

А.Л. Бекларян,
А.С. Акопов

Национальный
исследовательский
университет «Высшая
школа экономики»

АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ТОЛПЫ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Введение

Неотъемлемой составляющей жизнедеятельности человека, особенно в крупных городах, является его пребывание в местах большого скопления других людей: пользование общественным транспортом, проведение культурно-массовых мероприятий, митингов и другие эпизоды повседневной жизни. Отдельно стоит отметить проблему эвакуации людей из зданий в чрезвычайных ситуациях (ЧС).

Очевидно, что проведение реальных экспериментов в рамках данной задачи требует огромного финансирования и сопряжено с большими организационными сложностями. Отсюда возникает необходимость математического моделирования описанных процессов с целью определения как наилучшей геометрии помещений, так и возникновения устойчивых групп скоплений, что позволит максимально эффективно, с точки зрения количества спасенных людей, выстроить процесс ликвидации ЧС.

Анализ существующих моделей

Несмотря на высокий интерес к проблематике, долгое время основные работы по данной теме были посвящены психологическим и социальным аспектам вопроса. Например, в работе [Mintz, 1951] детально описаны условия и причины возникновения паники, которые сводятся к доминированию коллективного бессознательного как основного фактора. Таким образом, солидная часть исследователей рассматривает толпу с фрейдистской точки зрения, основанной на гипотезе, что люди как часть толпы действуют иначе, чем люди как индивиды [Лебон, 2011; Фрейд, 2013; Юнг, 2012]. Совокупность разумов членов группы синергируются в некий коллективный разум. Соответственно и предлагаемые решения проблемы возникновения паники также основаны на таком подходе [Андреева, 2001], который мы назовем *наивным*.

На фоне описанных исследований изучение толпы с привлечением сложных математических моделей началось сравнительно недавно. Здесь стоит отметить работы пионера в этой области — Дирка Хелбинга. В его работе 2000 г., опубликованной в журнале *Nature* [Helbing et al., 2000], впервые удалось воспроизвести ряд характерных для толпы явлений, таких как образование пробок, вовлечение новых людей в панику и др., с помощью математического моделирования. В основе этой работы лежала идея применения к толпе людей методов молекулярной динамики, где психологические и социальные факторы рассматриваются как потенциалы взаимодействия молекул-людей [Helbing, Molnar, 1995]. Такой подход будем называть *молекулярным*. На основе модели Хелбинга был построен ряд других моделей [Аптуков, Брацун, 2009; Кирик, Круглов, Юргельян, 2008; Antonini et al., 2006; Yu, Johansson, 2007], рассматривающий различные аспекты возможных усложнений системы взаимодействий. Правда, основная часть моделей основывается на двухчастичном взаимодействии и игнорирует тот факт, что в определенной точке пространства сталкиваются трое и более людей. Тем не менее в работе [Moussaida et al., 2011] была рассмотрена модель многочастичного взаимодействия, которая привела к появлению модельного эффекта турбулентности толпы, который не раз был зарегистрирован в реальных ситуациях. Здесь стоит упомянуть работы группы российских ученых, Д.А. Брацуна [Аптуков, Брацун, Люшнин, 2013; Bratsun et al., 2013] и его коллег, ставящие своей целью создание агентной модели поведения толпы на основе моделей Хелбинга. Отличительной особенностью моделей Брацуна является сложность геометрии пространства и формирование агентом плана выхода из многоуровневого разветвленного помещения. К сожалению, дальнейшее усложнение моделей Хелбинга как в части взаимодействия людей, так и в части анализа окружающей обстановки ведет к громоздкой процедуре совместного интегрирования уравнений движения, что требует либо распараллеливания вычислительных процессов, либо наличия сверхпроизводительных процессоров.

Наряду с двумя описанными подходами, в работах [Акопов, Бекларян, 2015; Акоров, Beklaryan, 2015] был предложен *феноменологический* подход, в рамках которого формализована агентная модель поведения толпы. В такой модели априори определяются состояния агентов с их характеристиками, правила взаимодействия агентов и правила принятия решений. Это позволяет смоделировать динамику состояния системы как результат взаимодействия автономных агентов, чья система принятия решений задается в явном виде, а не предстает результатом решения системы уравнений Ньютона. При этом удается заложить такие эффекты, как турбулентность толпы, волны сжатия толпы и др., которые в рамках моделей Хелбинга требуют задания соответствующих потенциалов, что, в свою очередь, ведет к поиску уникального динамиче-

ского решения весьма сложной системы уравнений и порождает самостоятельную неординарную задачу. Также стоит отметить, что при феноменологическом подходе удастся добавить ряд стохастических процессов в систему принятия решений агента с целью приближения моделируемой динамики к реально наблюдаемым случайным флуктуациям в поведении толпы.

Среди других работ, нацеленных на создание программно-графического пакета реализации человеческого поведения, особое место занимает коммерческий продукт DI-Guy [Di-Guy, 2015]. Как следует из официального релиза компании, основными заказчиками программного продукта являются министерство обороны США и крупнейшие военно-промышленные корпорации (Boeing, BAE Systems, Raytheon). Таким образом, создание систем прогнозирования человеческого поведения также является предметом коммерциализации и представляет большой интерес как для государственных структур, так и для частных компаний.

