

УДК 004.942:519.876.5

DOI: 10.31673/2412-9070.2026.017412

О. М. МАКОВЕЙЧУК¹, д-р техн. наук, професор;

ORCID: 0000-0003-4425-016X

Р. В. ЗІНЬКО², д-р техн. наук, професор;

ORCID: 0000-0002-3275-8188

О. І. ГОЛУБЕНКО¹, канд. техн. наук, доцент,

ORCID: 0000-0002-1776-5160

¹Заклад вищої освіти «Міжнародний науково-технічний університет імені академіка Юрія Бугая», Київ²Національний університет «Львівська політехніка», Львів

МОДЕЛЮВАННЯ ГРУПОВОГО РУХУ У ДИСКРЕТНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

У цій роботі запропоновано комплексний підхід до моделювання координованого групового руху агентів у дискретних середовищах на основі парадигми «лідер–послідовник». Запропонована агент-орієнтована модель призначена для симуляції колективної навігації у обмежених і багатих на перешкоди просторах, вирішуючи задачі, характерні для автономної робототехніки, координації багатьох агентів та систем роїння. Основною особливістю моделі є визначення оптимальної траєкторії ведучого агента за допомогою алгоритму хвильового поширення, що забезпечує побудову шляхів без зіткнень у дискретизованому середовищі. Обчислювальна ефективність додатково підвищується за рахунок обмеження області пошуку з використанням матриці відстаней до найближчих перешкод, сформованої методом дистанційного перетворення та сегментації вододілом. Такий підхід дозволяє виділити центральні навігаційні коридори та зменшити обчислювальні витрати, зберігаючи точність маршрутів. Методологія базується на строгому алгоритмічному проєктуванні та демонструє стабільність при різноманітних конфігураціях середовища.

Агенти-послідовники коригують свої позиції відносно лідера, підтримуючи мінімальну безпечну міжагентну відстань, що забезпечує стабільну та координовану конфігурацію групи і реалістичну колективну динаміку. Модель відтворює характерні поведінкові патерни, що спостерігаються у природних та інженерних системах, включаючи зграєве формування, марширування та кооперативне маневрування автономних платформ. Експериментальні дослідження демонструють, що підхід ефективно масштабується для великих груп агентів та складних середовищ без втрати координації або оптимальності шляхів. Крім того, методологія надає гнучку платформу для інтеграції додаткових правил поведінки та адаптивних стратегій, що розширює її застосовність у різноманітних сценаріях багатьох агентів.

Розроблена модель створює теоретичну основу для практичних застосувань у автономній навігації, моделюванні руху натовпу, рятувальних операціях, а також у біологічно натхнених системах роїння. Перспективними напрямками подальших досліджень є врахування динамічних перешкод, змінної чисельності агентів та адаптивних метрик відстаней для підвищення ефективності у високодинамічних і невизначених середовищах.

Ключові слова: колективний рух; агент-орієнтоване моделювання; дискретне середовище; хвильовий алгоритм; рух за лідером; оптимальний шлях.

Постановка проблеми

У сучасних системах моделювання колективного руху важливо враховувати не лише локальні правила взаємодії агентів, а й організацію руху групи у дискретному середовищі. Одним із фундаментальних сценаріїв є слідування за ведучим (лідер–послідовник, *leader-follower*).

© Маковейчук О. М., Зінько Р. В., Голубенко О. І., 2026

llower), коли один або кілька агентів задають траєкторію, а решта координує свій рух щодо лідера, підтримуючи визначену міжагентну дистанцію.

Такі сценарії мають пряме практичне застосування: наприклад, при координації зграї безпілотних літальних апаратів (дронів) для спільного патрулювання або доставки вантажів, коли необхідно забезпечити безпечну відстань між апаратами, уникати зіткнень і дотримуватись заданої траєкторії. Інший приклад - моделювання руху військових підрозділів або роботизованих платформ у мінному полі, де кожен агент повинен слідувати за лідером і одночасно обирати безпечні клітинки дискретної карти, уникаючи перешкод і загроз [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі підходи до опису групової поведінки об'єктів традиційно поділяють за рівнем деталізації на три основні класи: мікроскопічні, мезоскопічні та макроскопічні моделі.

