

## СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ТОЛПЫ

Р. В. Гребенников

*Воронежский Государственный Университет*

Поступила в редакцию 01.03.2010 г.

**Аннотация.** Данная работа предлагает несколько критериев оценки эффективности работы для различных моделей поведения толпы, основанных на закономерностях поведения реальных людских толп.

**Ключевые слова:** поведение толпы, критерий эффективности.

**Abstract.** This article suggests multiple efficiency scoring criteria for crowd behavior models based on real crowd behavior patterns.

**Key words:** crowd behavior, efficiency criteria.

### ВВЕДЕНИЕ

В истории всегда существовал довольно большой интерес к попытке понять и управлять движением и поведением больших групп людей. Зачастую, поведение толпы исследовалось в рамках социологии и психологии с целью исследования событий, случающихся в группах людей, объединенных общей целью, и функционирующих как единое целое. В таких случаях люди начинают терять свою индивидуальность и совершать поступки в рамках общего поведения толпы.

Сущность толпы можно трактовать несколькими методами, но среди всех исследований на эту тему существует две различных философии описания толпы: дискретная и непрерывная. В первой толпа представляется в качестве совокупности множества независимых элементов, каждый из которых действует на основании каких-либо правил. В непрерывном случае толпа рассматривается либо как жидкость, подчиняющаяся и описываемая гидро- и газодинамическими законами (например, уравнениями Бернулли или Навье-Стокса), либо в форме континуума.

На основании данных философий существует множество методов создания моделей поведения толпы, и их можно разделить на несколько классов:

- Методы на основе клеточных автоматов. В подобных методах пространство, по которому перемещаются агенты, представляется в виде

набора клеток, образующих некоторую периодическую решетку с заданными правилами перехода, определяющими состояние клетки в следующий момент времени через состояние клеток, находящимися от нее на расстоянии не больше некоторого, в текущий момент времени [5], [6].

- Методы на основе физических процессов динамики жидкости. В данном случае каждый элемент толпы представляет собой частицу, состояние которой описывается уравнениями динамики жидкости (например, уравнениями Навье-Стокса) [7], [8].

- Методы на основе ньютоновской механики. В подобных методах все социальные силы, действующие на агента в толпе, выражаются в виде сил. Движение агента же описывается на основе второго закона Ньютона [9].

- Мультиагентные методы. В соответствии с этим подходом, в процессе моделирования не описывается динамическая система в целом, а создается набор элементарных правил, которым подчиняется любой агент в толпе.

- Методы, основанные на данных, полученных из реальных наблюдений за поведением толп в различных условиях. Зачастую подобные методы имеют узкую направленность (применимы, например, только для моделирования пожарной эвакуации). [4]

- Гибридные методы, использующие комбинацию нескольких вышеперечисленных подходов. [3]

Более подробно анализ рассмотренных методов был проведен в работах [10] и [11].

Большие скопления людей (в дальнейшем — толпы) есть обычное явление в современном мире, и их моделирование является важным вопросом в различных областях, таких как компьютерная графика и анализ архитектурных объектов на предмет эвакуации в случае экстремальных ситуаций.

Компьютерное моделирование толпы — сложная задача, потому что поведение большого количества людей зависит от множества факторов, таких как индивидуальное движение каждого участника толпы, ограничения среды, в которой находится толпа и взаимодействия между всеми участниками толпы. К тому же, модель должна отражать возможность интеллектуального планирования пути для каждого участника толпы (в дальнейшем — агента) в таких ситуациях как затор. Люди постоянно корректируют направление своего пути в зависимости от их окружения, и благодаря этому даже в очень плотных толпах количество столкновений между агентами и резких смен направления движения удивительно мало.

Существует множество различных подходов к моделированию толпы, и на каждом из них основывается несколько методов — для подобного многообразия необходимо наличие способов оценки эффективности предложенных моделей. Подобные методы предлагаются в данной работе.

### МИНИМИЗАЦИЯ ДИСТАНЦИИ ПУТИ

Исследования поведения реальных людских толп показали [1], что все участники толпы движутся, соблюдая некоторые закономерности:

- пытаются пройти минимальную дистанцию с максимальным комфортом,
- избегают столкновений,
- пытаются избежать резкой смены направления движения (реальным людям в этом помогает сила инерции).

