

**МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ТОЛПЫ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНЫХ
ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ****Р. В. Гребенников***Воронежский государственный университет***Поступила в редакцию 1.03.2009 г.**

Аннотация. В данной работе рассматривается модель поведения большой группы людей на основе индивидуальных локальных динамических полей, отвечающих одновременно за глобальную навигацию и избегание столкновений с окружающими препятствиями.

Ключевые слова: поведение толпы, избегание столкновений, планирование пути.

Abstract. The article discusses a crowd behavior model, based on individual local dynamic fields, which allow performing a global navigation and local obstacle avoidance simultaneously.

Keywords: crowd behavior, collision avoidance, path planning.

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 функционирующей как единое целое. В таких случаях люди начинают терять свою индивидуальность и совершать поступки в рамках общего поведения толпы.

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.

Наиболее реалистичный подход к моделированию движения толпы основывается на агентном подходе, в котором каждый индивид сам принимает решения на основе своих личных характеристик и целей (т.н. локальное управление). Подобный подход наиболее известен благодаря работе Funge [1], которая впоследствии была расширена Shao и Terzopoulos [2] добавлением возможности учета видимой области каждого из агентов.

В отличие от настоящих людей, локально-управляемые агенты не планируют свой путь глобально с учетом возможных столкновений с другими участниками движения. Столкновения избегаются локально путем изменения направления движения при приближении к препятствиям. Существует множество различных методов избегания столкновений, среди которых геометрические, сетчатые, зависимые от плотности и др., но все они не позволяют симитировать движение с плавностью, с которой реальные люди огибают препятствия. В наблюдениях за реальным поведением толпы [3] замечено, что люди крайне редко резко меняют свое направление движения.

Сам алгоритм избегания препятствий не может быть использован для моделирования толпы, имеющей глобальные цели, поэтому

большинство моделей толпы используют его совместно с глобальным или локальным планированием пути:

- Подход, основывающийся на индивидуальном поведении каждого агента толпы с использованием локального планирования пути. Один из наиболее популярных методов на основе этого подхода рассмотрен в работе Reynolds [4], в котором поведение толпы складывается на основе набора элементарных правил, которым следует каждый из агентов. Несмотря на простоту и небольшое количество таких правил, системы, построенные на основе этой модели, демонстрируют весьма сложные варианты поведения, такие как огибание препятствий стаей птиц [4] и избегание хищника [5];

- Подход, в основе которого лежит рассмотрение поведения толпы как единого целого и использование глобального планирования пути. В работе Helbing [6] толпа рассматривается как система взаимосвязанных частиц, реагирующая определенным образом на факторы, порождаемые окружающей средой и самой толпой.

Представленная работа основывается на первом предложенном подходе на основе описания индивидуального поведения каждого агента толпы. У него есть свои достоинства: реальные толпы людей состоят из индивидуальных агентов, каждый из которых самостоятельно принимает решения, и модель, построенная в соответствии с таким подходом, позволяет учесть уникальную ситуацию каждого агента: область видимости, близость соседних агентов и другие локальные факторы. К тому же, каждый агент может иметь свои индивидуальные характеристики, такие как скорость, уровень зависимости от окружающих [7], что позволяет смоделировать комплексное движение гетерогенной толпы. Но у предложенного подхода есть и недостатки, среди которых повышенные требования к мощности компьютера при выполнении симуляций в реальном времени.

В работе Treuille [8] была предложена идея использования набора глобальных потенциальных полей для толпы, в которой каждый агент пытался минимизировать текущее значение энергии, и в рамках одного алгоритма, без разделения на отдельные процессы, следовал глобальной цели и огибал локальные препятствия. Эта предложенная модель ориентирована, прежде всего, на работу в режиме реального времени, и для увеличения скорости расчетов пренеб-

регает индивидуальным характером поведения каждого агента в толпе. Treuille было предложено три гипотезы, исходя из которых формировался набор глобальных потенциальных полей:

- Каждый агент пытается достичь определенной географической цели. Цель может быть как точкой (например, «Красная пл., д.1»), так и направлением (например, «на восток»). Также цель может быть динамической (например, «следовать за определенным человеком» или «идти к ближайшему свободному стулу в комнате»);

- Агенты движутся на максимально возможной в данных условиях скорости. Окружающая среда воздействует на скорость путем ее уменьшения на подъемах и увеличения на спусках. Вдобавок, максимальная скорость зависит от плотности окружающей агента толпы. В общем случае, такая зависимость выражается в виде:

$$\bar{x} = f(x, \theta)n_{\theta},$$

где f — потенциальное поле максимальной скорости для агента в точке x , движущегося в направлении θ , $n_{\theta} = [\cos \theta, \sin \theta]^T$ — единичный вектор в направлении θ ;

- Существует поле дискомфорта g , такое, что при прочих равных факторах, агент предпочтет находиться в точке x вместо x' , если $g(x') > g(x)$.

1. ОПИСАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

В представленной работе предлагается расширить модель, предложенную Treuille, добавив в нее возможность учета индивидуального характера поведения каждого из агентов толпы путем использования отдельного набора локальных потенциальных полей для каждого из них:

- поле максимальной скорости;
- поле глобальной цели;
- поле дискомфорта.

Стоит заметить, что локальные потенциальное поле следует рассчитывать, исходя из факта, что реальные люди при движении в толпе принимают решения на основе только лишь видимой информации и глобальных целей.

Область видимости A_i агента x_i в толпе определена в форме шара с центром в местоположении агента и заданным радиусом r . Принадлежность объекта с координатами x, y, z к области видимости агента x_i определяется неравенством

$$(x - x_{xi})^2 + (y - y_{xi})^2 + (z - z_{xi})^2 < r^2. \quad (1)$$

В формуле [1] x_{xi} , y_{xi} и z_{xi} — координаты агента x_i . Такой подход в дальнейшем упрощает расчеты очень больших толп.

Параметры поля глобальной цели задаются заранее, перед началом моделирования. Само поле представлено в простой форме с потенциалом, уменьшающимся пропорционально дистанции между текущим положением агента с положением x и ближайшей целью с координатами \hat{x} :

$$G(x) = \frac{1}{|x - \hat{x}|}. \quad (2)$$

Поле максимальной скорости зависит нескольких факторов:

- наклон рельефа;
- плотность окружающей толпы;
- скорости движения окружающей толпы.

Для каждого агента создается индивидуальное поле плотности, обозначаемое как p_i , которое достигает максимума в месте нахождения агента и плавно радиально спадает. Общая плотность толпы, окружающей текущего агента, вычисляется как сумма всех полей агентов, находящихся в зоне видимости A_i :

$$p_i = \sum_{j, j \neq i, x_j \in A_i} p_j. \quad (3)$$

Также, для каждого агента создается поле средней скорости v_i , которое изменяется пропорционально индивидуальной плотности:

$$\vec{v}_i = \frac{\sum_{j, j \neq i, x_j \in A} p_j \vec{x}_j}{p_i}, \quad (4)$$

где x_j — скорость j -го агента.

В случае при малой плотности толпы (т.е. при $p < p_{\min}$, где p_{\min} — заданное пороговое значение), скорость движения агента равна топографической скорости f_T на данной местности:

$$f_T(x, \theta) = f_{\max} + \left(\frac{\nabla h(x) n_\theta - s_{\min}}{s_{\max} - s_{\min}} \right) \times (f_{\min} - f_{\max}), \quad (5)$$

где f_{\min} и f_{\max} — константы, показывающие максимальную и минимальную возможную скорость движения агента, s_{\min} и s_{\max} — величины, обозначающие минимальный и максимальный уровень наклона рельефа, а $\nabla h(x) n_\theta$ — величина наклона рельефа в точке θ .

В случае при большой плотности толпы (т.е. $p > p_{\max}$, где p_{\max} — заданное пороговое

значение), скорость агента зависит от скорости потока:

$$f_V(x, \theta) = v(x + rn_\theta) n_\theta, \quad (6)$$

где v — средняя скорость потока, взятая в текущем положении агента со смещением r в сторону θ . Такое смещение позволяет подстраиваться под скорость потока уже в планируемой точке перемещения.

В случае $p_{\min} < p < p_{\max}$, скорость линейно зависит и от скорости потока, и от топографической скорости:

$$f(x, \theta) = f_T(x, \theta) + \left(\frac{p(x + rn_\theta) - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} \right) \times (f_V(x, \theta) - f_T(x, \theta)). \quad (7)$$

Поле дискомфорта зависит от заранее заданного поля препятствий $O(x)$ (например, стен) и от общей плотности всех агентов толпы:

$$g(x_i, \theta) = o(x_i) + p_{x_i}, x_i \in A_\tau. \quad (8)$$

На рис. 1 показан набор создаваемых полей для одного агента (текущий агент выделен черным контуром, окружающие агенты показаны в виде кругов).

2. ВЫБОР ПУТИ

В реальных толпах, при выборе оптимального пути, люди предпочитают наикратчайший, но на это предпочтение зачастую влияет желание избегать заторов и прочих ситуаций, влияющих на время прохождения пути. К тому же, реальные люди пытаются избежать попадания в области повышенного дискомфорта (например, на автодорогу). Обобщив эти идеи, было выдвинуто предположение, что агенты в толпе выбирают путь с минимальной линейной комбинацией следующих факторов:

- длина пути;
- затраченное время;
- ощущенный дискомфорт.

