УДК 519.6

В.М. КОМЯК
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна,
e-mail: *vkomyak@ukr.net*.

В.В. КОМЯК
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна,
e-mail: *vvkomyak@ukr.net, post@nuczu.edu.ua*.

К.Т. КЯЗІМОВ
Академія МНС Азербайджанської Республіки, Баку, Азербайджан,
e-mail: *kazim.kazimov@fhn.gov.az*.

ЗАДАЧА МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ГЕТЕРОГЕННИХ ПОТОКІВ ЛЮДЕЙ ЯК ЗАДАЧА ГЕОМЕТРИЧНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

Анотація. Показано, що однією з актуальних прикладних задач класу геометричного проєктування є задача моделювання руху гетерогенних потоків людей. Запропоновано математичну модель, методи та алгоритми моделювання руху гетерогенних потоків людей, що ґрунтуються на застосуванні методів локальної оптимізації переміщення геометричних об'єктів з урахуванням зміни їхньої просторової форми та метричних характеристик. Ці алгоритми базуються на аналітичному описі умов неперетину об'єктів з урахуванням їхніх неперервних трансляцій та обертань.

Ключові слова: конфігураційний простір, узагальнені змінні, розміщення, моделювання руху потоків людей, математична модель.

ВСТУП. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

До класу задач геометричного проєктування, які зводяться до оптимізаційного відображення вхідної геометричної інформації у деяку абстрактну множину відповідної структури з виконанням заданого набору обмежень, належать задачі розміщення, покриття, розбиття, які є математичними моделями багатьох актуальних практичних задач.

Однією з таких проблем є задача моделювання руху гетерогенних потоків людей, що дає змогу оперативно оцінити час руху людей і прийняти рішення щодо вибору безпечних шляхів.

Моделі та методи моделювання руху людей і транспортних потоків і на сьогодні залишаються актуальними в тих галузях, формалізація яких недостатня для застосування наявних моделей та методів, що зумовлено необхідністю врахування особливостей аналізованої предметної галузі. Це також визначає потребу у побудові нових математичних моделей, формулюванні постановок нових задач та розробленні ефективних методів та алгоритмів їхнього розв'язання.

У цій роботі за результатами аналізу актуальних задач моделювання руху потоків людей побудовано математичну модель окремої задачі цього класу, властивості якої визначають підходи до її розв'язання та дають змогу використовувати відомі методи та розробляти нові методи та алгоритми.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В індивідуально-потокових моделях руху людей використовують представлення потоку людей як сукупності індивідуумів у вигляді геометричних об'єктів з урахуванням їхньої форми та метричних характеристик. Зміна комфортності переміщення потоків людей залежить як від форми об'єктів, так і від допустимих відстаней між людьми [1, 2].

Зміну просторової форми об'єктів у разі силових дій можна формалізувати, використовуючи представлення проєкції тіла людини у вигляді складних об'єктів, що являють собою об'єднання еліпсів, основний з яких здійснює неперервний поворот у межах кута маневреності, а допоміжні виконують неперервні повороти навколо точок «склеювання» еліпсів з основним з урахуванням антропологічних обмежень [2].

Для характеристики взаємного положення індивідів у потоці людей застосовуються умови попарного неперетину геометричних об'єктів [2, 3]. Для розрахунку швидкості, маневреності та відхилення від основного напряму руху використовують спеціальні коефіцієнти [2].

За результатами аналізу пакетів програм моделювання руху потоків людей можна висновувати, що не існує моделей індивідуально-потокового руху людей, які були б адекватні реальному потоку [4]. Актуальність таких моделей зумовлена потребою у дослідженнях руху людей з обмеженими мобільними можливостями в потоці змішаного складу в достатньо широкій номенклатурі громадських будівель різних класів функціональної пожежної небезпеки.

КОНФІГУРАЦІЙНИЙ ПРОСТІР ТА УЗАГАЛЬНЕНІ ЗМІННІ ЗАДАЧІ РОЗМІЩЕННЯ СКЛАДНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ. КОНФІГУРАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ

Конфігураційний простір геометричних об'єктів базується на формалізації поняття геометричної інформації. Геометрична інформація $G=(\{s\},\{\mu\},\{u\})$ щодо еліпса E містить дані про просторову форму $\{s\}$, його метричні характеристики $\{a, b\}$ (a, b — півосі еліпса) і параметри розміщення $\{u\}$. Представимо просторову форму $\{s\}$ геометричного об'єкта рівнянням його межі у вигляді $f(\mu, u)=0$, де $u=(x, y, \theta)$, а $\mu=(a, b)$ — константи, що характеризують його метричні властивості, назвемо їх параметрами просторової форми s об'єкта.