На основании этих доводов становится возможным сформулировать в данной работе набор критериев, математически формализующих некоторые из описанных закономерностей и позволяющих оценивать и сравнивать различные модели поведения толпы.

Предположим, что  $\Pi_i$  — совокупность всех путей из текущей точки  $x_i$  в точку цели пути  $a_i$ . Каждый  $i$ -тый участник толпы при движении в соответствии со своей моделью выбирает путь  $P_i \in \Pi$ . Таким образом, для всей толпы мера

эффективности модели относительно пройденного пути примет следующий вид:

$$L = \frac{\sum_{i=1..N} \int_{P_i} 1 ds_i}{N}, \quad (1)$$

где  $N$  — количество людей в толпе, а  $ds_i$  обозначает интеграл по длине пути. Выражение (1) описывает собой среднюю длину пройденного пути. Данный критерий может быть применен только к непрерывным моделям поведения толпы, например для моделей, основанных на представлении непрерывного континуума [3] и моделях, основанных на динамике жидкости [4].

Для дискретного случая данный критерий может быть применен следующим образом. Пусть путь  $i$ -того участника толпы представлен как множество последовательных точек  $x_{ij}$ , таким образом критерий примет вид:

$$L = \frac{\sum_{i=1..N} \sum_j x_{ij}}{N}. \quad (2)$$

Подобный способ может быть применен для оценки эффективности дискретных моделей поведения толпы, основанных:

- на клеточных автоматах [5] [6],
- на фактических наблюдениях за поведением реальных толп [2].

К тому же, данный метод может быть использован и для непрерывных моделей (путем квантования пути на множество последовательных точек) для грубой оценки средней длины пути в случаях, когда требуется высокая производительность в ущерб точности алгоритма.

### МИНИМИЗАЦИЯ КРИВИЗНЫ ПУТИ

Как уже было замечено ранее, люди в реальных толпах при движении к цели пытаются выбрать путь  $P \in \Pi$  такой, что средняя кривизна пройденного пути будет минимальной. Другими словами, каждый участник толпы пытается свести количество резких изменений направления движения к минимуму — в идеальном случае двигаться по наикратчайшему пути, по прямой.

Пусть  $\Phi_i(t)$  — вектор-функция, зависящая от времени и описывающая положение  $i$ -того участника толпы в момент времени  $t$ . Если  $\Phi$  — непрерывна и дважды дифференцируема, то справедливым будет утверждение, что кривизна пройденного пути для отдельного агента выражается формулой:

$$C_i = \frac{\left| \frac{d\Phi_i(t)}{dt} \times \frac{d\Phi_i(t)}{d^2t} \right|}{\left| \frac{d\Phi_i(t)}{dt} \right|^3}, \quad (3)$$

тогда для всей толпы мера средней кривизны пройденного пути примет вид:

$$C = \frac{\sum_{i=1..N} C_i}{N}. \quad (4)$$

Для дискретных моделей поведения толпы формула (3) напрямую неприменима из-за ограничений, накладываемых на функцию  $\Phi$ . Для решения этой проблемы можно либо методом интерполяции (например с использованием сплайнов или кривых Безье) получить функцию  $\Phi'$ , близкую к исходной  $\Phi$ , но непрерывную и дважды дифференцируемую, либо ввести меру кривизны, свободную от подобных ограничений. Так как выбор метода интерполяции значительно повлияет на меру кривизны (3), более целесообразно использовать такую меру кривизны, вычисление которой не требует наличия второй производной. Пусть путь  $i$ -того участника толпы представляет собой множество  $x_1 \dots x_j$  при  $j \rightarrow \infty$ , тогда мера кривизны индивидуального пути представляет собой сумму всех угловых отклонений от прямого пути:

$$C_i = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{j=1..k} \left| \pi - \arccos \times \frac{\left| \vec{x}_{j-1} - \vec{x}_{j+1} \right|^2 - \left| \vec{x}_{j-1} - \vec{x}_j \right|^2 - \left| \vec{x}_j - \vec{x}_{j+1} \right|^2}{2 \left| \vec{x}_{j-1} - \vec{x}_{j+1} \right| \times \left| \vec{x}_{j-1} - \vec{x}_{j+1} \right|} \right|. \quad (5)$$

