Болбин С.Н., Митягин С.А. (Санкт-Петербург)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ АГЕНТОВ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Введение

Рассматривается задача моделирования движения пешеходов в условиях ограниченного пространства при наличии чрезвычайной ситуации. В рамках решения данной задачи движение пешеходов может быть представлено как движение потока людей между несколькими точками, что является одной из разновидностей задачи эвакуации и обеспечения безопасности движения в узких проходах, таких как мосты, туннели, улицы и пр.

Моделирование движения пешеходов в различных ситуациях и условиях является актуальной технической задачей, активному развитию которой в последнее время способствуют рост вычислительных мощностей, создание вычислительных центров и пр. Анализу и моделированию движения пешеходов посвящено большое число работ в научных и популярных изданиях [7-12]. В ряде работ [6-8] отмечается, что основой моделирования движения толпы часто выступают общие физические закономерности движения вещества, например, жидкости или газа в аналогичной среде.

В общем случае движение потока пешеходов не доступно наблюдению одинаково во всех точках пространства. Вместе с тем в случае возникновения чрезвычайной ситуации существует необходимость оперативного управления объектом, на котором может находиться большое количество людей. Сопутствующей задачей является получение информации о наиболее вероятных путях движения потоков пешеходов посредством ряда приборов наблюдения. Как известно размещение приборов наблюдения осуществляется согласно действующей политике безопасности, но в случае чрезвычайной ситуации часть камер может быть повреждено. Тем самым дополнительным условием является ограничение возможности наблюдения.

Постановка задачи

Решение поставленной задачи осуществляется посредством применения вероятностных моделей поведения пешеходов в условиях чрезвычайной ситуации, основанных на общих правилах движения вещества в непрерывной среде. Подобный подход основан на понимании движения агентов как дискретного в пространстве случайного процесса, в среднем описываемого правилами движения вещества в рассматриваемой среде. Исходя из этого, предлагается применение двухступенчатого подхода к моделированию движения пешеходов – на физическом (социальном) и психологическом уровнях. На физическом уровне поведение потока пешеходов подчиняется правилам движения жидкости в аналогичной среде [6,8]. На личностном уровне в условиях паники поведение пешехода несет в себе определенную случайную составляющую и зависит от окружающей среды, личностных качеств, личных связей с окружающими людьми и других факторов.

Таким образом, рассматривается совместное применение двух моделей – детерминированной модели потока пешеходов, задающей общие правила поведения человека в каждой точке пространства и агентной модели поведения каждого отдельного пешехода.

Моделирование потока пешеходов на физическом уровне

Исследование поведения пешеходов на физическом уровне осуществляется методом граничных элементов моделирования потока жидкости и определения свойств потока на основе известных условий на краях области, что позволяет обеспечить выполнение условия ограниченного наблюдения [1]. Данный метод позволяет оценить направление и скорость движения в любой точке исследуемой области, что является основой моделирования движения отдельных пешеходов.

Будем рассматривать процесс движения пешеходов на плоскости как движение непрерывной среды. Движение среды задано, если в любой момент времени t можно определить векторное поле (см. рис. 1-б) скоростей ее частиц $V(x,t)$ в любой точке x области S с границей Γ (см. рис. 1-а). Поэтому для моделирования пешеходных потоков необходимо уметь восстанавливать значение поля скоростей в любой точке $x \in S$ при известных граничных значениях.

