

УДК 51.77

О чувствительности математической модели движения людей SIGMA.CA к геометрии пути

Татьяна Б. Юргельян*

Институт математики,
Сибирский федеральный университет,
Свободный, 79, Красноярск, 660041,

Россия

Екатерина С. Кирик†

Институт вычислительного моделирования СО РАН,
Академгородок, 50/44, Красноярск, 660036,

Россия

Дмитрий В. Круглов

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН,
Академгородок, 50/28, Красноярск, 660036,

Россия

Получена 18.12.2010, окончательный вариант 25.02.2011, принята к печати 10.04.2011

В статье приводятся результаты исследования дискретной стохастической модели движения людей SIGMA.CA. Рассматривались пространственные ситуации, в которых людьми используются различные стратегии: самый короткий путь и самый быстрый путь. Исследовались влияние вида пути на динамику модели, чувствительность модели к виду пути. Приводятся зависимости времени эвакуации и динамики движения виртуальных частиц в зависимости от параметров модели и от начальной плотности людей.

Ключевые слова: моделирование движения людей, стратегия кратчайшего пути, стратегия быстрейшего пути, время эвакуации.

Введение

В наши дни происходит множество событий, при которых большое количество людей собирается на относительно небольшой площади. Здания становятся все больше и сложнее, а большие спортивные и зрелищные мероприятия, культурные и религиозные события происходят по всему миру. Чтобы обеспечить безопасность в подобных ситуациях, необходимо понимать динамику движения людей. В этой проблеме, кроме натуральных наблюдений, могут помочь математические модели. В последние десятилетия было разработано большое количество моделей движения людей [1], но вопрос об их исследовании и области применения в большинстве случаев остается актуальным.

Движение человека обусловлено многими факторами. В [2] отмечается, что человек старается держаться на некотором расстоянии от других людей и от препятствий, причем, это расстояние уменьшается с повышением плотности людей. Также, люди предпочитают двигаться к намеченной цели по самому короткому пути и используют альтернативный путь в случае, если он более быстрый или более привлекательный. Иными словами, при движении люди используют две стратегии, назовем их «самый быстрый путь» (the shortest time

*tata_yurgel@mail.ru

†kirik@icm.krasn.ru

© Siberian Federal University. All rights reserved

strategy), БП, и «самый короткий путь» (the shortest path strategy), КП, и в зависимости от ситуации выбирают либо одну, либо другую, либо стратегии совпадают.

В работах [3, 4] описывается дискретная полевая стохастическая модель движения людей SIGMA.CA (Stochastic field Movement of Artificially intelligent people Cellular Automata model), которая может воспроизводить движение человека в соответствии с обеими стратегиями. Целью данной работы является исследование влияния вида пути на динамику модели и чувствительность модели к виду пути.

1. Предмет исследования

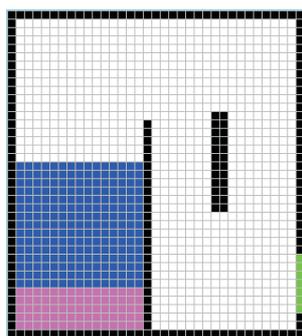
Как уже отмечалось, люди при движении используют две стратегии. При построении модели движения людей используют определенный формализм: рассматривают своего рода вложенность стратегий. Стратегия КП является частным случаем стратегии БП. Обе стратегии совпадают, если самый короткий путь свободен. Стратегия БП реализуется, если самый короткий путь занят людьми.

Примером, где стратегии совпадают, является пространство с самой простой геометрией: длинная комната или коридор, рис. 1. Для таких примеров большинство моделей (в том числе дискретные стохастические модели [5]) дают удовлетворительные результаты: передвижение людей выглядит реалистично, зависимость изменения величины потока от плотности людей в области выполняется [1].

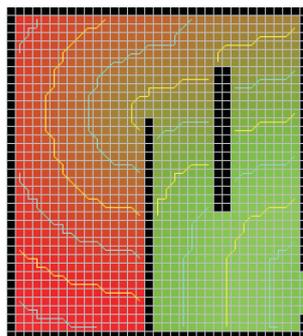


Рис. 1. Пример, где две стратегии совпадают. Длинная комната 50 м x 2 м

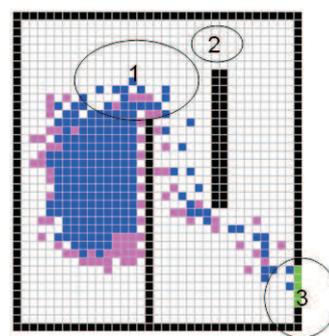
При более сложной геометрии пространства использование стратегий зависит от ситуации. Так для примера на рис. 2в возможно более эффективное использование пространства на повороте (1), использование обходного пути (2), эффективное использование ширины дверного проема (3), что не может быть реализовано только при помощи стратегии КП.



(а) Начальное положение частиц



(б) Поле S — «карта» местности



(в) 1, 2, 3 — проблемные зоны

Рис. 2. Пример, где использование стратегий зависит от пространственной и временной ситуации

Представленные примеры показывают, что стратегия движения не является инвариантной по пространству и по времени. Рассматриваемая модель движения людей SIGMA.CA

является адаптируемой к текущей ситуации: реализованы средства автоматической идентификации некоторых "сигналов" к смене стратегии. В части случаев это дает правдоподобную динамику движения. Но существуют такие расчетные случаи, когда инструментарий модели не позволяет адекватным образом реагировать на текущую ситуацию.

