

Формалізація та постановка задач моделювання руху гетерогенних потоків людей

Валентина Комяк

Доктор техн. наук, професор. Національний університет цивільного захисту України, 61046, м. Харків, Чернишевська вул., 94, vkomyak@ukr.net.

Як показують дослідження, існує зв'язок між щільністю потоку і категорією комфортності руху. В даній роботі запропоновані методи моделювання руху людей в залежності від категорії комфортності руху. Показано, що зміна категорії комфортності руху потоку людей може бути врахована в способі індивідуально поточного руху як шляхом зміни просторової форми об'єктів, так і заданням різних мінімально та максимально допустимих відстаней між ними. Невід'ємною частиною цих задач є врахування умов не перетинання об'єктів та умов їх включення в шляхи та засоби евакуації. Отримано аналітичні вирази умов не перетинання об'єктів нових просторових форм та умов їх розміщення в областях з урахуванням відстаней між ними за допомогою нормалізованих квазі- ρ -функцій, на базі яких побудовані нові моделі руху гетерогенних потоків людей.

Ключові слова: математичне моделювання, геометричне проектування, аналітичний опис умов не перетинання, модель руху гетерогенних потоків

Вступ. Взаємодія матеріальних об'єктів, що беруть участь в процесі синтезу складних систем, вимагає враховувати їх просторову форму, метричні характеристики, а також обмеження на їх розміщення. У загальному випадку синтез оптимальних конфігурацій [1] складних систем, як правило, пов'язаний з задачами оптимізації розміщення (покриття, розбиття) просторових об'єктів заданої форми. Напрямок досліджень, що розглядається, відноситься до теорії геометричного проектування, основи якої закладені в роботі [2], і пов'язані з математичним моделюванням геометричних об'єктів та їх взаємних відносин [3].

Однією з задач геометричного проектування є задача моделювання руху людей із осередку розвитку надзвичайних ситуацій (НС). Моделювання людських потоків реалізує можливість візуалізації конфігурації розміщення людей в процесі їх евакуації, а також проведення оптимізації їх руху з вибором раціональних шляхів евакуації у випадку необхідності. Тому актуальною задачею є розробка нових методів моделювання переміщення людей, що адекватно відображають процес їх руху.

1. Метод моделювання руху людей по шляхам з гетерогенним потоком

В результаті аналізу експериментальних даних з літературних джерел отримано параметри, які впливають на рух людей в потоці. Зокрема, встановлено взаємозв'язок між щільністю потоку і категорією комфортності руху.

В роботі запропоновані методи моделювання руху людей по горизонтальним шляхам в залежності від категорії комфортності їх руху. Розглядають вільний, індивідуально-поточний рух потоку, злитий рух, рух людей з силовим впливом з деформацією тіл та із їх вдавненням [4]. Показано, що зміна категорії руху може бути здійснена, як завданням відстаней між людьми, так і зміною їх просторових форм. Так вільний та індивідуально-поточний рух реалізується завданням мінімально-допустимих відстаней між людьми. Коли розглядається задача моделювання руху людей з розбиттям їх на групи, треба враховувати максимально-допустимі відстані між членами груп. Для врахування відстаней між об'єктами в роботі модифіковано нормалізовані ϕ -функції [3] об'єктів, які є моделями людей. Коли розглядається задача моделювання руху людей з силовим впливом з деформацією тіл, люди представляються трикомпонентними моделями, кожна з яких може обертатись в антропологічно-допустимих межах.

Запропоновано метод моделювання руху людей по горизонтальним евакуаційним шляхам з гетерогенним потоком людей, складовими якого є :

- формалізація та постановка задачі моделювання руху людей при вільному індивідуальному та індивідуально-поточному русі гетерогенних потоків людей з контактними перешкодами та без перешкод по горизонтальним шляхам;
- формалізація та постановка задачі моделювання руху людей при активному їх русі з силовими діями при природних деформаціях їх тіл;
- формалізація та постановка задачі рятування людей при їх русі з вантажем по горизонтальним шляхам;
- алгоритм методу евакуації людей із зони НС по евакуаційним шляхам з гетерогенним потоком людей.

1.1 Модель евакуації людей при вільному індивідуальному та індивідуально-поточному русі гетерогенних потоків з контактними перешкодами та без перешкод по горизонтальним шляхам. Нехай на k -ій ітерації (в k -ій інтервал часу) в області евакуації Ω_m знаходиться N_k людей, що представленні еліпсами з параметрами розміщення $u_i = (x_i, y_i, \theta_i)$, позначимо їх, як $S_i(u_i)$ та N_i областей заборони $S_i(u_i)$ з параметрами розміщення $u_i = (x_i, y_i, \theta_i)$. Для кожної поточної точки з координатами $g_i(x_i, y_i)$ визначається вектор швидкості $\bar{v}_i = (v_{i,x}, v_{i,y})$ і маневреності $m_i, m_i < 1$ (в метрах).

