Ekatherina S.Kirik
Dmitry V.Krouglov
Tatyana B.Yurgel'yan

A stochastic cellular automata (CA) model simulating pedestrian dynamics is presented. The obtained model simulates people movement from random style to directed. It provides an opportunity for pedestrian's environment analysis and realization of «patient people» strategy. A regular evacuation process is reproduced and investigated by means of the presented model.

Keywords: cellular automata, transition probabilities, pedestrian dynamics modelling.