Поэтому предметом исследования является влияние вида пути на динамику модели и анализ чувствительности динамики модели SIGMA.CA к виду пути. В качестве тестовых примеров рассмотрены оба приведенных случая (рис. 1, рис. 2а). Время эвакуации и собственно динамика модели являются показателями для анализа чувствительности модели.

2. Краткое описание модели

Подробно модель представлена в [3, 4], здесь укажем лишь основные положения.

Известны геометрия рассматриваемого пространства и начальное расположение частиц (людей) в этом пространстве. Пространство представляет собой плоскость, разбитую на ячейки 40×40 , которые могут быть либо свободными, либо занятыми только одной частицей (человеком). В ячейках также могут располагаться стены и другие недвижимые препятствия.

Целью передвижения частиц является ближайший выход, который находится с помощью поля S [5]. Оно отражает кратчайшее расстояние до ближайшего выхода (рис. 2б) и его можно интерпретировать как «карту» местности. Каждой ячейке пространства с координатами (i, j) соответствует свое значение поля S_{ij} . На каждом временном шаге частица может переместиться в одну из четырех свободных соседних ячеек (обозначим их UP (вверх) или $(i, j + 1)$, DN (вниз) / $(i, j - 1)$, LF (влево) / $(i - 1, j)$, RT (вправо) / $(i + 1, j)$) или остаться на месте (NO / (i, j)). Направление частицы предполагается случайным и определяется на основе вероятностей переходов в каждом направлении для каждой частицы в каждый дискретный шаг времени и определенным набором правил переходов частиц.

Правила переходов следующие: сначала вычисляется поле S , затем происходит расчет вероятностей переходов и выбор направления для передвижения. Если две или более частицы претендуют на одну и ту же ячейку, то вступает в силу процедура разрешения конфликтов, т.е. либо выбирается только одна частица для перемещения, а остальные остаются на прежних местах, либо все частицы, участвующие в конфликте, остаются на прежних местах. Если клетка в выбранном направлении занята, то частице предоставляется возможность либо выбрать другое направление для перемещения, либо остаться на прежнем месте. После того, как выбрано окончательное направление, следует перемещение. Правила применяются ко всем частицам в один и тот же момент времени.

Приведем пример формулы переходных вероятностей, например, в направлении LF (для остальных направлений аналогично, кроме направления «NO», так как вероятность остаться на месте в явном виде не вычисляется):

$$p_{i-1,j} = \frac{\hat{p}_{i-1,j}}{Norm_{ij}} = Norm_{ij}^{-1} \exp[k_S \Delta S_{i-1,j} - k_P D_{i-1,j}(r_{i-1,j}^* - r) - k_W (1 - \frac{r_{i-1,j}^*}{r}) \tilde{I}(\Delta S_{i-1,j} - \max \Delta S_{ij})] (1 - w_{i-1,j}), \quad (1)$$

где i, j — текущие координаты частицы, $Norm_{ij} = \hat{p}_{i-1,j} + \hat{p}_{i+1,j} + \hat{p}_{i,j-1} + \hat{p}_{i,j+1}$ — нормализатор, $r_{i-1,j}^* \leq r$ — расстояние до ближайшего препятствия в рассматриваемом направлении, $\Delta S_{i-1,j} = S_{i,j} - S_{i-1,j}$, $\max \Delta S_{ij} = \{\Delta S_{i+1,j}, \Delta S_{i,j+1}, \Delta S_{i-1,j}, \Delta S_{i,j-1}\}$. $\tilde{I}(\cdot)$ — единичная функция:

$$\tilde{I}(\cdot) = \begin{cases} 0, & \text{если } (\cdot) < 0; \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

$D_{i-1,j}(r_{i-1,j}^*) \in [0, 1]$ — плотность частиц в направлении клетки $(i-1, j)$ на расстоянии $r_{i-1,j}^*$. Чтобы оценить плотность частиц, использовалась идея ядерной оценки плотности Розенבלата – Парзена [6]:

$$D_{i-1,j}(r_{i-1,j}^*) = \frac{\sum_{m=1}^{r_{i-1,j}^*} \Phi\left(\frac{m}{C(r_{i-1,j}^*)}\right) f_{i-m,j}}{r_{i-1,j}^*},$$

где

$$C(r_{i-1,j}^*) = \frac{r_{i-1,j}^* + 1}{\sqrt{5}}, \quad \Phi(z) = \begin{cases} 1.5 - 0.3(z)^2, & |z| \leq \sqrt{5}; \\ 0, & |z| > \sqrt{5}. \end{cases}$$

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

Более подробно остановимся на параметрах модели:

- $r > 0$ параметр, определяющий максимальное расстояние, в пределах которого окружающая обстановка и другие частицы влияют на движение, радиус видимости. Расстояние измеряется в клетках, т.е. r — целое число. При $r = 1$ берутся в рассмотрение только соседние ячейки;
- $k_S > 0$ — параметр чувствительности поля S , можно интерпретировать как степень знания «карты» местности, отражает меру направленности движения частиц; чем выше, тем более направленно частицы двигаются к выходу;
- $k_P \geq k_S$ — параметр чувствительности плотности частиц в пределах радиуса видимости, отвечает за психологическое отталкивание между людьми, параметр разуплотненности. Чем выше k_P , тем в большей степени реализуется стратегия самого быстрого пути;
- $k_W \geq k_S$ — параметр чувствительности препятствий, определяющий степень влияния стен и других недвижимых препятствий.

Таким образом, при вычислении переходных вероятностей для каждого направления учитывается поле S , плотность частиц в данном направлении на расстоянии r , близость стен и других препятствий. С помощью параметров можно регулировать использование стратегий и динамику движения.