Зв'яжемо з об'єктом E власну систему координат, початок якої — полюс об'єкта. У разі афінних перетворень рух об'єкта змінює положення його власної системи координат відносно нерухомої системи координат простору R^2. Для характеристики такого стану задамо параметри розміщення $u=(x, y, \theta)$, $v=(x, y)$ — вектор трансляції відносно нерухомої системи координат, θ — кут повороту.

Сформуємо конфігураційний простір ΞE об'єкта E з узагальненими змінними: метричними параметрами $\mu=(a, b)$ і параметрами розміщення $u=(x, y, \theta)$. Тоді кожна точка $G=(\mu, u)=(a, b, x, y, \theta)$ конфігураційного простору ΞE визначає геометричний об'єкт $E(G)\subset R^2$.

Здійснимо параметризацію підмножин $S_i=\{E_c^i, E_l^i, E_r^i\}$, $i\in I_n=\{1,2,\ldots,n\}$. Використовуючи теоретико-множинні операції, сформуємо складний об'єкт

$$H_i=E_c^i\cup E_l^i\cup E_r^i. \qquad (1)$$

Назвемо об'єкти E_c^i, E_l^i, E_r^i базовими.

Нехай об'єкт E_c^i має форму s_c^i, метричні параметри $\mu_c^i=(a_c^i, b_c^i)$ і параметри розміщення $u_c^i=(x_c^i, y_c^i, \theta_c^i)$. Об'єкти E_l^i, E_r^i мають форму s_l^i, s_r^i, метричні параметри $\mu_l^i=(a_l^i, b_l^i)$, $\mu_r^i=(a_r^i, b_r^i)$, параметри розміщення $u_l^i=(x_l^i, y_l^i, \theta_l^i)$ та $u_r^i=(x_r^i, y_r^i, \theta_r^i)$ відповідно.

Нехай $\Sigma=\{H_1, H_2, \ldots, H_i, \ldots, H_n\}$ — вихідна множина геометричних об'єктів з узагальненими змінними $G_{ii}^i=(\mu_{ii}^i, u_{ii}^i)$, $ii=c, l, r$; $i=1,2,\ldots,n$, а $\{s_c, s_l, s_r\}$ — множина їхніх можливих просторових форм (у цьому випадку еліпсів). Кожній точці $G_{ii}^i\in\Xi(H_i)$ відповідає параметризований геометричний об'єкт $H_i(G_{ii}^i)\subset R^2$.

Конфігураційний простір матиме вигляд $\Xi\Sigma = \Xi H_1 \times \Xi H_2 \times \ldots \times \Xi H_n$ з узагальненими змінними $G = (G_c^i, G_l^i, G_r^i)$, $i = 1, 2, \ldots, n$.

Використовуючи теоретико-множинні операції, сформуємо складний геометричний об'єкт $S_p = P(H_1, H_2, \ldots, H_i, \ldots, H_n)$ $(S_p = H_1 \bigcup H_2 \bigcup \ldots \bigcup H_i \bigcup \ldots \ldots \bigcup H_n)$. Оператор $P : \Sigma \to S_p$ задає структуру складного об'єкта. Тоді складному об'єкту S_p в конфігураційному просторі $\Xi\Sigma$ відповідатиме параметризований геометричний об'єкт $S^p(H_1(G_c^1, G_l^1, G_r^1), \ldots, H_n(G_c^n, G_l^n, G_r^n)) = P(H_1(G_c^1, G_l^1, G_r^1), \ldots \ldots, H_n(G_c^n, G_l^n, G_r^n))$.

Означення 1 [5, 6]. Відображення $w : \Sigma \to \Xi\Sigma$ множини геометричних об'єктів $\Sigma = \{H_1, H_2, \ldots, H_i, \ldots, H_n\}$ в конфігураційний простір $\Xi\Sigma$, яке задовольняє задані обмеження, визначає просторову конфігурацію геометричних об'єктів H_i, $i = 1, 2, \ldots, n$.