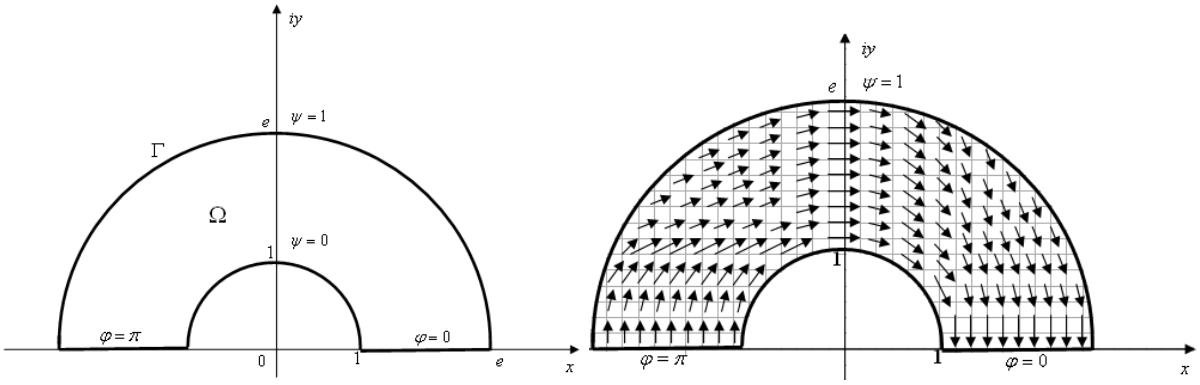


Рис. 1 а) Исходные данные примера; б) Определение векторов направлений движения среды.

Для векторного поля $V(x,t)$ через S определен поток

$$\Phi = \int_s V(x,t) \cdot n \; dS \, ,$$

который в данном случае представляет собой количество пешеходов, перемещающихся через область S за единицу времени. Будем считать характер движения пешеходов потенциальным, т.е. допустим существование скалярного потенциала скоростей $\varphi(x,t)$, такого, что

$$V = grad\varphi \tag{1}$$

Потенциал φ является гармонической функцией:

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = 0. \tag{2}$$

Таким образом, если считать движение потенциальным, то исследование пешеходного потока в каждой точке области сводится к отысканию гармонической функции φ, удовлетворяющей граничным условиям. Потенциал скоростей φ на плоскости удовлетворяет двумерному уравнению Лапласа

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = 0, \tag{3}$$

а его частные производные являются компонентами скорости:

$$V_x = \frac{\partial\varphi}{\partial x}, V_y = \frac{\partial\varphi}{\partial y}. \tag{4}$$

Для удобства введем функцию тока $\psi = \psi(x, y)$, которая в паре с потенциалом $\varphi(x, y)$ будет удовлетворять условиям Коши-Римана:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial x} = \frac{\partial\psi}{\partial y}, \frac{\partial\varphi}{\partial y} = -\frac{\partial\psi}{\partial x} \, . \tag{5}$$

Функция тока является гармонической и удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\Delta\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} = 0\,. \tag{6}$$

Построим комплексную функцию ω

$$\omega(z) = \varphi(x,y) + i\,\psi(x,y), \tag{7}$$

зависящую от переменной $z = x + iy$, $(x,y) \in S$, компонентами которой являются потенциал скоростей и функция тока соответственно. Функцию $\omega(z)$ будем называть комплексным потенциалом. Из условий (5) следует, что $\omega(z)$ аналитична в односвязной области S с границей Γ. Поэтому для $\omega(z)$ во всех внутренних точках $z_0 \in S$ применима интегральная формула Коши:

$$\omega(z) = \frac{1}{2\pi i}\int \frac{G_1(\xi)d\xi}{\xi - z}, \quad z \in S \tag{8}$$

где z - внутренняя точка области (z не принадлежит границе Γ), а интеграл понимается в обычном смысле. Граничные значения функции $\omega(z)$ нам не известны. Их можно получить, вычислив интеграл Коши (5) в смысле главного значения для граничной точки z, и для потенциала получить линейные уравнения (6) (см. [2]):

$$\begin{aligned} 2\pi i\,\omega(z_k) = \omega_k \ln\left(\frac{z_{k+1}-z_k}{z_{k-1}-z_k}\right) + \\ + \sum_{j\neq k}\left(\frac{z_k - z_j}{z_{j+1}-z_j}\,\omega_{j+1} - \frac{z_k - z_{j+1}}{z_{j+1}-z_j}\,\omega_j\right)h_{j,k} \end{aligned} \tag{9}$$