Направленное движение людей достигается за счет увеличения параметра k_S (при малых значениях k_S реализуется свободное блуждание). Параметр k_P отвечает за реализацию стратегии БП — чем больше этот параметр, тем в большей степени (большем количестве расчетных ситуаций) реализуется стратегия. С помощью значений параметров можно регулировать использование стратегий и, как следствие, динамику движения.

Вложенность стратегий движения людей накладывает определенные правила (условия) на задание параметров модели. Если требуется реализация только одной стратегии КП, тогда задаются такие значения параметров, что $k_S \geq k_P$. В этом случае в процессе расчетов, даже при благоприятных условиях, стратегия БП не может быть реализована. Это достигается за счет того, что в степени экспоненты в формуле вероятности слагаемое, отвечающее, за реализацию стратегии БП, имеет незначительный вес.

Если требуется реализация обеих стратегий, тогда значения параметров следует задавать так, что $k_S \ll k_P$. В этом случае, если кратчайший путь свободен, частица двигается по этому пути. Если он занят людьми, тогда реализуется эффект выталкивания частицы в

свободные области, и частица предпринимает обходной маневр, соответствующий стратегии БП. Однако в действительности этот "сигнал" имеет неоднозначное значение, и поэтому его интерпретация как начало поиска обходного пути бывает ошибочна. Например, при образовании затора в конфигурации "бутылочное горлышко" поиск обходного пути не требуется. Как следствие, возникает задача об исследовании влияния параметров на динамику модели и время эвакуации в различных пространственных ситуациях в зависимости от плотности людей.

3. Исследование динамики движения людей в различных пространственных ситуациях

Рассматривались два примера, описанные выше: длинная комната, рис. 1 (пример 1) и комната с поворотами и препятствиями, рис. 2 (пример 2). В начальный момент времени частицы были равномерно распределены по пространству с начальными плотностями $\rho_0 = \{0,04; 0,16; 0,32; 0,4; 0,48; 0,56; 0,64; 0,8; 0,92\}$. В примере 1 частицы могли располагаться по всему пространству, в примере 2 на участке, показанном на рис. 2а.

Для каждой плотности была проведена серия экспериментов[‡] (от 100 до 500), измерялись: время выхода из помещения $T_{\text{эвак}}$ (в шагах), частота выбора каждого из возможных направлений. По полученным данным были вычислены вероятностные характеристики распределения времени эвакуации: гистограммы и полигоны частот для времени эвакуации, оценки математического ожидания T_{cp} и дисперсии D_T .

Во всех экспериментах параметры k_S и k_W были фиксированными и $k_S = k_W = 4$ (параметр $k_S = 4$ соответствует направленному движению частиц), параметры k_P и r изменялись: $k_P \in [1, 20]$ и $r \in [1, 20]$. Среди всего множества комбинаций параметров здесь рассмотрим самые интересные: $k_P = 2$ и $r = 1$, $k_P = 2$ и $r = 10$, $k_P = 12$ и $r = 1$, $k_P = 12$ и $r = 10$. Отметим, что $r = 1$ можно интерпретировать, как движение в темноте на ощупь.

Поясним значения параметров: $r = 1$ означает, что учитывается состояние только соседних ячеек (занята/свободна); при $r = 10$ в каждом направлении просматривается 10 ячеек; $k_P = 2$ — минимальная разуплотненность частиц, реализация стратегии БП минимизирована; при $k_P = 12$, наоборот, увеличивается психологическое отталкивание между частицами, появляется "желание" максимально разуплотниться и возможность использовать стратегию БП.

Пример 1. Комната в виде длинного прямого коридора

Время эвакуации

Начнем исследование модели с рассмотрения времени эвакуации, так как оно является одним из наиболее важных и практически значимых применений моделей движения людей. В данном исследовании время эвакуации является показателем правдоподобности воспроизводимого моделью процесса эвакуации. Причем отметим, что речь идет об адекватности стратегии движения и вида пути.

На рис. 3 представлено среднее время эвакуации T_{cp} и дисперсия D_T в зависимости от параметров модели и от начальной плотности ρ_0 . Очевидно, что с ростом плотности ρ_0 возрастает и время эвакуации T_{cp} . Отметим, что минимальное время эвакуации из комнаты длиной 50 метров — 125 шагов (так как 50 м = 125 клеток), минимальное время при максимальной начальной плотности — 250 шагов. Но в силу стохастического характера модели

[‡]Эксперименты проводились: для примера 1 — аспирантом ИМ СФУ Т.Б.Юргельян, для примера 2 — студенткой ИМ СФУ Е.А.Васильевой, программный комплекс, реализующий модель SIGMA.CA, разработан Д.В.Кругловым

добавляются незначительные флуктуации относительно целевого направления, и экспериментальные значения T_{cp} имеют большие значения.

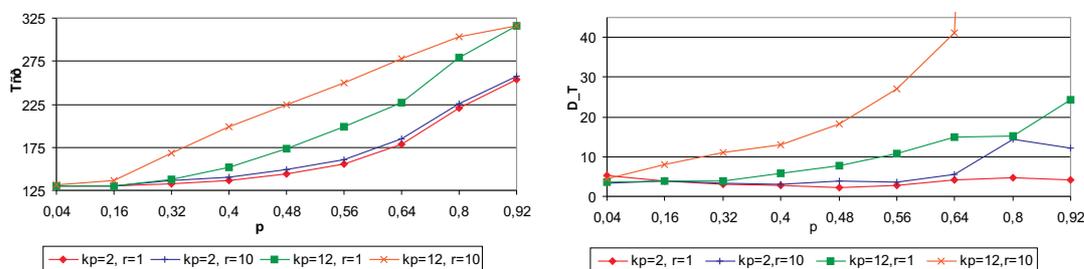


Рис. 3. (а) Среднее время эвакуации; (б) дисперсия времени эвакуации для примера 1

Анализ графиков (рис. 3) показывает, что на плотностях 0,04–0,32 значения T_{cp} и D_T практически совпадают для различных наборов параметров (кроме пары $k_P = 12$, $r = 10$), т.е. при таких плотностях параметры модели не оказывают существенного влияния на динамику модели в данном примере.