Позначимо ΞS_0 конфігураційний простір області (об'єкта) S_0 з узагальненими змінними $G_0 = (\mu^0, u^0)$ і нехай $v^0(0,0)$ — початок власної нерухомої системи координат, $\mu^0 = (L, W)$. Нехай також $\Sigma^0 = \Sigma \bigcup S_0$, аналогічно викладеному вище сформуємо конфігураційний простір $\Xi\Sigma^0 = \Xi S_0 \times \Xi H_1 \times \Xi H_2 \times \ldots \times \Xi H_n$.

Уведемо поняття просторової конфігурації розміщення. Для формування системи обмежень Λ задамо на множині об'єктів із області Σ^0 бінарні відношення [5]:

а) неперетину $\{*\}$, тобто $H_i(G_{ii}^i) * H_j(G_{ii}^j)$, якщо $\operatorname{int} H_i(G_{ii}^i) \bigcap \operatorname{int} H_j(G_{ii}^j) = \varnothing$, $i < j + 1 \in I_{n-1}$, $ii = c, l, r$;

б) включення $\{\circ\}$, тобто $H_i(G_{ii}^i) \circ S_0(G_0)$, якщо $\operatorname{int} H_i(G_{ii}^i) \subset S_0(G_0)$ $\forall i = 1, 2, \ldots, n$.

Означення 2. Відображення $w : \Sigma^0 \to \Xi\Sigma^0$ задає конфігурацію розміщення, якщо $H_i(G_{ii}^i) * H_j(G_{ii}^j)$, $H_i(G_{ii}^i) \circ S_0(G_0)$ $\forall i, j \in I_n$, $ii = c, l, r$.

Приклад конфігурації розміщення трикомпонентних об'єктів наведено на рис. 1.

ЗАДАЧА МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ГЕТЕРОГЕННИХ ПОТОКІВ ЛЮДЕЙ ЯК ЗАДАЧА ГЕОМЕТРИЧНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

Розглянемо задачу моделювання руху людей по тілесній мережі [7], що знаходиться на горизонтальній площині, позначимо її як область S_0. Цю область розділимо на підобласті (з номерами відповідно $1, 2, , \ldots, m$), обмежені прямими лініями (назвемо їх роздільниками), для яких виконуються вимоги $A_i \in \operatorname{Fr} S_0$, $i = 1, 2, , \ldots, m-1$ (рис. 2). Для визначення основного напрямку руху позначимо m-у область S_{0m}; при цьому роздільник здійснює трансляцію для областей із прямолінійним рухом так, щоб йому належала аналізована точка. Для цих областей переміщення з аналізованої точки

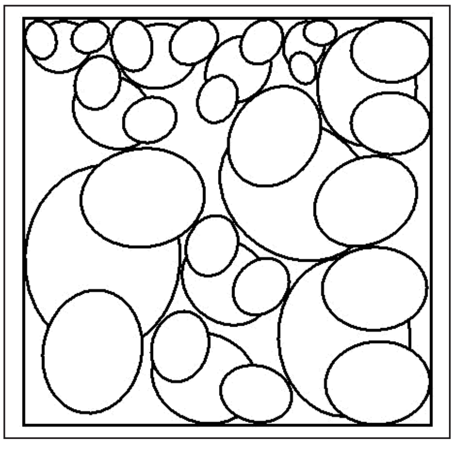

Рис. 1. Конфігурація розміщення трикомпонентних об'єктів з урахуванням неперервних трансляцій основних (великих) еліпсів за умови неперервних поворотів основного та допоміжних еліпсів, що утворюють складний об'єкт

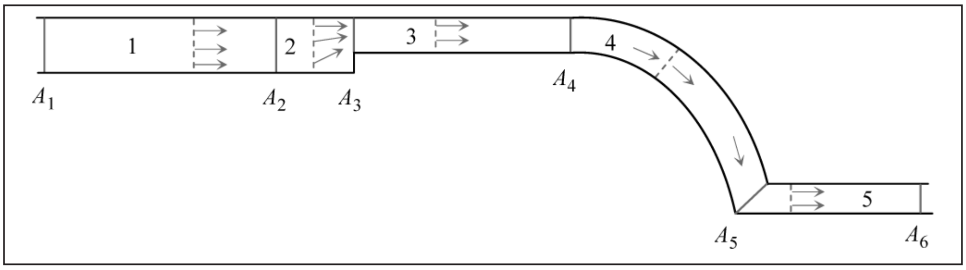

Рис. 2. Зображення шляху руху

визначаємо у вигляді вектора, що з'єднує задану точку з точкою на відповідному роздільнику (з урахуванням коефіцієнта гомотетії). Для кожної поточної точки з координатами $g^i(x^i, y^i)$ (координатами розміщення *i*-ї людини) визначається вектор швидкості $\vec{v}_i(x^i, y^i)$. Він залежить від локальної щільності потоку, яка не повинна перевищувати допустимих значень.