Концепция предлагаемой агентной модели

Толпа — бесструктурное скопление людей, лишенных ясно осознаваемой общности целей, но связанных между собой сходством эмоционального состояния и общим объектом внимания [Головин, 1998]. Ключевыми особенностями толпы являются эффекты типа давки, паники, турбулентности.

Нарастающая плотность агентов по достижению критического значения приводит к появлению давки, которая в состоянии спровоцировать возникновение паники. Сама паника характеризуется стремлением агента расширить свое личное пространство, что приводит к возникновению эффекта турбулентности толпы [Golas et al., 2014; Helbing et al., 2007]. При этом в толпе образуются волны сжатия, выталкивающие агентов на опасные участки помещения (в частности на стены).

В результате учета имеющихся моделей и подходов, а также исследований по психологии толпы были сформулированы основные априорные предположения, которые легли в основу предлагаемой агентной модели поведения при ЧС, среди которых стоит отметить:

- частичную или полную потерю ориентации в пространстве и во времени;
- высокую степень турбулентности толпы, т.е. наличие хаотичного движения во всех направлениях в условиях высокой плотности агентов;
- существенное замедление скорости передвижения при определенных условиях (ранение, уплотнение и т.д.);
- стремление к ближайшему выходу в случае нахождения выхода в пределах видимости;

- стремление к присоединению к ближайшей группе агентов (эффект притяжения толпы).

В предлагаемой модели реализуется концепция перехода от фиксированных значений ряда показателей, отражающих как геометрию помещения, так и физику процесса перемещения агентов, к представлению их в качестве управляющих параметров модели. В результате удастся построить гибкую универсальную модель, позволяющую варьировать управляющими параметрами и, как следствие, калибровать модель с целью максимизации правдоподобия с реальными процессами. Также предлагаемая модель допускает дальнейшее усложнение во всех аспектах (геометрия помещения, механика взаимодействия агентов, характеристики самих агентов и т.д.) и введение новых уравнений связи и условий.

Модель движения толпы на основе интеллектуальной динамики агентов

В условии отсутствия ЧС основное стремление агента — покинуть помещение с наименьшими потерями, в которые входят отклонение от прямой траектории движения к выходу, пересечение с другими агентами, замедление скорости движения и ряд других параметров. Среди допущений модели стоит выделить тот факт, что рассматривается одноэтажное помещение прямоугольной формы с диаметральными выходами. Приведем формальное описание модели. Введем следующие обозначения:

(a_0, b_0) — координата левого верхнего угла помещения (*параметр*);
 $(a_{11}, b_{11}); (a_{12}, b_{12})$ — координаты вершин первого выхода (*параметр*);
 $(a_{21}, b_{21}); (a_{22}, b_{22})$ — координаты вершин второго выхода (*параметр*);
 len_1, len_2 — длина и ширина помещения соответственно (*параметр*).

Геометрия помещения (активного пространства) представлена на рис. 1.

Для характеристик активного пространства есть ряд естественных ограничений. Само помещение разбито на M прямоугольных областей за счет равномерно распределенных горизонтальных и вертикальных прямых. Количество клеток по вертикали (m_{vert}) и горизонтали (m_{hor}) также являются *параметрами* моделирования. Очевидно, что $M = m_{vert} \times m_{hor}$.

Количество агентов в клетке K_l в начальный момент обозначается n_{K_l} .

Существует равенство $\sum_{l=1}^M n_{K_l} = N$. В каждой клетке K_l , $l = 1, 2, \dots, M$ задается собственное начальное распределение положений агентов в начальный момент, обозначаемое областью F_{K_l} . Распределение F_{K_l} вместе с n_{K_l} также являются *параметрами*.