При $k_P = 2$ модель не чувствительна к росту радиуса видимости: кривые среднего времени эвакуации ведут себя одинаково и практически не отличаются друг от друга, увеличивается лишь дисперсия для $r = 10$ при $\rho_0 = 0,8$ и $0,92$. Для пары $k_P = 2$, $r = 1$ среднее время эвакуации имеет минимальные значения по сравнению с другими наборами параметров для соответствующих плотностей, дисперсия не изменяется с увеличением плотности.

При $k_P = 12$ изменение r более существенно влияет на T_{cp} и D_T , начиная с малых плотностей ($\rho_0 \geq 0,16$). Набор параметров $k_P = 12$, $r = 10$ отличается от остальных максимальными значениями и почти линейной зависимостью T_{cp} от ρ_0 и самыми большими значениями D_T (особенно при плотностях 0,8 и 0,92, где $D_T = 344,61$ и $687,26$ соответственно). Максимальное расхождение с минимальным значением T_{cp} (для $\rho_0 = 0,56$) достигает 1,6 раза.

В целом, увеличение k_P при фиксированном r больше влияет на T_{cp} и D_T , чем увеличение r при фиксированном k_P . Распределение времени эвакуации (см. рис. 4) имеет симметричный вид и малое значение дисперсии. Это свидетельствует о том, что модель дает предсказуемые результаты.

Существенное увеличение дисперсии с ростом плотности в случае пары $k_P = 12$, $r = 10$ говорит о том, что модель дает результат скорее случайный, чем предсказуемый. Это знак того, что имеется рассогласование между динамикой модели и стратегией, которая предполагается данным видом пути. И проявляется тем ярче, чем выше плотность частиц. Более подробное объяснение дает анализ динамики передвижения частиц.

Динамика движения

Для исследования динамики модели был выбран такой показатель, как частоты выбора каждого из направлений, вычисленные по серии экспериментов:

$$f_\alpha = \frac{\sum_{i=1}^q N_i^\alpha}{\sum_{\alpha \in \{RT, LF, UP, DN, NO\}} \sum_{i=1}^q N_i^\alpha},$$

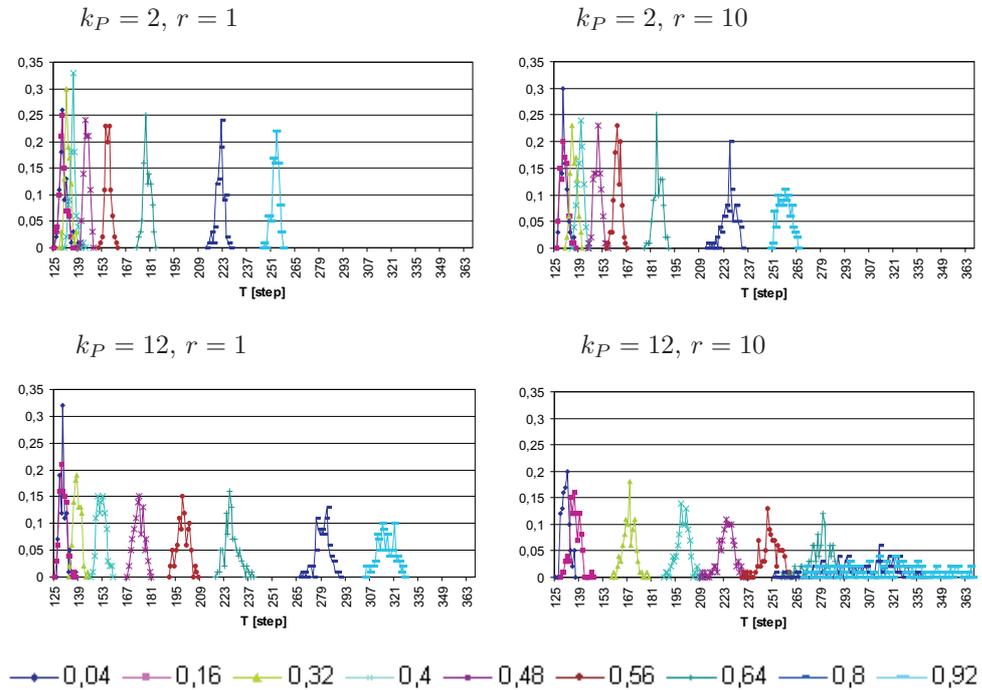


Рис. 4. Распределение времени эвакуации: полигоны частот для примера 1

где q — число экспериментов в серии, N_i^α — количество сдвигов в направлении α в i -м эксперименте.