Тоді математична постановка задачі на k -ій ітерації може бути сформульована у вигляді пошуку максимуму сукупного переміщення людей, що знаходяться в області рятування з урахуванням обмежень на умови їх не перетинання, умови не перетинання з областями заборони та умови розміщення з дотриманням заданих мінімальних допустимих відстаней, викликаних комфортністю руху, обмежень на маневреність руху, тобто необхідно знайти

$$F(u^*) = \max_{u \in W_k \subset R^n} F(u), \quad (1)$$

$$W_k = \{u \in R^n : \gamma_{ij} \geq 0; \gamma_i \geq 0; \gamma_{it} \geq 0; T_i \geq 0; i < j \in I_{N_k}, t \in I_{N_t}\}, \quad (2)$$

де $u = (\Delta t_1, z_1, x_1, y_1, \theta_1, \Delta t_2, z_2, x_2, y_2, \theta_2, \dots, \Delta t_{N_k}, z_{N_k}, x_{N_k}, y_{N_k}, \theta_{N_k})$, $n = 5N_k$,

$$F(u) = \Delta t \sum_{i=1}^{N_k} \Delta t_i \left| \begin{matrix} \rightarrow \\ v_{ki} \end{matrix} \right|,$$

$$\gamma_{ij} \geq 0: \bar{\Phi}_-(x_i, y_i, \theta_i, x_j, y_j, \theta_j) \geq 0, \quad (3)$$

$$\gamma_{it} \geq 0: \bar{\Phi}_-(x_i, y_i, \theta_i, x_t, y_t, \theta_t) \geq 0, \quad (4)$$

$$\gamma_i \geq 0: \bar{\Phi}_-(x_i, y_i, \theta_i, x_0, y_0, \theta_0) \geq 0, i < j \in I_{N_k}, t \in I_{N_t}, \quad (5)$$

$$T_i \geq 0: \begin{cases} 0 \leq \Delta t_i \leq 1, \\ -m_i \leq z_i \leq m_i, i \in I_{N_k} \end{cases}, \quad (6)$$

$$x_i = x_{ki} + v_{ki,x} \Delta t_i \Delta t - z_i d_{ki}^y \Delta t_i, y_i = y_{ki} + v_{ki,y} \Delta t_i \Delta t + z_i d_{ki}^x \Delta t_i,$$

$\theta_i = \theta_{ki} + \Delta_{ki} \Delta t_i$, вирази (3)–(5) описують відповідно умови неперетинання людей між собою, між людьми та областями заборони, умови розміщення їх на горизонтальному шляху з урахуванням мінімально-допустимих відстаней за допомогою нормалізованих *phi*-функцій [3], (6) – обмеження на часовий крок та маневреність людей при русі, Δt_i – відносний крок в часі руху *i*-ої людини,

$$\Delta_{ki} = \bar{\theta}_{ki} - \theta_{ki}, \quad \bar{\theta}_{ki} \quad - \quad \text{кут} \quad \text{повороту} \quad \text{еліпса} \quad \text{в} \quad \text{точці} \quad (x_{ki} + v_{ki,x} \Delta t_i \Delta t, y_{ki} + v_{ki,y} \Delta t_i \Delta t).$$

Проаналізовані властивості моделі, показано, що задача умовної оптимізації (1)–(6) є *NP*-складною задачею нелінійного програмування. Для її розв'язання запропоновано наступний алгоритм.

Алгоритм.

Крок 1. Горизонтальний шлях задається у вигляді дерева (графа). Ребра – сегменти коридорів, вершини – перехрестя і точки «склеювання» сегментів. Сегмент може мати змінну ширину. Для кожної точки сегмента розраховується відстань до виходу і напрямок переважного руху.

Крок 2. На область евакуації накладається сітка з досить дрібним кроком для визначення щільності потоку.

Крок 3. Об'єкти сортируються за зростанням відстані до виходу.

Крок 4. В порядку сортування, для кожного з об'єктів за координатами положення центру і кутом повороту визначаються локальна щільність потоку і переважний напрямок руху.

Крок 5. Для обраного переважного напрямку руху в межах кута маневреності вибирається дискретно певне число напрямків і серед них

відшукується напрямок, по якому за вибраний інтервал часу здійснюється максимальне переміщення без порушень меж сегментів і без перетинання з іншими об'єктами та областями заборони.

Крок 6. Отримані значення швидкості і відстані коригуються з урахуванням категорії комфортності (тобто враховуються сили «відштовхування» завданням мінімально-допустимих відстаней між людьми).

1.2 Формалізація та постановка задачі евакуації людей при активному русі людей з силовими діями в межах природних деформацій їх тіл [5]. Деформація тіла людини розглянута на прикладі силового впливу на плече людини в рамках допустимих антропологічних обмежень.

Запропоновано аналітичну та геометричну трикомпонентні моделі людського тіла, які враховують умови об'єднання складових моделі в єдиний складний об'єкт та враховують співвідношення кутів обертання компонент, що виникають внаслідок антропологічних обмежень на положення частин тіла при силових діях.