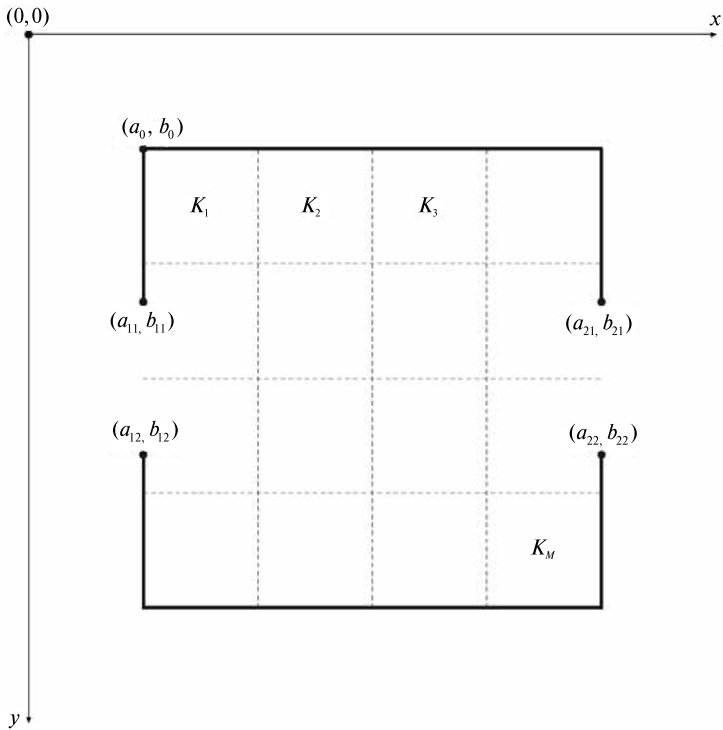


Рис. 1. Геометрия моделируемого помещения

$t = 1, 2, \dots, T$, где $T \in [1, +\infty]$ — модельное время, допускающее дробление вплоть до миллисекунд (аппроксимация непрерывной модели дискретной). Подобное квантование времени обусловлено тем, что она намного меньше, чем величина минимального времени для принятия решения агентом;

N — общее число агентов (рассматривается как *параметр* модели);

$i = 1, 2, \dots, N$ — индекс агентов;

o_i — возраст агента. Значения нормально распределены в отрезке [6, 79];

g_i — пол агента. Случайная величина, равномерно принимающая значения 1 (мужчина) или 0 (женщина);

$x_i(t)$ — абсцисса положения агента в момент t ;

$y_i(t)$ — ордината положения агента в момент t ;

$\vec{r}_i(t) = \{x_i(t), y_i(t)\}$ — радиус-вектор положения агента в момент t ;

$v_i(t)$ — абсолютное значение скорости (скалярная величина) перемещения агента в момент t ;

$v_{i, conf}$ — значение комфортной скорости (скалярная величина) ходьбы агента;

$v_{i, max}$ — значение максимальной скорости (скалярная величина) ходьбы агента.

Отметим, что комфортная и максимальная скорости ходьбы для разных гендерно-возрастных групп являются известными [Bohannon, 1997; Waters et al., 1983];

$\vec{d}_i(t)$ — направляющий единичный вектор перемещения агента в момент t ;

$\vec{D}_i(t)$ — направляющий единичный вектор агента к точке выхода в момент t ;

$\delta_i(t)$ — радиус «личного пространства» агента;

$dist_{i,j}(t)$ — расстояние между i -м и j -м агентами;

$$dist_{i,j}(t) = \sqrt{[x_i(t) - x_j(t)]^2 + [y_i(t) - y_j(t)]^2};$$

$st_i(t) \in \{0, 1, 2, 3\}$ — статус агента в момент t (0 — убит, 1 — ранен, 2 — дезориентация, 3 — жив). Статус 2 является временным и спустя некоторый период меняется на 3. В условиях отсутствия ЧС и давки $st_i(t) = 3$ для всех i ;

$sit_i(t) \in \{0, 1, 2, 3\}$ — статус восприятия агентом окружающей ситуации в момент t (0 — отсутствие ЧС, 1 — угасание ЧС, 2 — активная стадия ЧС, 3 — время сразу после ЧС). В условиях отсутствия ЧС $sit_i(t) = 0$ для всех i ;

$s_i(t)$ — площадь горизонтальной проекции агента,

$$s_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } st_i(t) = 0 \\ \sigma_1 \bar{s}_i, & \text{если } st_i(t) = 1 \\ \sigma_2 \bar{s}_i, & \text{если } st_i(t) = 2 \\ \bar{s}_i, & \text{если } st_i(t) = 3 \end{cases}$$

где \bar{s}_i — базовое значение; σ_1, σ_2 — поправочные коэффициенты (параметры), причем $\sigma_1 > \sigma_2 \geq 1$.

Значения коэффициентов обусловлены тем, что раненый человек имеет большую площадь проекции ввиду появившейся, например, хромоты, контузии или просто ухудшения координации движения. Дезориентированный человек, хотя и в меньшей степени, также склонен к ухудшению своего позиционирования, что влечет увеличение площади проекции.

Базовое (\bar{s}_i) значение площади горизонтальной проекции агента рассчитывается на основании данных из методики МЧС России [Об утверждении..., 2009].

$\rho_i(t)$ — плотность людей в толпе относительно агента в момент t ,

$$\rho_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^N \chi_i^j(t) s_j(t)}{\eta^2 s_i(t)},$$

где η — коэффициент пропорции между окружающим пространством вокруг агента, где вычисляется плотность, и его площади горизонтальной проекции (*параметр*); $\chi_i^j(t)$ — характеристическая функция присутствия j -го агента в окружении i -го агента, т.е.

$$\chi_i^j(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } (x_j(t), y_j(t)) \in B\left(\eta\sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, (x_i(t), y_i(t))\right) \text{ и } sit_i(t) \neq 0, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

где $B(r, (x, y))$ — круг радиуса r с центром в точке (x, y) .