На рис. 5 показаны диаграммы частот выбора направлений в зависимости от ρ_0 по группам параметров. Графики имеют характерные особенности для всех наборов параметров: преобладает частота «RT», так как в этом направлении находится выход; частота "остаться на прежнем месте", «NO», с определенного значения плотности начинает преобладать над частотами направлений «UP», «DN» и «LF». Это происходит в силу того, что с увеличением плотности увеличивается число частиц, у которых нет возможности сместиться на расчетном шаге, поскольку отсутствуют свободные соседние ячейки. Частоты «UP» и «DN» совпадают для каждого набора параметров в силу симметричности относительно целевого направления; частота «LF» минимальна, так как соответствует обратному от выхода направлению, но не равна нулю в силу стохастичности модели (что адекватным образом соответствует реальному явлению: движение людей – процесс случайный, но в общей массе предсказуемый). Рис. 5 показывает, что исследуемые пары параметров делятся на две группы.

В первую группу входят пары параметров $k_P = 2, r = 1$ и $k_P = 2, r = 10$. Для этих пар практически совпадают T_{cp} , D_T и полигоны частот, особенно на малых и средних плотностях. Практически совпадают и значения частот направлений с изменением ρ_0 . Объяснение такого согласования следующее. С одной стороны, этими параметрами предусмотрено использование только стратегии КП: частицы двигаются преимущественно к выходу, а при средних и больших плотностях, когда нет возможности сделать шаг вперед (в сторону выхода), предпочитают оставаться на месте и ждать, пока желаемое направление освободится, а не метаться по сторонам (причем, при малых k_P радиус видимости мало влияет на динамику в этом примере). С другой — геометрия пути в примере 1 предполагает лишь

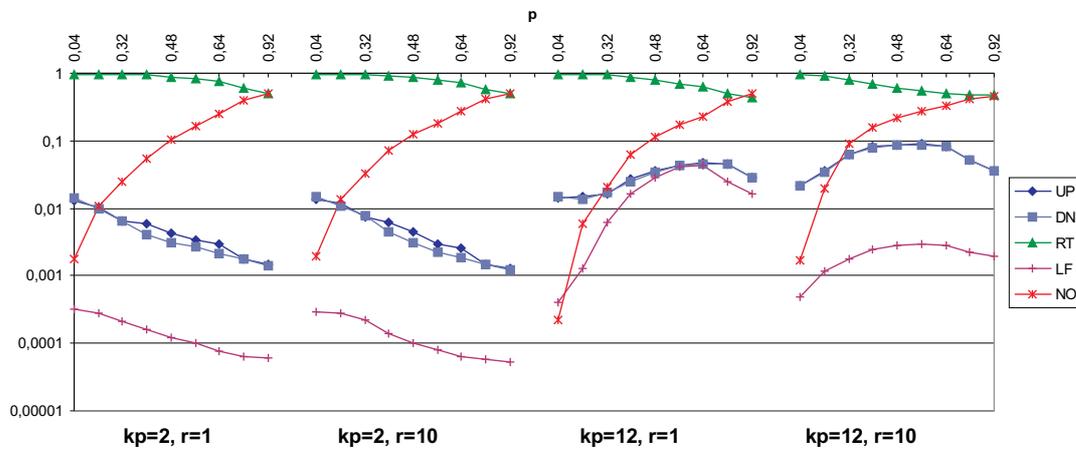


Рис. 5. Диаграмма частот выбора направлений в зависимости от плотности и от параметров для примера 1

использование стратегии КП. Совпадение этих условий и дает малое значение дисперсии (практически не возрастающее с ростом плотности), минимальное время эвакуации (среди всех исследованных наборов параметров, не только рассмотренных в статье).

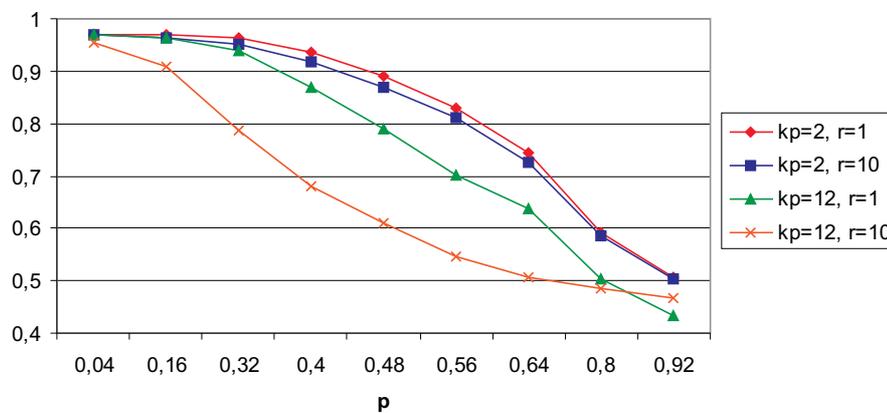


Рис. 6. Диаграмма частоты направления «RT» в зависимости от плотности и от параметров для примера 1

Вторую группу параметров составляют пары $k_P = 12, r = 1$ и $k_P = 12, r = 10$. Общим с предыдущей парой является совпадение частот направлений «UP» и «DN» с изменением плотности, однако характер кривых меняется: наблюдается в целом рост значений этих частот с ростом плотности. В контраст к первой группе растет доля противоположного от выхода направления «LF», а доля направления «RT» уменьшается (рис. 6) с ростом плотности. Как результат – в целом направленность движения к выходу снижается. Однако заметим, что на малых плотностях ($\rho_0 \leq 0,16$) диаграммы частот направлений для обеих

групп близки.

Такая динамика объясняется значением параметра k_P . Как было сказано выше, увеличение параметра k_P относительно значения параметра k_S позволяет воспроизводить стратегию БП. И чем больше разница, тем в большей степени стратегия БП реализуется, в данном случае $k_P = 12$, $k_S = 4$. В то же время геометрия пути в примере 1 соответствует только стратегии КП. Это рассогласование и приводит к увеличению среднего времени эвакуации и дисперсии с ростом плотности.