Мікроскопічні (агент-орієнтовані) моделі описують рух кожного індивідуального суб'єкта згідно з локальними правилами. У дискретному середовищі такі моделі реалізуються здебільшого на основі клітинних автоматів (*Cellular Automata, CA*) [2, 3] або агентних моделей на ґратці (*Agent-Based Lattice Models*) [4].

Класичними прикладами мікроскопічних моделей є модель зграї (*Boids*), яка описує локальні правила руху агентів на основі розходження, вирівнювання та зближення [5] та модель, де кожен агент змінює напрямок руху на середній напрямок своїх сусідів із випадковим шумом, що дозволяє відтворювати фазові переходи між хаотичним і синхронізованим рухом [6].

Для моделювання руху пішоходів у дискретному середовищі застосовують клітинні автомати з полем напрямлення (*Floor Field Models*), де рух агентів визначається наближенням до виходів або цільових точок за допомогою цифрового поля, яке кодує «потік» або бажаний напрямок [7, 8].

Для транспортних потоків базовою є модель Nagel–Schreckenberg, яка показує, як прості правила клітинного автомата здатні відтворювати складну макродинаміку трафіку [9].

Однією з базових форм організованої колективної поведінки є рух за лідером (*leader-follower motion* або конвойний рух), який описує динаміку групи агентів, що координують свій рух відносно одного або декількох лідерів, що задають напрямок і швидкість переміщення. Цей підхід поєднує елементи агент-орієнтованого моделювання та алгоритмів маршрутизації, займаючи проміжне місце між мікроскопічними та мезоскопічними підходами. Існують різні схеми організації руху за принципом «лідер–послідовник»: у моделі з одним лідером (*Single-leader*) один агент визначає траєкторію, а решта слідує за своїм безпосереднім попередником [5, 10]; у моделі з віртуальним лідером (*Virtual leader*) лідер задає лише орієнтир, а агенти підтримують формацію відносно нього [10]; у моделі з кількома лідерами (*Multiple-leader*) рух формується взаємодією декількох лідерів або груп, забезпечуючи координацію колективу [11].

Моделі типу *leader-follower* широко використовуються у різних галузях: у робототехніці та автономному транспорті - для руху колон мобільних роботів або безпілотників [12, 13]; у моделюванні натовпу - для формування впорядкованих груп у тісних проходах або під час евакуації [8]; у військових та рятувальних системах - для координованого пересування загонів у складному рельєфі [1, 8]; а також у біологічних системах - для аналізу поведінки колоній, зграй і роїв [14].

Мета статті - розробити та дослідити модель руху у дискретному середовищі для слідування агентів за ведучим у групі та підтримання заданої відстані між ними.

Основна частина

Дискретне середовище моделюється бінарною матрицею $U \in \{0,1\}^{M \times N}$, де $U(i, j) = 1$ відповідає зайнятій клітинці (перешкод), а $U(i, j) = 0$ - вільній. Кожен агент займає одну клітинку, а переміщення можливе лише по суміжних незайнятих клітинках у 4- або 8-зв'язному оточенні. Для підвищення роздільності використовується масштабування середовища за методом найближчого сусіда:

$$U^{(k)}(i, j) = U\left(\left\lfloor \frac{i}{k} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{j}{k} \right\rfloor\right), \quad (1)$$

де $k \in \mathbb{Z}^+$ - коефіцієнт масштабування і задано індекси $i = 1, \dots, kM, j = 1, \dots, kN$.

Для прикладу, у цій роботі матрицю U задаємо як:

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Початкові координати агентів задаються як:

$$s_n^r(0) = r_{K-n}, \quad (3)$$

$$s_n^c(0) = c_{K-n}, \quad (4)$$

де $(r_i, c_i)_{i=1}^L$ - оптимальний шлях W довжиною L від стартової до цільової клітинки; K – кількість агентів, $n = 1, \dots, K$. Таким чином, останній агент розташовується на початку шляху, а кожен наступний зсувається вздовж траєкторії на відстань a у L_1 -метриці.