Опишем функциональную связь между $\delta_i(t)$ и $\rho_i(t)$.

$$\delta_i(t) = \begin{cases} \zeta_i(t) \bar{\delta}_{1,i}, & \rho_i(t) \leq \bar{\rho}_{1,i}(t), \\ \zeta_i(t) \bar{\delta}_{2,i}, & \bar{\rho}_{1,i}(t) < \rho_i(t) \leq \bar{\rho}_{2,i}(t), \\ \zeta_i(t) \bar{\delta}_{3,i}, & \bar{\rho}_{2,i}(t) < \rho_i(t) \leq \bar{\rho}_{3,i}(t), \\ \zeta_i(t) \bar{\delta}_{4,i}, & \bar{\rho}_{3,i}(t) < \rho_i(t) \leq \bar{\rho}_{4,i}(t), \end{cases}$$

$$\zeta_i = \begin{cases} \bar{\zeta}_0, & \text{если } sit_i(t) = 0, \\ \bar{\zeta}_1, & \text{если } sit_i(t) = 1, \\ \bar{\zeta}_2, & \text{если } sit_i(t) = 2, \\ \bar{\zeta}_3, & \text{если } sit_i(t) = 3, \end{cases}$$

$$\bar{\zeta}_3 > \bar{\zeta}_2 > \bar{\zeta}_1 > \bar{\zeta}_0,$$

$$\bar{\rho}_{1,i}(t) = \frac{\bar{\rho}_{1,3}(t)}{3}, \quad \bar{\rho}_{2,i}(t) = \frac{2\bar{\rho}_{1,3}(t)}{3},$$

$$\bar{\rho}_{3,i}(t) = \psi_3(sit_i(t)) \frac{s_i \sum_{j=1}^N \chi_i^j(t)}{\sum_{j=1}^N \chi_i^j(t) s_j}, \quad \bar{\rho}_{3,i}(t) = \psi_4(sit_i(t)) \frac{s_i \sum_{j=1}^N \chi_i^j(t)}{\sum_{j=1}^N \chi_i^j(t) s_j},$$

$$\psi_4(sit_i(t)) > \psi_3(sit_i(t)) \quad \psi_3(0) > \psi_3(1) > \psi_3(2) > \psi_3(3),$$

$$\psi_4(3) > \psi_4(2) > \psi_4(1) > \psi_4(0), \quad (10),$$

$$\bar{\delta}_{1,i} = \vartheta_1 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, \quad \bar{\delta}_{2,i} = \vartheta_2 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, \quad \bar{\delta}_{3,i} = \vartheta_3 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, \quad \bar{\delta}_{4,i} = \vartheta_4 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}},$$

$$\vartheta_4 > \vartheta_1 > \vartheta_2 > \vartheta_3.$$

Радиус личного пространства является кусочно-постоянной функцией и, в отличие от площади горизонтальной проекции, является не физической, а психологической характеристикой агента. Коэффициент ζ_i , выступающий также в качестве *параметра* модели, отражает поправки в радиусе личного пространства в зависимости от статуса ситуации: чем чрезвычайнее ситуация в восприятии агента, тем сильнее его стремление расширить свое личное пространство.

Взаимодействие агентов в рамках описываемой модели рассматривается как упругий нецентральный удар. В качестве критерия наступления взаимодействия выступает пересечение площадей горизонтальных проекций агентов.

В качестве чрезвычайной ситуации рассматривается одиночный взрыв, центр которого является случайной величиной с вероятностным распределением P . С центром взрыва связаны три концентрические окружности различных радиусов, образующие зоны различного поражения агентов. Попадание в каждую из зон поражения в момент взрыва меняет статус агента st_i на соответствующее значение. В случае смерти агента он перестает влиять на дальнейшее развитие модели, в том числе не является преградой для перемещения. Если в результате взрыва агент дезориентирован, то на протяжении нескольких секунд он остается неподвижным, а по их истечении меняет свой статус на $st_i = 3$.

При ЧС каждый из агентов, испытывая стресс и страх, перестает ориентироваться на комфортную скорость ходьбы и готов даже на бег. При этом, в случае попадания агента в зону ранения при взрыве, максимальная скорость его бега претерпевает изменение, пропорциональное близости к взрыву.

Система принятия решения у каждого агента базируется на анализе ситуации в рамках его сектора обзора [Antonini et al., 2006]. Следуя [Costella, 1992], максимальный угол обзора принимается равным 170° для всех агентов, при этом весь сектор обзора разбивается на 11 подсекторов, центральный из которых отражает текущее направление движения, а 10 остальных, симметричных относительно центрального, отражают отклонение агента от текущего направления движения (рис. 2). Заметим, что меры углов подсекторов тем больше, чем дальше подсектор от центрального, что объясняется более детальным просчетом движения в случае незначительного отклонения, так как периферийное зрение уступает в части детализации. Радиус сектора обзора равен $\eta \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}$. Изменение угла обзора в зависимости от статуса ситуации происходит посредством симметричного увеличения или уменьшения числа подсекторов.