Обратим внимание на взаимное влияние параметров модели. Рис. 3 и 5 показывают, что для данного примера при малом параметре k_P радиус видимости r мало влияет на время эвакуации и на динамику движения. При больших k_P изменение r существенно как для динамики, так и для времени эвакуации на средних и высоких плотностях. Увеличение k_P оказывает большее влияние на время эвакуации T_{cp} и дисперсию D_T , чем увеличение r .

Таким образом, представленные результаты для примера 1 показывают, что при малых плотностях параметры модели практически не оказывают влияния на динамику процесса. С ростом плотности рассогласованность стратегий, предполагаемых видом пути и моделью (за счет задания значений параметрам), ведет к увеличению времени эвакуации и дисперсии.

Пример 2. Комната с поворотами и препятствиями

Напомним, что в данном примере, рисунок 2в, предполагается использование обеих стратегий КП и БП в зависимости от ситуации. Так, возможно эффективное использование пространства на повороте (1), использование обходного пути (2), эффективное использование ширины дверного проема (3).

Время эвакуации

Время эвакуации T_{cp} (рис. 7) принимает минимальные значения для пары $k_P = 12$, $r = 10$, максимальные — для пары $k_P = 2$, $r = 10$. Значения T_{cp} совпадают только при минимальной начальной плотности $\rho_0 = 0,04$ для всех пар исследуемых параметров. С ростом плотности значения T_{cp} начинают различаться, разница достигает 2,28 раза при максимальной плотности.

Среди всех выделяется пара $k_P = 12$, $r = 10$, для которой наблюдается инвариантность дисперсии от плотности. Наиболее ярко выражено увеличение дисперсии для пары $k_P = 12$, $r = 1$. Это обусловлено спецификой взаимного влияния параметров k_P и r на участках пути, где предполагается использование обеих стратегий КП и БП: малый радиус видимости при большом $k_P \gg k_S$ дает своего рода имитацию движения на ощупь в темноте методом «проб и ошибок».

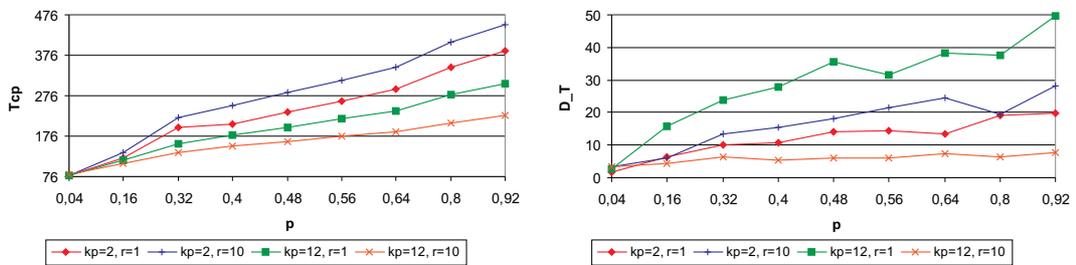


Рис. 7. (а) Среднее время эвакуации; (б) дисперсия времени эвакуации для примера 2

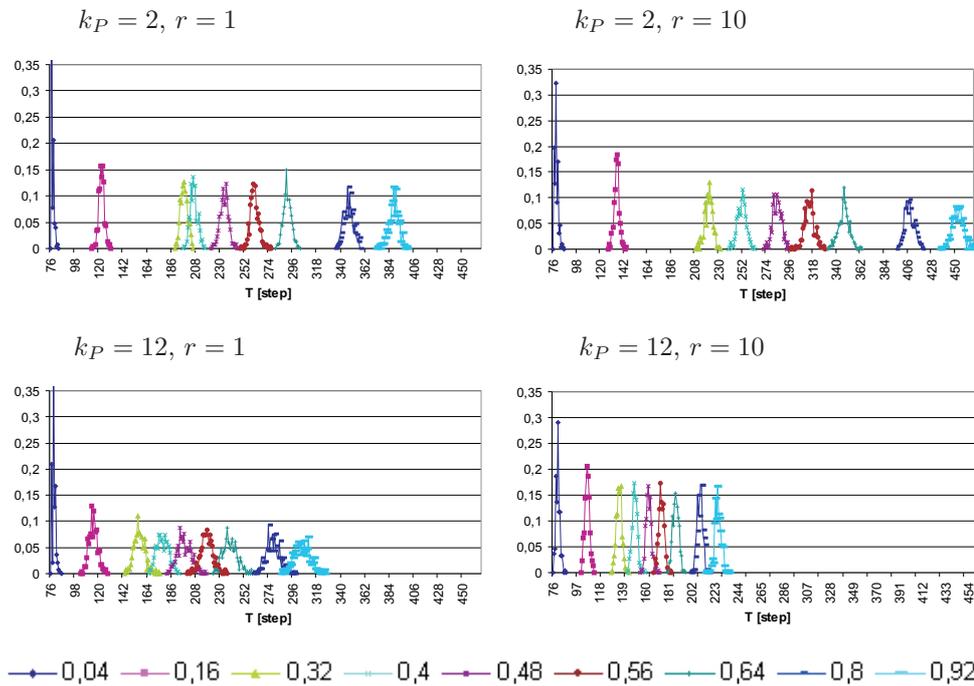


Рис. 8. Распределение времени эвакуации: полигоны частот для примера 2

Распределение времени эвакуации имеет симметричный вид и относительно малую дисперсию, форма распределения практически не меняется с изменением плотности (рис. 8). Это свидетельствует о том, что модель дает предсказуемые результаты.