Не обмежуючи загальності міркувань, припустимо, що кожен індивід можна представити трикомпонентною моделлю з урахуванням умов об'єднання компонентів моделі в єдиний складний об'єкт (в точках «склеювання») та з обмеженнями кутів повороту компонент відносно цих точок [2]. Позначимо горизонтальну проєкцію тіла людини об'єднанням трьох еліпсів: основного E_c і двох допоміжних E_l, E_r (рис. 3). Еліпси E_c і E_r мають точку склеювання g_r, а еліпси E_c і E_l — точку склеювання g_l. Точки g_r і g_l належать великій півосі еліпса E_c і розташовані симетрично щодо його малої півосі. Положення точок g_r і g_l на площині визначають тільки параметри розміщення еліпса E_c. Еліпси E_l і E_r можуть тільки здійснювати поворот на кути в заданому діапазоні $(-\alpha_1, +\alpha_2)$ (відносно кута повороту еліпса E_c) відносно цих точок.

Для кожного індивіда, який опинився в області руху, на кожному k-му кроці (із заданим часовим інтервалом, наприклад $\Delta t_k = 1$ с) визначаємо основний напрямок. Далі незначно змінюються індивідуальні характеристики (швидкість, напрямок, маневреність руху тощо). Кут повороту складного об'єкта — це кут між перпендикуляром до великої півосі основного еліпса і вектором основного напрямку руху.

У цій роботі математичну модель підзадачі на k-й ітерації сформульовано як знаходження максимуму сукупного переміщення *n* людей у напрямку руху за час Δt_k, що перебувають в області S_0, з урахуванням обмежень на умови їхнього неперетину, умови розміщення людей на ділянці з дотриманням заданих мінімальних допустимих відстаней, заданих технологічними обмеженнями (комфортність руху, обмеження маневреності руху тощо).

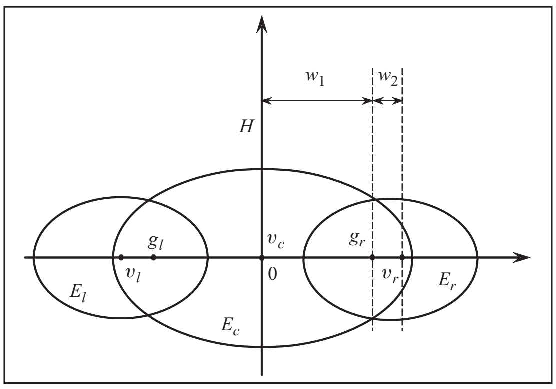

Рис. 3. Трикомпонентна модель проєкції тіла людини на горизонтальну площину

Покажемо, що сформульована задача належить класу задач геометричного проєктування [7] і зводиться до відображення деякої вихідної множини елементів довільної природи в абстрактну множину відповідної структури за заданих обмежень [7]. Таке відображення називається конфігурацією і здійснюється в конфігураційному просторі [5, 6]. Наведемо ці поняття для розглядуваної задачі.

Зазначимо, що на об'єкт (1) накладено додаткові обмеження [2]:

— умови склеювання трьох еліпсів у вигляді одного складного об'єкта H_i, а саме

$$x_c^i + w_1^i \cos\theta_c^i = x_r^i - w_2^i \cos\theta_r^i, \tag{2}$$

$$y_c^i + w_1^i \sin\theta_c^i = y_r^i - w_2^i \sin\theta_r^i, \tag{3}$$

$$x_c^i + w_1^i \cos\theta_c^i = x_l^i - w_2^i \cos\theta_l^i, \tag{4}$$

$$y_c^i + w_1^i \sin\theta_c^i = y_l^i - w_2^i \sin\theta_l^i; \tag{5}$$

— обмеження на співвідношення кутів повороту, що випливають з фізичних обмежень на взаємне положення частин тіла людини (наприклад, плеча), а саме