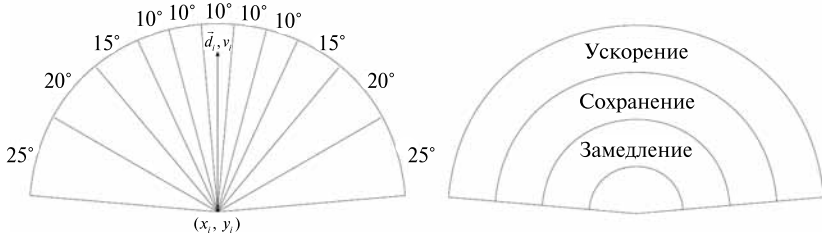


Рис. 2. Пространство выбора агента

В каждый момент агент определяет новый единичный вектор перемещения $\vec{d}_{i,new}$ по центру выбранного подсектора, а сам подсектор далее отождествляется со своим единичным вектором.

При этом в каждый момент агент имеет три альтернативы по отношению к выбору абсолютного значения своей новой скорости $v_{i,new}$: сохранить текущую скорость v_i , увеличить скорость до значения $v_{acc} = v_i + \gamma_{acc}(v_{i,max} - v_i)$ или уменьшить скорость до значения $v_{dec} = (1 - \gamma_{dec})v_i$, где γ_{acc} , γ_{dec} являются параметрами модели и принимают значения в интервале $(0, 1)$.

Таким образом пара значений $(v_{i,new}, \vec{d}_{i,new})$, определяющих перемещение агента, выбираются агентом из 33 альтернативных возможностей (11 направлений по центрам подсекторов и три варианта выбора скорости). Итоговое положение агента вычисляется по формуле

$$\vec{r}_{i,new} = \vec{r}_i + v_{i,new} \vec{d}_{i,new}.$$

При этом те альтернативы, которые попадают вне или на стены помещения, агентом не рассматриваются.

Выбор из 33 возможных итоговых положений осуществляется на основе следующего функционала:

$$M_i = \beta_{occ}(sit_i(t))occupation_i + \beta_{dir}(sit_i(t))direction_i + \beta_{dest}(sit_i(t))destination_i + \beta_{angle}(sit_i(t))angle_i + \beta_{wall}(sit_i(t))wall_i + \beta_{vel}(sit_i(t))|v_{i,new} - v_{i,comf}|^{\lambda_{vel}} + \beta_{max}(sit_i(t))|v_{i,new} - v_{i,max}|^{\lambda_{max}} + \beta_{avg}(sit_i(t))|v_{i,new} - v_{i,avg}|^{\lambda_{avg}} + \beta_{expl}(sit_i(t))explosion_i,$$

где $\beta_{occ}, \beta_{dir}, \beta_{dest}, \beta_{angle}, \beta_{wall}, \beta_{vel}, \beta_{max}, \beta_{avg}, \beta_{expl} > 0$ — весовые коэффициенты, выступающие в качестве параметров модели и меняющие свои значения в зависимости от статуса ситуации.

occupation_{*i*} отражает значимость присутствия других агентов в выбранном секторе $\bar{d}_{i,new}$, другими словами,

$$\text{occupation}_i = \sum_{j=1}^N I_{ij} e^{-\gamma_1 \|\bar{r}_{i,new} - \bar{r}_j\|},$$

где I_{ij} равно единице, если j -й агент находится в секторе $\bar{d}_{i,new}$, и нулю в ином случае; $\|\bar{r}_{i,new} - \bar{r}_j\|$ — расстояние между j -м агентом и новым положением i -го; γ_1 — нормирующий коэффициент.

Очевидно, что чем меньше количество агентов в выбранном секторе, тем меньше значение occupation_{*i*}. Также значение монотонно убывает в зависимости от степени удаленности других агентов от i -го агента в секторе.

direction_{*i*} отражает угол между единичными векторами $\bar{d}_{i,new}$ и \bar{d}_i , другими словами,

$$\text{direction}_i = \arccos(\bar{d}_{i,new}, \bar{d}_i),$$

где $\$(\cdot, \cdot)\$$ — скалярное произведение векторов.

Данный показатель отражает нежелание агента менять направление своего движения.

destination_{*i*} отражает угол между единичными векторами $\bar{d}_{i,new}$ и \bar{D}_i , другими словами,

$$\text{destination}_i = \arccos(\bar{d}_{i,new}, \bar{D}_i).$$

Данный показатель отражает желание агента двигаться напрямую к точке выхода.

angle_{*i*} пропорционален сумме углов между единичными векторами \bar{d}_i и \bar{d}_j , другими словами,

$$\text{angle}_i = \sum_{j=1}^N I_{ij} \alpha_{ij} e^{-\gamma_2 \|\bar{r}_{i,new} - \bar{r}_j\|},$$

где $\alpha_{ij} = \arccos(\bar{d}_i, \bar{d}_j)$ — угол между направлениями движения агентов; γ_2 — нормирующий коэффициент.