В целом вычислительный эксперимент для этого примера можно охарактеризовать чувствительностью среднего времени эвакуации к изменению параметров модели.

Динамика движения

Геометрия данного примера не предусматривает одного целевого направления. Частицы должны сначала подняться вверх, затем, повернув направо, идти вниз, сдвигаясь вправо в сторону выхода (в данном случае направления рассматриваются относительно наблюдателя). Но, поскольку характеристики посчитаны единым образом, то они отражают особенности динамики модели для каждой пары параметров. Диаграмма частот представлена на рис. 9. Характерным является то, что для всех пар параметров частоты направлений «RT», «UP» и «DN» близки и имеют одинаковую тенденцию к снижению с увеличением плотности. Динамика изменения частот «NO» и «LF» с увеличением начальной плотности частиц позволяет выделить две группы параметров.

Первую группу составляют пары $k_P = 2, r = 1$ и $k_P = 2, r = 10$. Для этой группы характерно следующее. Частота «NO» возрастает с ростом плотности. И уже на малых плотностях число частиц, предпочитающих оставаться на прежнем месте на новом расчетном шаге, в несколько раз превосходит количество двигающихся частиц. С ростом плотности эта разница растет. Очень низкая доля частиц, двигающихся в направлении «LF», соответствует движению согласно стратегии КП, поскольку короткий путь до выхода не предполагает движение влево. Однако в данном случае геометрия пути такова, что стратегии КП и БП не совпадают. Как следствие, движение лишь согласно стратегии КП приводит к затору на

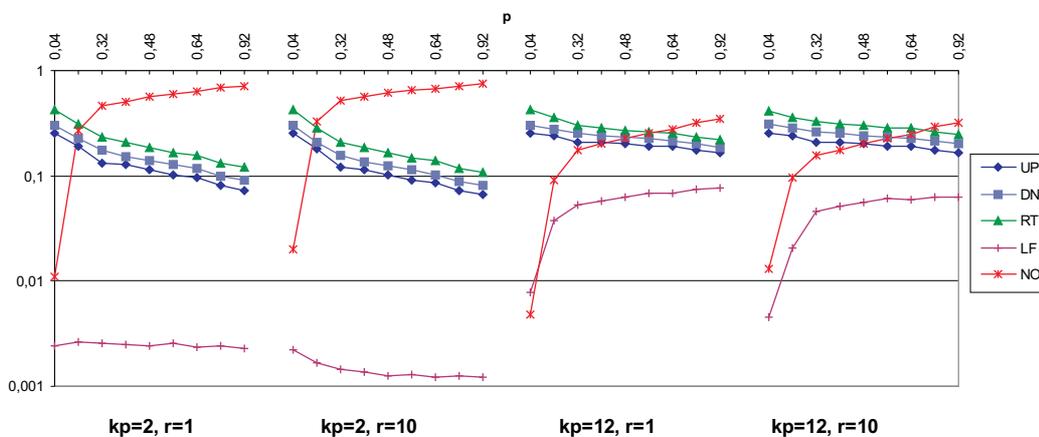


Рис. 9. Диаграмма частот выбора направлений в зависимости от плотности и от параметров для примера 2

повороте (1), обходной путь (2) не используется, ширина дверного проема (3) используется не эффективно (рис. 2в)). В подтверждение на рис. 10 приведены диаграммы интенсивности движения частиц в заданной геометрии (яркость цвета увеличивается с ростом числа частиц, побывавших в ячейке). Как результат — превышение среднего времени эвакуации на больших плотностях относительно минимального более чем в 2 раза.

Напротив, диаграммы частот для пар параметров $k_P = 12, r = 1$ и $k_P = 12, r = 10$, составляющих вторую группу, характеризуются ростом доли двигающихся влево с ростом плотности. Доля частиц, не меняющих свое положение на расчетном шаге, растет с ростом плотности, но практически не превосходит количество двигающихся вправо, вверх и вниз. Такое распределение частот направлений свидетельствует о существенной смене динамики модели в сравнении с первой группой и является следствием реализации стратегии БП, что обеспечивается параметром $k_P = 12$. Реализация стратегии БП проявляет себя в том, что частицы используют обходной путь и для этого они совершают сдвиги влево. Диаграммы интенсивности движения (рис. 10) для соответствующих пар параметров показывают бо-

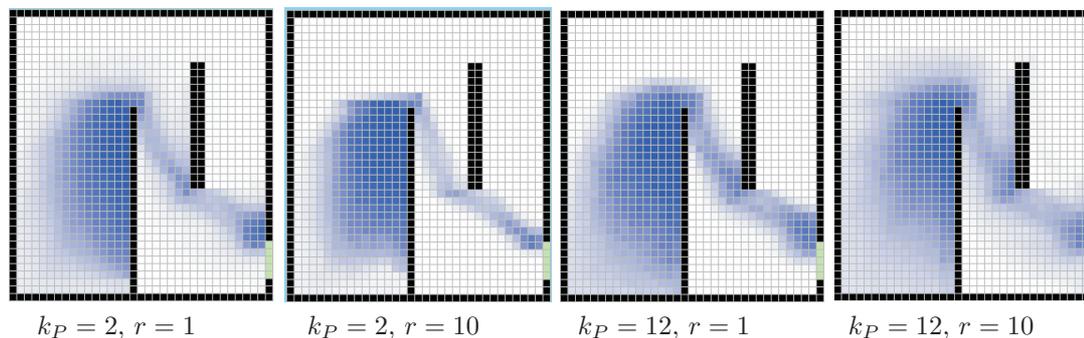


Рис. 10. Интенсивность движения для примера 2

лее эффективное использование пространства: увеличение радиуса поворота, увеличение используемой части ширины дверного проема, использование обходного пути (для пары

$k_P = 12, r = 10$). Как следствие уменьшение времени эвакуации.