$$\theta_c^i - \alpha_1^i \le \theta_l^i \le \theta_c^i + \alpha_2^i, \tag{6}$$

$$\theta_c^i - \alpha_1^i \le \theta_r^i \le \theta_c^i + \alpha_2^i. \tag{7}$$

Обмеження (2)–(7) отримують з антропологічних даних людини: параметри $v_l^i(x_l^i, y_l^i)$, $v_r^i(x_r^i, y_r^i)$ визначають через параметри розміщення еліпса E_c^i (2)–(5), а параметри просторової форми об'єктів $H_i = E_c^i \bigcup E_l^i \bigcup E_r^i$, $i = 1, 2, \ldots, n$, визначають параметри $\mu_l^i = \theta_l^i, \mu_r^i = \theta_r^i$, для яких виконуються обмеження (6), (7).

Проаналізуємо особливості відображення в задачі моделювання руху людей, а саме його узагальнені параметри.

Зазначимо, що на обмеження з неперетину та розміщення об'єктів в задачі моделювання руху людей накладаються такі додаткові технологічні обмеження: на відносний крок у часі Δt^i руху *i*-ї людини, на маневреність z_c^i (тобто на можливість для кожної людини відхилятись від основного напрямку руху), на допустиму $D_{\text{доп}}$ локальну щільність потоку та на комфортність руху (задається або різними мінімально допустимими відстанями r_{ij}, $i < j+1 \in I_{n-1}$, між самими людьми та $r_i, i \in I_n = 1, 2, \ldots, n,$ — між людьми і межею області або різними просторовими формами зміною параметрів μ_l^i, μ_r^i у разі створення складного об'єкта (2)–(7)). Враховувати ці мінімально допустимі відстані дає змогу аналітичний опис умов неперетину та розміщення об'єктів, а саме Ф-функції [3].

Задача переміщення людей в потоці належить до неперервних задач. Для моделювання руху вводять дискретизацію за часом $t = t_0 + k\Delta t_k$, $k = 1, 2, \ldots$, яка дає змогу звести розв'язання початкової задачі до розв'язання послідовності неперервних задач на кожному дискретному інтервалі часу Δt_k, t_0 — початковий момент часу.

Отже, узагальненими змінними задачі розміщення об'єктів H_1, $H_2, \ldots$ $\ldots, H_i, \ldots, H_n$ є змінні $(x_c^1, y_c^1, \theta_c^1, \theta_l^1, \theta_r^1, \ldots, x_c^i, y_c^i, \theta_c^i, \theta_l^i, \theta_r^i, \ldots, x_c^n, y_c^n, \theta_c^n, \theta_l^n, \theta_r^n)$, а для неперервної задачі моделювання руху людей, яким відповідають об'єкти H_1, $H_2, \ldots, H_i, \ldots, H_n$, в інтервалі часу Δt_k вектор узагальнених змінних матиме вигляд

$$G = (\Delta t^1, z_c^1, x_c^1, y_c^1, \theta_c^1, \theta_l^1, \theta_r^1, \ldots, \Delta t^i, z_c^i, x_c^i, y_c^i, \theta_c^i, \theta_l^i, \theta_r^i, \ldots$$

$$\ldots, \Delta t^n, z_c^n, x_c^n, y_c^n, \theta_c^n, \theta_l^n, \theta_r^n).$$

Тоді задачу моделювання руху людей на кожному кроці Δt_k можна сформульовати так.

Необхідно знайти вектор параметрів

$$G^* = ((\Delta t^1, z_c^1, x_c^1, y_c^1, \theta_c^1, \theta_l^1, \theta_r^1)^*, \ldots, (\Delta t^i, z_c^i, x_c^i, y_c^i, \theta_c^i, \theta_l^i, \theta_r^i)^*, \ldots$$
$$\ldots, (\Delta t^n, z_c^n, x_c^n, y_c^n, \theta_c^n, \theta_l^n, \theta_r^n)^*) \tag{8}$$

за виконання таких обмежень:

— умов неперетину об'єктів $H_i(x_c^i, y_c^i, \theta_c^i)$, $H_j(x_c^j, y_c^j, \theta_c^j)$, $i < j + 1 \in I_{n-1}$:

$$\Phi^{H_i H_j}(x_c^i, y_c^i, \theta_c^i, x_c^j, y_c^j, \theta_c^j) - r_{ij} \geq 0; \tag{9}$$