где величины h_j в формуле (6) определяются в виде

$$h_{j,k} = \ln\left(\frac{z_{j+1}-z_k}{z_j - z_k}\right) = \ln\left|\frac{z_{j+1}-z_k}{z_j - z_k}\right| + i\left(\arg\left(z_{j+1}-z_k\right) - \arg\left(z_j - z_k\right)\right) \tag{10}$$

Записывая уравнение (9) для каждого узла границы и разделив мнимые и действительные части, получим линейную систему уравнений

$$AX + iBX = 0\,, \tag{11}$$

относительно неизвестных составляющих комплексного потенциала $\omega_j = \varphi_j + i\psi_j$, где A и B - вещественные матрицы, а вектор X состоит из известных и неизвестных компонент потенциала в узловых точках. Дальнейшее разделение вещественных и мнимых частей приводит к чисто вещественной системе линейных уравнений относительно неизвестных компонент потенциала, решив которую, получаем все значения $X = X(\varphi_1, \psi_1, \varphi_2, \psi_2, \ldots, \varphi_m, \psi_m)$ в узловых точках. На основании полученных данных можно построить комплексный потенциал в любой точке z области S :

$$2\pi i\,\omega(z) = \sum_j \left(\frac{z_k - z_j}{z_{j+1}-z_j}\,\omega_{j+1} - \frac{z_k - z_{j+1}}{z_{j+1}-z_j}\,\omega_j\right)h_j\,, \tag{12}$$

действительная часть которого даст значение потенциала скоростей в точке z (рис. 2):

$$\varphi(x,y) = \mathrm{Re}(\omega(z)) = \mathrm{Re}(\omega(x,y))\,.$$

С помощью соотношения (12) можно восстановить значения потенциала φ во всех внутренних точках области S, а, стало быть, восстановить поле направлений V :

$$\vec{V}(x,y) = \left(\frac{d\varphi}{dx}, \frac{d\varphi}{dy}\right) \text{ или } V_x = \frac{d\varphi}{dx}, V_y = \frac{d\varphi}{dy}\,,$$

где V_x, V_y - компоненты вектора скорости в каждой точке области.

Моделирование движения пешеходов на психологическом уровне

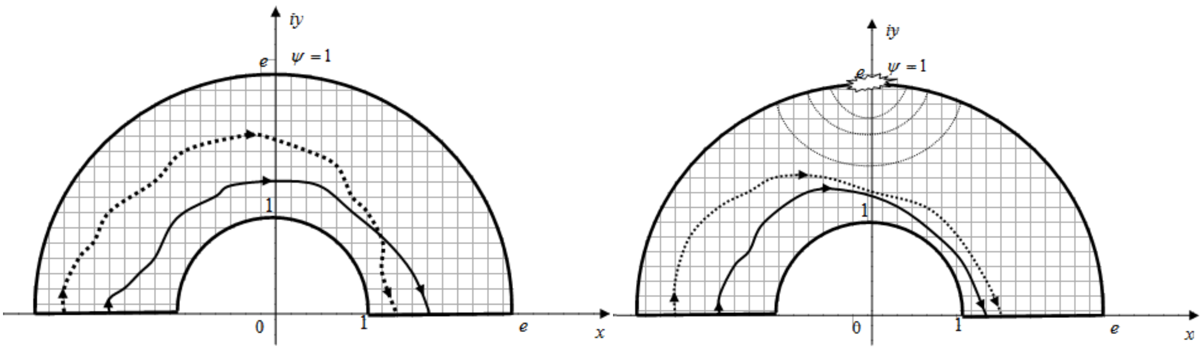
На психологическом уровне рассматривается агентная модель движения пешеходов, основанная на поведении каждого отдельного пешехода. При этом вектор и скорость движения агента является суммой детерминированной и случайной составляющих

$$\alpha_k = \alpha(x, y) + \varepsilon_k , \qquad (13)$$

где α_k - направление (угол) движения агента; $\alpha(x, y)$ - направление движения в точке пространства согласно выражению (12); ε_k - случайная составляющая направления движения пешехода. В наиболее простом случае случайная составляющая следует нормальному распределению с нулевым средним и дисперсией σ^2. Скорость перемещения агента зависит от состояния агента, среди которых рассматриваются: спокойный, возбужденный, паникующий, неподвижный.