Очевидно, что чем более сонаправленно двигаются агенты, тем меньше значение angle_{*i*}. В то же время значение монотонно убывает в зависимости от степени удаленности других агентов от i -го агента в выбранном секторе.

wall_{*i*} зависит от минимального расстояния от агента до стен, другими словами,

$$\text{wall}_i = e^{-\gamma_3 \Delta_i},$$

где $\Delta_{i,new}$ — минимальное из расстояний от нового положения агента до стен; γ_3 — нормирующий коэффициент.

Очевидно, что чем дальше агент от стен, тем меньше wall_i .

$(|v_{i,new} - v_{i,comf}|)^{\lambda_{vel}}$ отражает отклонение скорости агента от его комфортной скорости, λ_{vel} — нормирующий коэффициент. Данный фактор дает свой вклад только при $\text{sit}_i \neq 0$.

$(v_{i,new} - v_{i,max})^{\lambda_{max}}$ отражает разницу между новой скоростью и максимальной скоростью бега, λ_{max} — нормирующий коэффициент. Данный фактор дает свой вклад только при $\text{sit}_i \neq 0$.

$(v_{i,new} - v_{i,avg})^{\lambda_{avg}}$ отражает разницу между новой скоростью и средней скоростью агентов в секторе, λ_{avg} — нормирующий коэффициент,

$$v_{i,avg} = \frac{\sum_{j=1}^N I_{ij} v_j e^{-\gamma_4 \|\bar{r}_{i,new} - \bar{r}_j\|}}{\sum_{j=1}^N I_{ij}},$$

где γ_4 — нормирующий коэффициент.

explosion_i зависит от расстояния от агента до взрыва, другими словами,

$$\text{explosion}_i = e^{-\gamma_5 \text{dist}_{i,\text{expl}}},$$

где $\text{dist}_{i,\text{expl}}$ — расстояние от нового положения агента до взрыва; γ_5 — нормирующий коэффициент.

Очевидно, что чем дальше агент от взрыва, тем меньше explosion_i . Данный фактор дает свой вклад только при $\text{sit}_i \neq 0$.

Система принятия решений агента основана на выборе той альтернативы, при которой достигается минимальное значение описанного функционала, т.е.

$$(v_{i,new}, \bar{d}_{i,new}) = \text{argmin } M_i.$$

Результаты имитационного моделирования в AnyLogic

Ввиду того что желаемая модель должна отражать логику и закономерности поведения моделируемого объекта во времени (временная динамика) и пространстве (пространственная динамика), реализация такой модели

должна быть осуществлена в системе имитационного моделирования. Необходимость использования дискретно-событийного моделирования для реализации процесса поочередного принятия решений, необходимость наличия анимации движения агентов, а также использование методов агентного моделирования обуславливают выбор пакета AnyLogic в качестве среды разработки модели (рис. 3, 4).