— умов розміщення об'єктів $H_i(x_c^i, y_c^i, \theta_c^i)$ в області S_0:

$$\Phi^{H_i S_0}(x_c^i, y_c^i, \theta_c^i) - r_i \geq 0, \; i \in I_n = 1, 2, \ldots, n; \tag{10}$$

— технологічних вимог $T_i(x_c^i, y_c^i, \theta_c^i) \geq 0$:

$$T_i(x_c^i, y_c^i, \theta_c^i) \geq 0 : \begin{cases} 0 \leq \Delta t^i \leq 1, \\ \theta_c^i - \alpha_c^i \leq z_c^i \leq \theta_c^i + \alpha_c^i, \\ D_i(x_c^i + v_{i,x}\Delta t_k^i \Delta t_k;\; y_c^i + v_{i,y}\Delta t_k^i \Delta t_k) \leq D_{\text{доп}} \end{cases} \tag{11}$$

для досягнення максимуму сукупного переміщення людей за k-й інтервал часу, тобто

$$G^* = \arg \max_{G \in W_k \subset (R^{7n})} F(G),$$
$$F(G^*) \to \max_{G \in W_k \subset (R^{7n})}, \tag{12}$$

$F(G) = \Delta t \sum_{i=1}^{n} \Delta t^i (G_i) |\vec{v}_i|$, $\Delta t^i = \dfrac{\Delta t_k^i}{\Delta t_k}$, Δt_k^i, Δt^i — відповідно реальний і відносний час руху i-ї людини в інтервалі часу Δt_k.

Задача умовної оптимізації (12) з обмеженнями (2)–(7), (9)–(11) є NP-складною задачею нелінійного програмування. Область допустимих розв'язків W_k має складну структуру, бо являє собою незв'язну множину, кожна компонента зв'язності якої є багатозв'язною, межа W_k складається з нелінійних поверхонь, що містять западини [8]. Побудована модель описує неопуклу і неперервну задачу нелінійного програмування. Область визначення W_k містить усі оптимальні розв'язки. Можна, принаймні теоретично, використовувати для розв'язання такої задачі програми пошуку глобального екстремуму для задач нелінійного програмування і отримати оптимальний розв'язок.

Оскільки для побудови Ф-функцій використовують операцію мінімуму і максимуму [3], задача (12) з обмеженнями (2)–(7), (9)–(11) належить до задач негладкої оптимізації [8]. За способом побудови область допустимих розв'язків W_k можна представити у вигляді об'єднання h (h — деяке число, що залежить від кількості та форми об'єктів) підобластей:

$$W_k = \bigcup_{s=1}^{h} W_{ks}, \tag{13}$$

де W_{ks} описується системою нерівностей із гладкими функціями в лівій частині.

Представлення області допустимих розв’язків у вигляді об’єднання підобластей (13) дає змогу звести знаходження локального екстремуму задачі (12) з обмеженнями (2)–(7), (9)–(11) до розв’язання послідовності задач нелінійного програмування за допомогою такого алгоритму.

Алгоритм 1

Крок 1. Позначимо стартову точку $G^s = ((\Delta t^1, z_c^1, x_c^1, y_c^1, \theta_c^1, \theta_l^1, \theta_r^1)^s, \ldots$ $\ldots, (\Delta t^i, z_c^i, x_c^i, y_c^i, \theta_c^i, \theta_l^i, \theta_r^i)^s, \ldots, (\Delta t^n, z_c^n, x_c^n, y_c^n, \theta_c^n, \theta_l^n, \theta_r^n)^s)$, $s=1$, для задачі (12) з обмеженнями (2)–(7), (9)–(11) (вона належить W_{ks} за побудовою).

Крок 2. Згенеруємо за координатами стартової точки G^s підобласть із області W_{ks} (13), що містить цю точку. Якщо усі області W_{ks} вже досліджено, то процес розв’язання завершено.

Крок 3. Стартуючи з точки G^s, знайдемо локальний мінімум функції $F(G^s)$ в області W_{ks}. Позначимо отриману точку локального екстремуму G^{s+1}.

Крок 4. Вважатимемо, що $s = s+1$, і перейдемо до кроку 2.

Практичні дослідження показали, що для розв’язання розглядуваної задачі достатньо обмежитися двома–трьома ітераціями алгоритму 1.

Запропоновано засоби декомпозиції задачі, які дають змогу істотно знизити ресурсомісткість процесу оптимізації та використовувати запропонований підхід для моделювання широкого спектру ситуацій.