Величина ε_k не всегда центрирована. Как было отмечено выше, при возникновении чрезвычайной ситуации возможно появление препятствий на пути агентов в виде очагов возгорания, разрушений, затоплений и пр. Все эти препятствия негативно влияют на поведение агентов и провоцируют отклонение от исходного маршрута.

Моделирование подобного эффекта в представленной модели осуществляется за счет смещения среднего величины ε_k: $M\varepsilon_k = f(r_{ij})$, где r_{ij} - расстояние между i-м агентом до j-ого источника опасности. Данный подход позволяет учесть часто неадекватное и паническое поведение людей в условиях чрезвычайной ситуации.



а) б)

Рис. 2 Расчетные траектории движения агентов а) в возбужденном состоянии и в состоянии паники; б) при наличии препятствия.

Выводы

Рассмотренный подход позволяет осуществлять моделирования движения агентов в условиях чрезвычайной ситуации учитывая наличия на пути различных препятствий и наличия паники среди агентов. Особенностью рассмотренного метода является двухуровневый подход к моделированию поведения агентов – физический и психологический. На физическом уровне восстанавливается поле потенциалов движения вещества в рассматриваемой области по данным наблюдений на границах области, на психологическом рассматривается случайное поведение каждого отдельного агента. При этом решение задачи на физическом уровне является непрерывным в пространстве и во времени, что существенно расширяет возможности данного подхода.

Решение поставленной задачи позволяет осуществлять оперативный контроль ситуации в случае возникновения чрезвычайной ситуации и снизить возможные потери по результатам моделирования поведения людей при различных сценариях развития чрезвычайной ситуации.

Литература

1. *Афанасьев К.Е., Стуколов С.В*. КМГЭ для решения плоских задач гидродинамики и его реализация на параллельных компьютерах: Учебное пособие. – Кемерово: КемГУ, 2001. - 208с.
2. *Громадка II Т., Лей Ч.* Комплексный метод граничных элементов в инженерных задачах. – М: «Мир», 1990. - 303с.
3. *Коннор Дж.,Бреббия К.* Метод конечных элементов в механике жидкости. Л.: Судостроение, 1979. 204 с.
4. *Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.* Методы теории функций комплексного переменного. – М.: Наука. Гл. ред. физ. -мат. лит., 1973. -749 с
5. *Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.* Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977. 407 с.
6. *Г. Г. Малинецкий, М. Е. Степанцов*. Применение клеточных автоматов для моделирования движения группы людей. // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 44:11 (2004), С. 2094–2098.
7. *Патрикеев И.М., Жуков В.Е.* Моделирование движения пешеходов в городских условиях. // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вып. 90 – 2009. – С. 406-412.
8. *М.Е. Степанцов*. Математическая модель направленного движения группы людей. // Матем. моделирование, 16:3 (2004), С. 43–49.
9. *M. Apel, K.T. Walder*, Simulation of pedestrian flows based on the Social Force Model Using the Verlet Link Cell Algorithm, Karl-Scharfenberg-Fakult at Salzgitter, Institut fur Simulation und Modellierung.
10. *Helbing*, Social force model for pedestrian dynamics, Physical review E, May 1995.
11. *Helbing*, Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations, Pedestrian and Evacuation Dynamics Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg; New York (2002) pp. 21-58.
12. *Ramin Mehran, Alexis Oyama, Mubarak Shan*, Abnornal Crowd Behavior Detection using Social Force Model, IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recongition (CVPR), Miami, 2009.