Пусть Π — множество всех возможных путей от точки x к одной из целей, таким образом, выбирая путь $P \in \Pi$, агент пытается минимизировать величину:

$$\alpha \int_P ds + \beta \int_P dt + \gamma \int_P gdt, \quad (9)$$

где α, β, γ — веса данных факторов, ds — интеграл по длине пути, dt — интеграл по времени. Учитывая, что $ds = fdt$, где f — скорость, запишем формулу [9] в виде:

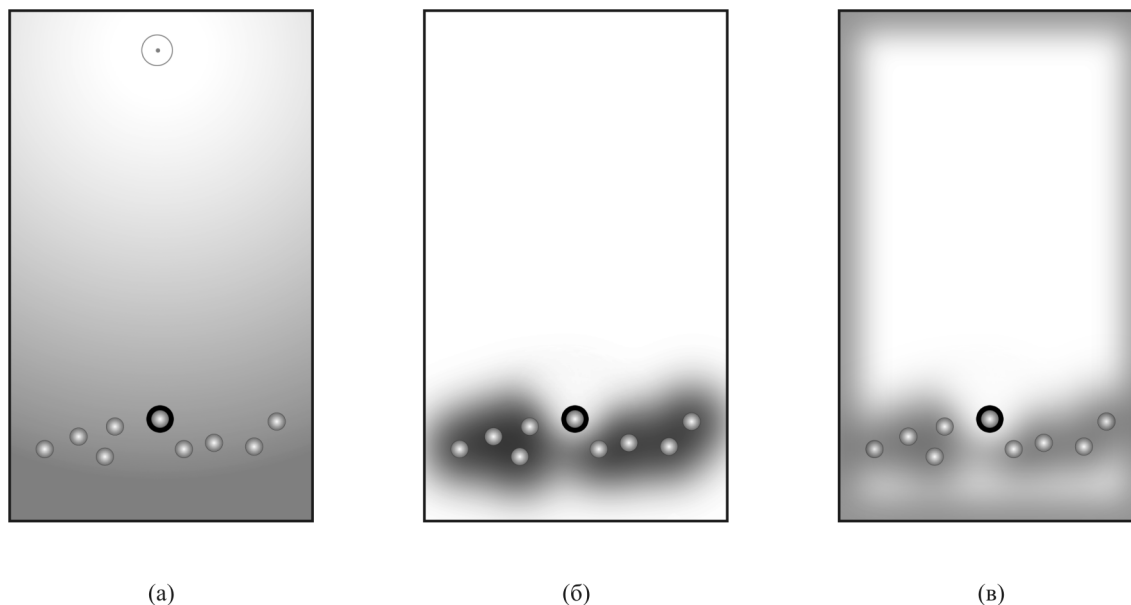


Рис. 1. Визуальное отображение поля глобальной цели (а), поля плотности (б) и поля дискомфорта (в)

$$C = \frac{\alpha f + \beta + \gamma g}{f}, \quad (10)$$

$$\alpha \int_P 1 ds + \beta \int_P \frac{1}{f} ds + \gamma \int_P \frac{g}{f} dt.$$

Предложенный критерий [10] используется для расчета оптимального пути. Пусть существует функция $\varphi \in R$, на всей своей области определения равная значению критерия оптимальности. Очевидно, что для одновременного достижения цели и минимизации критерия оптимальности, агент должен двигаться в сторону, противоположную значению градиента функции φ . Данная потенциальная функция в точке цели пути равна нулю, а на всем остальном промежутке удовлетворяет уравнению эйконала:

$$\|\nabla\varphi(x)\| = C, \quad (11)$$

где $\nabla\varphi(x)$ — градиент функции $\varphi(x)$.

Таким образом, вектор движения агента записывается в форме:

$$\bar{x} = -f(x, \theta) \frac{\nabla\varphi(x)}{\|\nabla\varphi(x)\|}, \quad (12)$$

где $f(x, \theta)$ — значение скорости агента, находящегося в точке x , двигаясь в направлении θ .

Для поставленной задачи было принято решение использовать численный метод решения полученного уравнения эйконала Fast Marching Method [9].

3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В соответствии с выбранным методом был разработан набор инструментальных и алгоритмических средств, позволяющих визуализировать поведение виртуальной толпы и проводить анализ полученных результатов.