Рух агентів моделюється наступним чином. Перший агент рухається безпосередньо по шляху W :

$$s_1^r(t) = r_t, \quad (5)$$

$$s_1^c(t) = c_t, \quad (6)$$

де $t = 2, \dots, L$.

Всі інші агенти рухаються за принципом слідування один за одним. Для кожного $n = 2, \dots, K$ обчислюються зміни координат Δr , Δc між агентом з індексом n у передній момент часу $t - 1$ та агентом з індексом $(n - 1)$, за яким він слідує, у поточний момент часу t :

$$\Delta r = s_{n-1}^r(t) - s_n^r(t - 1), \quad (7)$$

$$\Delta c = s_{n-1}^c(t) - s_n^c(t - 1), \quad (8)$$

знаходиться відстань d між ними (у L_1 -метриці):

$$d = |\Delta r| + |\Delta c|, \quad (9)$$

та обчислюється коефіцієнт:

$$\mu = \begin{cases} a/d, & d > a \\ 1, & d \leq a \end{cases}. \quad (10)$$

Тоді, нові координати для поточного моменту часу t розраховуються за формулами:

$$s_n^r(t) = s_n^r(t - 1) + \mu \Delta r, \quad (11)$$

$$s_n^c(t) = s_n^c(t - 1) + \mu \Delta c. \quad (12)$$

Слід також врахувати, що якщо нова позиція потрапляє на зайняту клітинку $U^{(k)} = 1$, то здійснюється пошук найближчої вільної клітинки, що забезпечує збереження мінімальної відстані між агентами та дозволяє рух лише по вільних клітинках.

Оптимальний шлях W визначається хвильовим алгоритмом (Wavefront Algorithm), який гарантує побудову найкоротшого маршруту у дискретному середовищі [15, 16]. Алгоритм має складність по часу та по пам'яті $O(M \cdot N)$ і гарантує знаходження шляху, якщо він існує.

Опишемо коротко роботу хвильового алгоритму.

Нехай задано початкову клітинку:

$$S = (i_s, j_s) \quad (13)$$

та кінцеву клітинку:

$$G = (i_g, j_g). \quad (14)$$

Мета - знайти шлях (набір точок) $w = \{(i_1, j_1), (i_2, j_2), \dots, (i_L, j_L)\}$, такий, що:

- $(i_1, j_1) = S, (i_L, j_L) = G$;
- усі проміжні клітинки задовольняють умові $U(i_k, j_k) = 0$;
- довжина шляху L є мінімальною у L_1 -метриці.

Створюємо матрицю відстаней:

$$d(i, j) \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \cup \{\infty\}, \quad (15)$$

де $d(i, j)$ - номер хвилі, що досягла клітинки (i, j) .

На першому кроці:

$$d(i_s, j_s) = 0. \quad (16)$$

Для всіх вільних клітинок (i, j) , які є безпосередніми сусідами у 4-зв'язному оточенні із уже досягнутими, виконується оновлення:

$$d(p, q) = \begin{cases} d(i, j) + 1, & \text{якщо } U(p, q) = 0 \text{ і } d(p, q) \text{ ще не задано;} \\ d(p, q), & \text{інакше,} \end{cases} \quad (17)$$

де $(p, q) \in N_4(i, j)$ - множина сусідів клітинки (i, j) у 4-оточенні:

$$N_4(i, j) = \{(i-1, j), (i+1, j), (i, j-1), (i, j+1)\}. \quad (18)$$

Таким чином, хвиля поширюється на всі доступні клітинки, поки не досягне цілі G або поки немає нових клітин для розповсюдження.

Після того як хвиля досягла точки G , починається зворотне трасування.