У цій роботі розроблено також наближений алгоритм розв’язання задачі, який наведено у вигляді послідовності таких кроків.

Алгоритм 2

Крок 1. Область задають у вигляді дерева (графу), де ребра — сегменти коридорів, вершини — перехрестя і точки склеювання сегментів. Сегмент може мати змінну ширину (що змінюється лінійно). Для кожної точки сегмента обчислюють відстань до виходу і напрямок переважного руху.

Крок 2. На область евакуації накладають сітку з достатньо дрібним кроком для визначення щільності потоку.

Крок 3. Складні об’єкти сортують за зростанням відстані до виходу.

Крок 4. За фактом сортування для кожного з об’єктів за координатами положення центру і кута повороту основного еліпса визначають локальну щільність потоку і переважний напрямок руху.

Крок 5. Для визначеного переважного напрямку руху в межах кута маневреності розглядають скінченну множину напрямків, серед яких знаходять напрямок, в якому упродовж секунди можливо здійснити максимальне переміщення, не порушуючи меж сегментів і виконуючи умови неперетину з іншими еліпсами. (Швидкість переміщення залежить від локальної щільності потоку.)

За наведеними у роботі алгоритмами розроблено програмне забезпечення. Створено програму «Евакуація», яка призначена для дослідження моделі евакуації людей та базується на емуляції їхнього індивідуального переміщення [2]. Розглянуто задачу моделювання руху людей з чотирьох коридорів однакових метричних характеристик за однакової кількості людей в них (тестовий приклад з [1]), які утворюють локальні потоки, що зливаються в основному коридорі, який веде до виходу. У цій статті враховано силовий вплив людей один на одного, що зменшує час руху людей в екстренній ситуації. На рис. 4 зображено конфігурацію розміщення людей упродовж 30 с та фрагмент цієї конфігурації, що демонструє вихід людей в основний коридор із одного з локальних коридорів (третього).

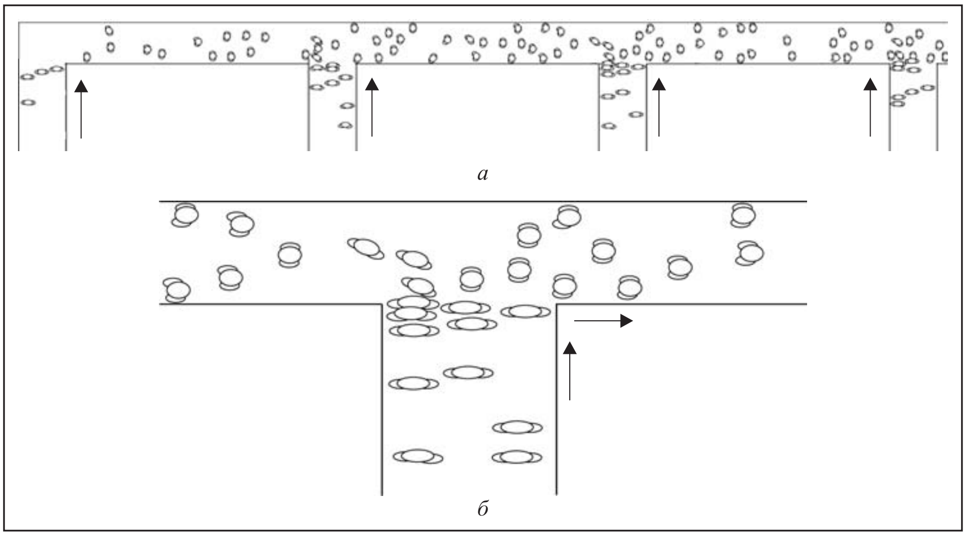

Рис. 4. Конфігурація розміщення людей упродовж 30 с їхнього руху (*а*); фрагмент конфігурації розміщення людей під час виходу з третього коридору в основний коридор (*б*)

У кожний фіксований час руху задача моделювання руху людей формує конфігурацію їхнього розміщення в мережі переміщення.

Виконано оцінювання трудомісткості розроблених алгоритмів: алгоритм 1 — це нелінійний алгоритм [8] пошуку локального екстремуму задачі, а алгоритм 2 — це наближений алгоритм послідовно-одиночного переміщення об'єктів, трудомісткість якого лінійна [9].