О взаимном влиянии параметров модели в данном примере отметим следующее. При малых значениях $k_P \leq k_S$ радиус видимости r в меньшей степени влияет на динамику модели. Для $k_P \gg k_S$ радиус видимости r оказывает существенное влияние.

Таким образом, для данного примера время эвакуации характеризуется высокой чувствительностью к значениям параметров модели и начальной плотности частиц. Рассогласованность стратегий, предполагаемых видом пути и моделью (за счет задания значений параметров), ведет к увеличению времени эвакуации, начиная с малых плотностей.

Заключение

Сравнительный анализ результатов, полученных в численных экспериментах с примерами 1 и 2 показывает, что модель по-разному реагирует на рассогласованность стратегий, предполагаемых видом пути и моделью (что определяется значениями параметров модели).

В примере 1 разница между минимальным и максимальным значением среднего времени эвакуации $\Delta T(\rho_0) = T_{cp}^{\max}(\rho_0) - T_{cp}^{\min}(\rho_0)$ не является возрастающей функцией от плотности (рис. 3). Максимальное расхождение среднего времени эвакуации $\max \Delta T(\rho_0)$ приходится на средние значения плотности, и $\max \left\{ \frac{T_{cp}^{\max}(\rho_0)}{T_{cp}^{\min}(\rho_0)} \right\} \leq 1,6$.

В примере 2 $\Delta T(\rho_0)$ является возрастающей функцией от ρ_0 (рис. 7), $\max \Delta T(\rho_0)$ приходится на максимальное значение ρ_0 , и $\max \left\{ \frac{T_{cp}^{\max}(\rho_0)}{T_{cp}^{\min}(\rho_0)} \right\} \leq 2,02$.

В обоих примерах максимальное время эвакуации приходится на такую пару параметров, что имеет место рассогласованность стратегий, предполагаемых видом пути и моделью. В табл. 1 приведены параметры, при которых T_{cp} и D_T принимают минимальные и максимальные значения.

Таблица 1. Параметры, при которых T_{cp} и D_T принимают минимальные и максимальные значения

	T_{cp}		D_T	
	min	max	min	max
Пример 1	$k_P = 2, r = 1$	$k_P = 12, r = 10$	$k_P = 2, r = 1$	$k_P = 12, r = 10$
Пример 2	$k_P = 12, r = 10$	$k_P = 2, r = 10$	$k_P = 12, r = 10$	$k_P = 12, r = 1$

Однако в случае примера 2 время эвакуации и динамика модели в гораздо большей степени чувствительны к значениям параметров и начальной плотности. Поэтому из того, что модель, не имеющая адаптации к виду пути, на примере, предполагающем использование только стратегии КП (пример 1), дает удовлетворительный результаты (модель с параметрами $k_P = 2, r = 1$), не следует, что в областях, предполагающих использование обеих стратегий (пример 2), эта модель будет давать такой же результат.

Таким образом, данное исследование приводит как минимум к следующим выводам:

- в силу вложенности стратегий КП и БП модель движения людей по умолчанию должна предполагать реализацию обеих стратегий;
- для наиболее адекватного результата моделирования модель должна иметь инструменты автоматической адаптации параметров под ситуацию (т. е. редуцироваться до реализации только стратегии КП);

- для валидации моделей движения людей необходимо использовать геометрии пространства разного типа.

Работа выполнена при поддержке ФЦП "Пожарная безопасность в Российской Федерации на период до 2012 года", ГК №09.0708.11.014, Лаврентьевского гранта молодым ученым СО РАН 2010 года.

Список литературы

- [1] A.Schadschneider, W.Klingsch, H.Kluepfel, T.Kretz, C.Rogsch, A.Seyfried, Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications, *Encyclopedia of Complexity and System Science*, Springer, 2009.
- [2] D.Helbing, Traffic related self-driven many-particle systems, *Rev. Mod. Phys.*, **73**(2001), №4, 1067–1141.
- [3] E.Kirik, T.Yurgel'yan, D.Krouglov, The shortest time and/or the shortest path strategies in a CA FF pedestrian dynamics model, *Журн. СВУ. Сер. матем. и физ.*, **2**(2009), №3, 271–278.
- [4] E.Kirik, T.Yurgel'yan, D.Krouglov, On realizing the shortest time strategy in a CA FF pedestrian dynamics model, *Cybernetics and Systems*, **47**(2010), №9 (to appear).
- [5] A.Schadschneider, A.Seyfried., Validation of CA models of pedestrian dynamics with fundamental diagrams, *Cybernetics and System*, **40**(2009), №5, 367–389.
- [6] E.Parzen, On estimation of probability Density Function, *Ann. Math. Stat.*, **33**(1962), 1065–1076.

On Sensitivity of SIGMA.CA Pedestrian Dynamics Model to a Way Shape

Tat'yana B. Yurgel'yan
Ekaterina S. Kirik
Dmitry V. Krouglov

The SIGMA.CA pedestrian dynamics model is discussed in this paper. Results of investigation of the model presented. We focused on spatial situations when the shortest path and the shortest time strategies are used. An influence of a way shape to a model dynamics, a sensitivity of the model to the shape way are investigated. Evacuation time and dynamics of the model versus model parameters and density for two test geometries are presented.

Keywords: people dynamics model, the shortest path strategy, the shortest time strategy, evacuation time.