В процессе разработки программы было сделано следующее:

- реализованы алгоритмы работы с потенциальными полями;
- создана программная реализация метода численного решения уравнений эйконала;
- создана оболочка, позволяющая визуализировать поведение виртуальной толпы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием предложенной модели была проведена компьютерная симуляция толпы, показавшая, что данный метод позволяет синтезировать поведение множества агентов в толпе.

Также было произведено сравнение предложенной модели с другими моделями поведения толпы, такими как Reynolds и Helbing, которое показало:

- предложенная модель на основе локальных потенциальных полей позволяет создавать поведение с более плавным характером движения. На рис. 2 показан пример сравнительного компьютерного моделирования предложенной модели и модели Reynolds, агенты в которой

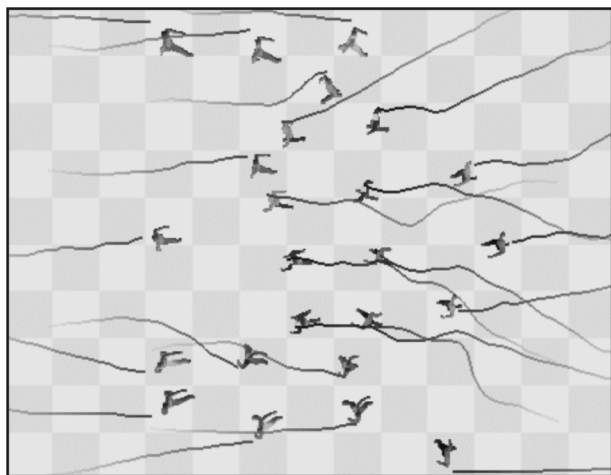


Рис. 2. Взаимодействие предложенной модели (слева) и модели Reynolds (справа)

периодически резко меняют направление движения;

• использование локальных потенциальных полей с учетом области видимости за счет отсека невидимых объектов симуляции позволяет рассчитывать толпы с очень большим количеством участников, сводя сложность модели от $O[N^2]$ к $O[N]$.

На данном этапе развития, модель толпы на основе локальных потенциальных полей имеет множество возможностей и направлений для дальнейшего развития.

Для формального описания задачи, было допущено множество упрощений. Одним из наиболее заметных является обработка столкновений, как глобальных (пересечение путей в одной точке в одно время), так и локальных (столкновение различными частями тела при прохождении путей вблизи). Также была допущена возможность смены агентом направления пути без учета его текущей инерции. Ей можно пренебречь только в случае медленного движения толпы.

В дальнейшем, также стоит обратить внимание на поддержку упреждающего дискомфорта,

позволяющего оптимально избегать движущихся препятствий, предугадывая направление дальнейшего движения препятствия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Funge, J., Tu, X., Terzopoulos D. 1999. Cognitive modeling: knowledge, reasoning and planning for intelligent characters. Proceedings of SIGGRAPH99, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference series. P. 29–38.

2. Shao W., Terzopoulos D. 2005. Autonomous pedestrians. In SCA'05: Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer Animation, ACM Press, NY, USA, P. 19–28.

3. Lee, K. H., Choi, M. G., Hong, Q., and Lee, J. 2007. Group behavior from video: a data-driven approach to crowd simulation. In Proceedings of the 2007 ACM Siggraph/Eurographics Symposium on Computer Animation (San Diego, California, August 02–04, 2007). Symposium on Computer Animation. Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, 109–118.

4. Reynolds, C. W. 1987. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. In Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques M. C. Stone, Ed. SIGGRAPH '87. ACM, New York, NY, 25–34.

5. Tu X. and Terzopoulos D. 1994. Artificial fishes: physics, locomotion, perception, behavior. In Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques SIGGRAPH '94. ACM, New York, NY, 43–50.

6. Helbing D.; Farkas I. and Vicsek, T. “Simulating Dynamical Features of Escape Panic”. Nature, v. 407, pp. 487–490, 2000

7. Modeling Individual Behaviors in Crowd Simulation. Adriana Braun, Soraia R. Musse, Luiz P. L. de Oliveira and Bardo E. J. Bodmann. Av. Unisinos, 950 — Sao Leopoldo, RS, Brazil

8. Treuille A., Cooper S., and Popovi Z. 2006. Continuum crowds. In ACM SIGGRAPH 2006 Papers (Boston, Massachusetts, July 30 — August 03, 2006). SIGGRAPH '06. ACM, New York, NY, 1160–1168

9. Gremaud P. A. and Kuster C. M. 2005. Computational Study of Fast Methods for the Eikonal Equation. SIAM J. Sci. Comput. 27, 6 (Dec. 2005), 1803–1816.

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

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.