Отже, у процесі моделювання руху потоків людей, кількість яких не перевищує 150, ефективними є обидва алгоритми. За більшої розмірності задач потрібно використовувати алгоритм послідовно-одиночного переміщення.

ВИСНОВКИ

Задача переміщення людей в потоці належить до класу неперервних задач. Під час моделювання руху введено дискретизацію за часом, яка дає змогу звести розв'язання початкової задачі до розв'язання послідовності неперервних задач на кожному дискретному інтервалі часу. На кожному k-му дискретному інтервалі часу формуються узагальнені змінні для неперервної задачі моделювання руху. Відображення узагальнених змінних з виконанням умов неперетину об'єктів, їхнього розміщення на горизонтальній площині та технологічних обмежень згідно з критерієм якості в кожний фіксований момент часу формує конфігурацію їхнього розміщення. Під час активного руху розглянуто форму геометричних об'єктів, що є об'єднанням трьох еліпсів. Основний еліпс здійснює поворот у межах кута маневреності, а інші — відносно точок склеювання об'єктів у межах антрологічно допустимих кутів. У роботі запропоновано алгоритми моделювання руху гетерогенних потоків людей, що базуються на методах локальної оптимізації переміщення об'єктів з урахуванням різних просторових форм та метричних характеристик. Алгоритми ґрунтуються на аналітичному описі умов неперетину об'єктів та розміщення на горизонтальних шляхах з урахуванням неперервних трансляцій та обертань цих об'єктів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kholshevnikov V.V., Samoshin D.A. Parameters of pedestrian flow for modeling purposes. In: Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008. Klingsch W., Rogsch C., Schadschneider A., Schreckenberg M. (Eds.). Berlin; Heidelberg: Springer, 2010. P. 157–170. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04504-2_12.
2. Komyak Va., Pankratov A., Komyak Vl., Kyazimov K. Mathematical and computer modeling of active movement of people during evacuation from buildings. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. 2021. Vol. 622. P. 245–258.
3. Stoyan Yu.G. Φ-function and its basic properties. *Доповіді НАН України*. 2001. Сер. А., Т. 8. С. 112–117.
4. Kholshevnikov V.V., Shields T.J., Samoshyn D.A., Galushka M.M. Pedestrian flow modeling. *Book of Abstracts of the 4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. 8–12 September 2003. University of Ulster, 2003.
5. Stoyan Y.G., Yakovlev S.V. Configuration space of geometric objects. *Cybernetics and Systems Analysis.* 2018. Vol. 54, N 5. P. 716–726. https://doi.org/10.1007/s10559-018-0073-5.
6. Тимофієва Н.К Про деякі підходи до оцінки оптимального розв’язку задач комбінаторної оптимізації. *Control Systems and Computers.* 2019. № 3. С. 3–13. URL: https://doi.org/10.15407/csc.2019.03.003.
7. Стоян Ю.Г. Основная задача геометрического проектирования. Харьков: Ин-т проблем машиностроения АН УССР, 1983. 36 с. (Препринт / АН УССР. Ин-т проблем машиностроения; 181).
8. Wachter A., Biegler L.T. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. *Mathematical Programming*. 2006. Vol. 106, N 1. P. 25–57. https://doi.org/10.1007/s10107-004-0559-y.
9. Комяк В.М., Данілін О.М., Дворецька Т.О. Алгоритм моделювання індивідуально-потокового руху людей при евакуації в умовах пожежі та його характеристики. *Проблеми надзвичайних ситуацій: Зб. наук. пр.* Харків: НУЦЗУ, 2019. Вип. 29. С. 29–36.

V.M. Komyak, V.V. Komyak, K.T. Kyazimov

MODELING THE MOVEMENT OF HETEROGENEOUS FLOWS OF PEOPLE AS A GEOMETRIC DESIGN PROBLEM

Abstract. The problem of modeling the movement of heterogeneous flows of people is shown to be one of the topical applied problems of the class of geometric design. The paper proposes a mathematical model, methods, and algorithms for modeling the movement of heterogeneous flows of people based on local optimization methods for the movement of geometric objects, taking into account changes in their spatial shape and metric characteristics. These algorithms are based on an analytical description of the conditions for non-intersection of objects, taking into account their continuous translations and rotations.

Keywords: configuration space, generalized variables, placement, modeling of the movement of human flows, mathematical model.

Надійшла до редакції 31.08.2023