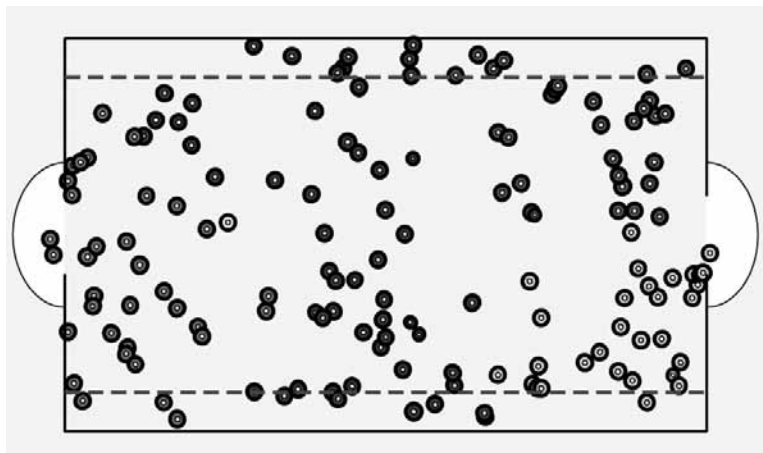


Рис. 3. Фрагмент модели в AnyLogic: распределение агентов до ЧС

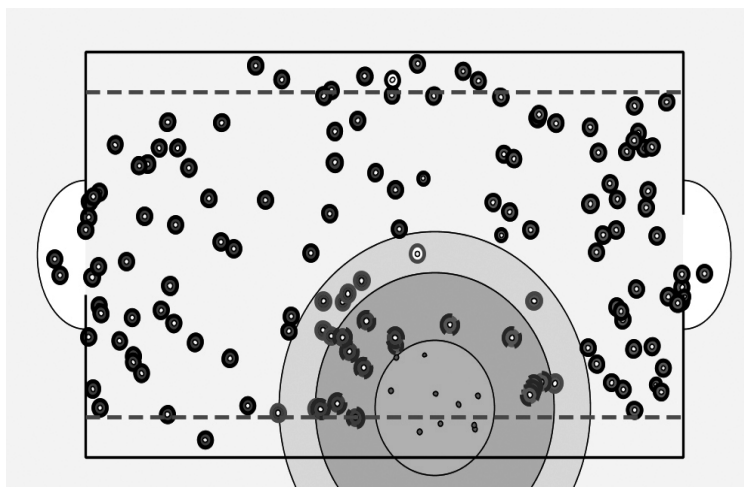


Рис. 4. Фрагмент модели в AnyLogic: распределение агентов после ЧС

Необходимо отметить, что несмотря на встроенную в AnyLogic библиотеку пешеходов со своей логикой движения агентов [Боев, 2014], был разработан новый тип агента, чья система принятия решений основана на минимизации функционала M_j . Разработка авторского моделирования в среде AnyLogic, пакета динамической кластеризации, как и само программное обеспечение, реализованы на языке Java. Также важной особенностью среды AnyLogic является наличие широкого спектра инструментов для разработки пользовательского интерфейса, что позволяет значительно упростить и сделать более понятным для конечного пользователя как процесс задания начальных параметров, так и сам процесс моделирования. При этом внутренние процессы сериализации и синхронизации, встроенные в AnyLogic, позволяют добиться высокой скорости расчетов и моделирования движения агентов на стандартном персональном компьютере даже в условиях высокой сложности самой модели.

С целью хранения входных параметров агентной модели, задаваемых пользователем, а также для хранения динамики характеристик агентов в процессе моделирования была разработана база данных (далее — БД) под управлением СУБД (система управления базы данных) MS SQL Server. Сохранение в БД динамики состояния агента позволяет впоследствии воссоздать движение агента по координатам и другим характеристикам и провести кластерный анализ. Также подобный подход упрощает дальнейший анализ результатов моделирования. При этом благодаря интеграции решения с базой данных удастся преобразовать плоскую анимацию движения агентов в режим 3D.

Кластерный анализ

С целью выявления устойчивых групп агентов в основную модель был импортирован авторский программный пакет динамической кластеризации. В каждый момент модельного времени на множестве всех агентов проводится кластеризация одновременно по трем алгоритмам [Айвазян и др., 1989; Bezdek, 1981; Golas et al., 2014]:

- 1) метод k -средних (k -means);
- 2) иерархический метод;
- 3) метод неточной кластеризации C -средних (Fuzzy Cmeans).

Ввиду того что для указанных алгоритмов в качестве входного параметра выступает количество кластеров, чье значение, с учетом частоты проведения анализа и вариативных количества агентов и геометрии активного пространства, не поддается никакой оценке, для вычисления оптимального количества кластеров использовался известный критерий компактности [Chi et al., 2006]:

$$S(U, c) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n \mu_{ik}^2 \|x_k - v_i\|^2}{\min_{i,j} \|v_i - v_j\|^2},$$

$$c = \operatorname{argmin}_c \{\min_{\Omega_c} S(U, c)\},$$

где U — множество всех агентов; i, j — индекс кластеров; k — индекс агента в кластере; μ_{ik} — вероятность принадлежности k -го агента i -му кластеру; x_k — координата k -го агента; v_i — координата центра i -го кластера; Ω_c — всевозможные разбиения U на c кластеров.

С учетом высокой степени перестроения кластеров (распад имеющихся кластеров и соединения агентов в новые), а также максимального «правдоподобия» в качестве базового алгоритма был выбран алгоритм нечеткой кластеризации (рис. 5). Среди исследуемых характеристик кластерного анализа отдельно стоит отметить:

- а) динамику количества кластеров;
- б) динамику центров кластеров;
- в) динамику диаметров кластеров;
- г) количество агентов в кластерах.

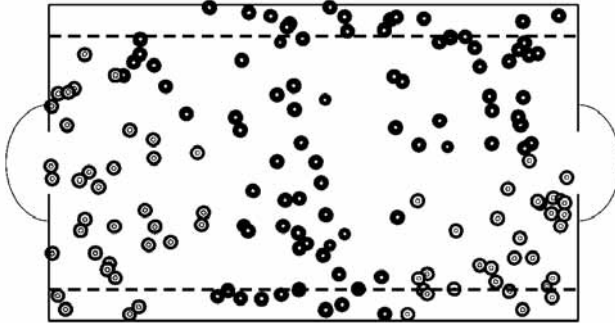


Рис. 5. Пример кластеризации

Также важно отразить предпочтения агента относительно различных кластеров:

- а) меру принадлежности агента к кластеру;
- б) частоту выбытия и примыкания к кластеру.

При этом необходимо отметить, что оценки плотности и диаметров кластеров играют важную роль в процессе регистрации появления эффекта

турбулентности и дальнейшего распространения волн сжатий. Именно кластерный анализ рассматривается автором как основной инструмент последующего анализа и выявления условий как возникновения, так и разрушения волн сжатия, которые постоянно наблюдаются в процессе проведения экспериментов.

Заключение

С учетом феноменологического подхода была формализована агентная модель поведения толпы при чрезвычайной ситуации, которая реализована в виде имитационной модели в системе AnyLogic. Как возникающая динамика в рамках такой модели, так и ее результаты согласуются с соответствующими характеристиками реальных процессов.