Таким образом, для дискретного случая индивидуальная мера кривизны примет вид

$$C_i = \sum_{j=1..N} \left| \pi - \arccos \times \frac{\left| \vec{x}_{j-1} - \vec{x}_{j+1} \right|^2 - \left| \vec{x}_{j-1} - \vec{x}_j \right|^2 - \left| \vec{x}_j - \vec{x}_{j+1} \right|^2}{2 \left| \vec{x}_{j-1} - \vec{x}_{j+1} \right| \times \left| \vec{x}_{j-1} - \vec{x}_{j+1} \right|} \right|, \quad (6)$$

где  $N$  — количество дискретных участков пути. Причем подобная индивидуальная мера кривизны пути (5) и (6) будет сопоставима как для дискретных, так и для непрерывных моделей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования различных моделей поведения толпы автором был разработан набор критериев оценки их эффективности на основе закономерностей, наблюдаемых в реальных толпах. Данные критерии позволяют

сравнить несколько моделей между собой с целью изучения их расхождения с реальными толпами.

Помимо предложенных критериев, существует еще несколько трудноформализуемых методов оценки моделей поведения, на которые в дальнейшем следует обратить внимание, основанных на следующих фактах:

- при движении одной толпы сквозь встречную, участники обеих толп пытаются сформировать колонны,

- при недостаточной пропускной способности дверей наблюдается формирование заторов.

Что характерно, данные особенности движения людей в толпе прослеживаются в том числе и во многих моделях поведения толпы, в которых подобный характер не был в чистом виде заложен изначально. Изложенные соображения лягут в основу дальнейших исследований в области создания критериев эффективности моделей толпы.

На данный момент предложенные в данной работе методы оценки используются для сравнения эффективности различных методов моделирования поведения толпы в программном комплексе Corecrowd, созданном автором для анализа и сравнения эффективности как для известных моделей поведения толпы, так и для новой модели, разработанной автором в рамках исследований по данной тематике [12].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Предтеченский В. М., Милинский А. И. Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков. Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., доп. и перераб. — М: Стройиздат, 1979, 376 с.
2. Холщевников В. В., Самошин Д. А. Эвакуация и поведение людей при пожарах. Учеб. пособие. — М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. — 212 с.
3. Treuille, A., Cooper, S., and Popovic, Z. Continuum crowds. In ACM SIGGRAPH 2006 Papers. SIGGRAPH '06. ACM, New York, NY, 1160—1168.
4. Hughes RL. 2002a A continuum theory for the flow of pedestrians. Transp. Res. B 36:507—35
5. Zhao DL, Yang LZ, Li J. Exit dynamics of occupant evacuation in an emergency. Physica A 2006; 363; 501—11
6. Perez GJ, Tapang G, Lim M, Saloma C. Streaming, disruptive interference and power-law behavior in the exit dynamics of confined pedestrians. Physica A 2002; 312; 609—18.
7. Greenshields BD. 1934/ A study of traffic capacity. Proc. Highw. Res. Board 14:448—77.
8. Lighthill MJ, Whitham GB. 1955 On kinematic waves: I. Flood movement in long rivers; II. Theory of

traffic flow on long crowded roads. Proc. R. Soc. London Ser. A 229:281–345.

9. D. Helbing, I. Farkas, T. Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. Nature 407 (2000) 487.

10. Гребенников Р. В. Обзор классических методов поведения толпы. Прикладные задачи моделирования и оптимизации, ВГТУ, Воронеж, 2010. — С. 60.

**Гребенников Роман Владимирович** – аспирант кафедры программирования и информационных технологий факультета Компьютерных наук Воронежского Государственного Университета. Тел: (4732) 208-470, 8 (910) 340-85-86. E-mail: grv@cs.vsu.ru

11. Гребенников Р. В. Обзор ADPLV и графоаналитического методов моделирования поведения толпы, Прикладные задачи моделирования и оптимизации, ВГТУ, Воронеж, 2010. — С. 70.

12. Гребенников Р. В. Решение задачи об оптимальном поведении толпы с использованием метода оптимизации роя частиц. Вестник ВГУ: Системный анализ и информационные технологии, ВГУ, Воронеж, 2010.

**Grebennikov Roman Vladimirovich** – Post-Graduate Student, the dept. of Programming and Informational Technologies, Voronezh State University. Tel.: (4732) 208-470, 8 (910) 340-85-86. E-mail: grv@cs.vsu.ru.