Розглянемо формалізацію задачі евакуації людей з силовим впливом. Нехай N_k людей представлені трикомпонентними моделями. Математичну постановку евакуації людей з силовими діями можна представити у вигляді (1)–(6) із заміною в (3) умов на умови не перетинання трикомпонентних моделей людей між собою та умов їх розміщення в області (5) з доповненням умовами «склеювання» складових моделей в один об'єкт та обмежень на кути повороту компонент.

Модифіковано алгоритм індивідуально-поточного руху людей шляхом реалізації умов не перетинання трикомпонентних об'єктів та умов їх розміщення на горизонтальному шляху на кроці 5.

1.3 Формалізація та постановка задачі евакуації людей з вантажем по горизонтальним шляхам. Слід визначити, що при моделюванні руху людей відсутня необхідність моделювання обмежень з точністю, що потрібна при розв'язанні задач, що виникають на практиці. Тому при моделюванні руху людей в роботі пропонується використовувати деякі апроксимуючі процедури. Як приклад, в даній роботі наведено наближена квазі-phi-функція для моделювання обмежень на максимально припустиму відстань для двох об'єктів $E_i(u_i)$ і $T_j(u_j)$:

$$\Phi_{+}^{E_i T_j}(u_i, u_j, u_{ij}) = \min\{ \varphi^{\bar{E} t_{ij}}(u_i, t_{ij}), \varphi^{T_j t_{ji}}(u_j, t_{ji}), f(t_{ij}, t_{ji}) \} \quad (7)$$

де для об'єктів $E_i(u_i)$ (еліпса) і $T_j(u_j)$ (прямокутника) вводяться додаткові змінні

$t_{ij}=(x_{ij}, y_{ij})$, $t_{ji}=(x_{ji}, y_{ji})$, $\varphi^{\bar{E} t_{ij}}(u_i, t_{ij})$ – функція належності точки t_{ij} об'єкту

$\bar{E}_i = R^2 \setminus E_i$, $\varphi^{T_j t_{ji}}(u_j, t_{ji})$ – функція належності точки t_{ji} об'єкту $T_j(u_j)$,

$f(t_{ij}, t_{ji}) = \sqrt{\delta_{ij}^2 - (x_{ij} - x_{ji})^2 - (y_{ij} - y_{ji})^2}$, δ_{ij} – максимально припустима відстань.

В роботі формалізована та поставлена задача переміщення людей з вантажем (тобто об'єктів складної просторової форми з урахуванням максимально-допустимих відстаней між ними). Додатково в модель вводяться коефіцієнти стабільності швидкості $k_{ji} \in [0,1]$ та маневреності $k_{2i} \in [0,1]$, які задають готовність індивіда тимчасово прискорюватися, тобто йти на “обгін” для займання кращої позиції. Проаналізовані властивості моделі та модифіковано алгоритм індивідуально-поточного руху людей на етапі побудови області допустимих розміщень людини з вантажем.

Висновки. Отримано зв'язок між способами моделювання руху потоку людей та рівнем комфортності їх руху. Показано, що зміна категорії комфортності руху потоку людей може бути врахована в способі індивідуально поточного руху як шляхом зміни просторової форми об'єктів, так і завданням різних мінімально та максимально допустимих відстаней між ними.

Література

- [1] Stoyan Y.G., Yakovlev S.V. Configuration space of geometric objects. Cybernetics and Systems Analysis. 2018. Vol. 54. 5. P. 716–726.
- [2] Яковлев С.В., Гиль Н.И., Комяк В.М. и др. Элементы теории геометрического проектирования / Под ред. В.Л. Рвачева. К.: Наук, думка, 1995. 241 с.
- [3] Stoyan Y., Romanova T., Pankratov A., Chugay A. Optimized object packings using quasi-phi-functions. Springer Optimization and Its Applications. Springer. Cham, 2015. Vol. 105. P. 265–293.
- [4] Холщевников В.В., Самошин Д.А. Эвакуация и поведение людей на пожарах: учебное пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. 210 с.
- [5] Komyak Va, Komyak Vl. Pankratov A. (2021). Mathematical and Computer Modeling of Active Movement of People during Evacuation from Buildings. Part of the IFIP Advances in Information Technology in Disaster Risk Reduction book (series IFIPAICT), 2021. Vol. 622. P. 245–258.

Formalization and formulation of problems of modeling the movement of heterogeneous flows of people

Valentina Komyak

Studies show that there is a relationship between the flow density and the category of traffic comfort. In this paper, methods for modeling the movement of people depending on the category of comfort are proposed. It is shown that a change in the comfort category of the flow of people can be taken into account in the method of individual flow movement both by changing the spatial shape of objects and by setting different minimum and maximum allowable distances between them. An integral part of these tasks is to take into account the conditions for not crossing objects and the conditions for their inclusion in the ways and means of evacuation. Analytical expressions of the conditions of non-intersection of objects of new spatial forms and the conditions of their placement in regions, taking into account the distances between them, were obtained using normalized quasi-phi-functions, on the basis of which were built new models of the movement of heterogeneous flows of people.

Отримано 30.03.23