Полученные результаты предполагают дальнейшее развитие данного подхода с детальным учетом процедур кластеризации и динамики таксонов.

Источники

Айязян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989.

Акопов А.С. Имитационное моделирование: учеб. и практикум для акад. бакалавриата. М.: Юрайт, 2014.

Акопов А.С., Бекларян Л.А. Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях // Автоматика и телемеханика. 2015. Вып. 10. С. 131–143.

Андреева Г.М. Социальная психология: учеб. для вузов. М.: Аспект-Пресс, 2001.

Антуков А.М., Брацун Д.А. Моделирование групповой динамики толпы, паникующей в ограниченном пространстве // Вестник Пермского университета. Механика. 2009. № 3. С. 18–23.

Антуков А.М., Брацун Д.А., Люшин А.В. Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвленном помещении // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5. № 3. С. 491–508.

Бекларян А.Л., Акопов А.С. Моделирование поведения толпы на основе интеллектуальной динамики взаимодействующих агентов // Бизнес-информатика. 2015. Т. 31. № 1. С. 69–77.

Боев В.Д. Компьютерное моделирование: пособие для практ. занятий, курс. и диплом. проектирования в AnyLogic 7. СПб.: ВАС, 2014.

Головин С.Ю. Словарь практического психолога. Мн: Харвест, 1998.

Кирик Е.С., Круглов Д.В., Юргельян Т.Б. О дискретной модели движения людей с элементом анализа окружающей обстановки // Журнал СФУ. Сер.: Математика и физика. 2008. Т. 1. № 3. С. 266–276.

Лебон Г. Психология народов и масс. М.: Акад. проект, 2011.

Об утверждении Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: приказ МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382. М.: МЧС России, 2009.

Фрейд З. Психология масс и анализ человеческого «Я». М.: Азбука-Аттикус, 2013.

Юнг К.Г. Психология бессознательного. М.: Канон+: РООИ «Реабилитация», 2012.

Akopov A.S., Beklaryan L.A. Simulation of Human Crowd Behavior in Extreme Situations // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2012. Vol. 79. No. 1. P. 121–138.

Antonini G., Bierlaire M., Weber M. Discrete Choice Models of Pedestrian Walking Behavior // Transportation Research Part B. 2006. Vol. 40. No. 8. P. 667–687.

Bezdek C.J. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Norwell, MA: Kluwer Acad. Publishers, 1981.

Bohannon R.W. Comfortable and Maximum Walking Speed of Adults Aged 20–79 years: Reference Values and Determinants // Age and Ageing. 1997. Vol. 26. No. 1. P. 15–19.

Bratsun D. et al. Computational Modeling of Collective Behavior of Panicked Crowd Escaping Multi-Floor Branched Building // Proceedings of the European Conference on Complex Systems 2012. Springer Intern. Publ., 2013. P. 659–663.

Chi Z., Yan H., Pha M.T. Fuzzy Algorithms: With Applications to Image Processing and Pattern Recognition. Venue: World Scientific Publ., 2006.

Costella J.P. Galilean Antialiasing for Virtual Reality Displays. The Univ. of Melbourne, 1992.

Di-Guy [Electronic resource]: [официальный сайт коммерческого симулятора, имитирующего поведение больших масс людей]. <<http://www.diguy.com/diguy>> (date of access: 02.05.2015).

Golas A., Narain R., Lin M.C. Continuum Modeling of Crowd Turbulence // Physical Review E. 2014. Vol. 90. No. 4. P. 042816.

Hartigan J.A., Wong M.A. A K-Means Clustering Algorithm // Journal of the Royal Statistical Society. Ser. C: Applied Statistics. 1979. Vol. 28. No. 1. P. 100–108.

Helbing D., Farkas I., Vicsek T. Simulating Dynamical Features of Escape Panic // Nature. 2000. No. 407. P. 487–490.

Helbing D. et al. Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations // Pedestrian and Evacuation Dynamics. 2002. Vol. 21. No. 2. P. 21–58.

Helbing D., Johansson A., Al-Abideen H.Z. Dynamics of Crowd Disasters: An Empirical Study // Physical Review E. 2007. Vol. 75. No. 4. P. 046109.

Helbing D., Molnar P. Social Force Model for Pedestrian Dynamics // Physical Review E. 1995. Vol. 51. No. 5. P. 4282–4286.

Mintz A. Non-Adaptive Group Behavior // Journal of Abnormal Psychology. 1951. Vol. 46. No. 2. P. 150–159.

- Moussaïda M., Helbing D., Theraulaza G.* How Simple Rules Determine Pedestrian Behavior and Crowd Disasters // PNAS. 2011. Vol. 108. No. 17. P. 6884–6892.
- Waters R.L. et al.* Energy Cost of Walking in Normal Children and Teenagers // Developmental Medicine & Child Neurology. 1983. Vol. 25. No. 2. P. 184–188.
- Yu W., Johansson A.* Modeling Crowd Turbulence by Many-Particle Simulations // Physical Review E. 2007. Vol. 76. No. 4. P. 46–105.