Встановлюємо поточну позицію:

$$(i, j) := (i_g, j_g). \quad (19)$$

Далі послідовно вибираємо сусідню клітинку з меншим номером хвилі:

$$(i', j') = \arg \min_{(p, q) \in N_4(i, j)} d(p, q), \quad (20)$$

і додаємо її до шляху:

$$W = \{(i', j')\} \cup W. \quad (21)$$

Цикл триває, поки не буде досягнута клітинка S . Таким чином, отримується шлях w , який відповідає мінімальній кількості кроків від S до G .

Продемонструємо тепер роботу алгоритму слідування за лідером на прикладі дискретного середовища U розміром 20×20 , що задається формулою (2). Для експериментів було використано масштабування з коефіцієнтом 25. На рис. 1 наведено графічне представлення матриці $U^{(25)}$; при цьому прийнято, що точка входу знаходиться внизу, точка виходу - нагорі.

Нижче, на рис. 2 проілюстровано роботу хвильового алгоритму для пошуку оптимального шляху.

Оскільки розмір $U^{(25)}$ є 500×500 , то пряме використання хвильового алгоритму буде не дуже ефек-

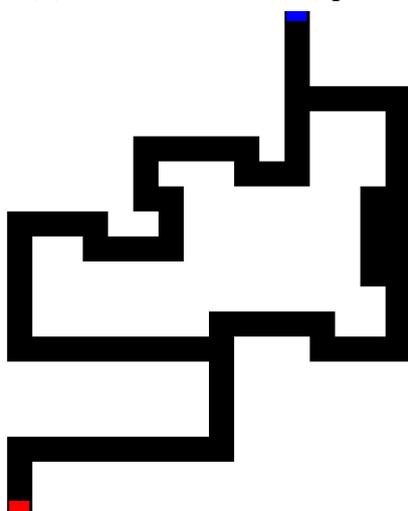


Рис. 1. Графічне представлення дискретного середовища $U^{(25)}$ (точка входу позначена червоним квадратиком, точка виходу - синім)

тивним, особливо при використанні скриптових мов програмування, таких як, наприклад, MATLAB.

Для підвищення ефективності побудови шляху у дискретному середовищі використовується оптимізація області пошуку хвильового алгоритму шляхом виділення центральних коридорів руху. Спочатку обчислюється матриця відстаней D від кожної вільної клітинки до найближчої перешкоди за допомогою дистанційного перетворення з метрикою «шахівниця» [17], для якої відстань між двома точками (x_1, y_1) та (x_2, y_2) визначається як:

$$\max(|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|). \tag{22}$$

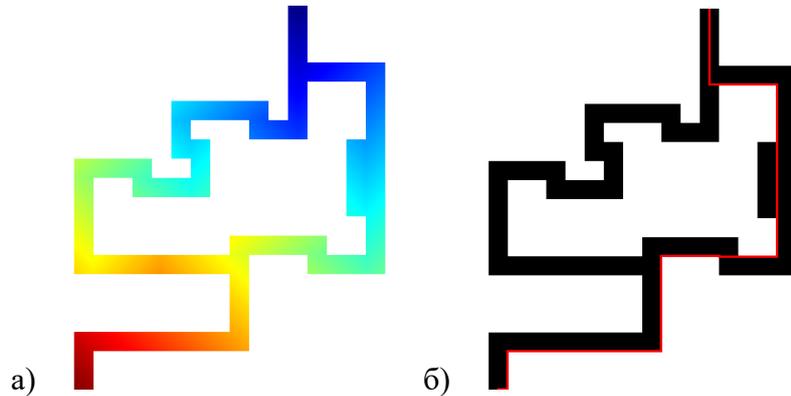


Рис. 2. Пошук оптимального шляху: а) ілюстрація роботи хвильового алгоритму, зміщення спектру кольору від синього до червоного залежить від кількості кроків до точки виходу нагору; б) оптимальний шлях

Вибір такої метрики обумовлений тим, що вона природно відображає прямі кути коридорів у дискретному середовищі і дозволяє виділяти основні проходи без розмивання діагональних напрямків, що важливо для побудови коридорів руху агентів (рис. 3).

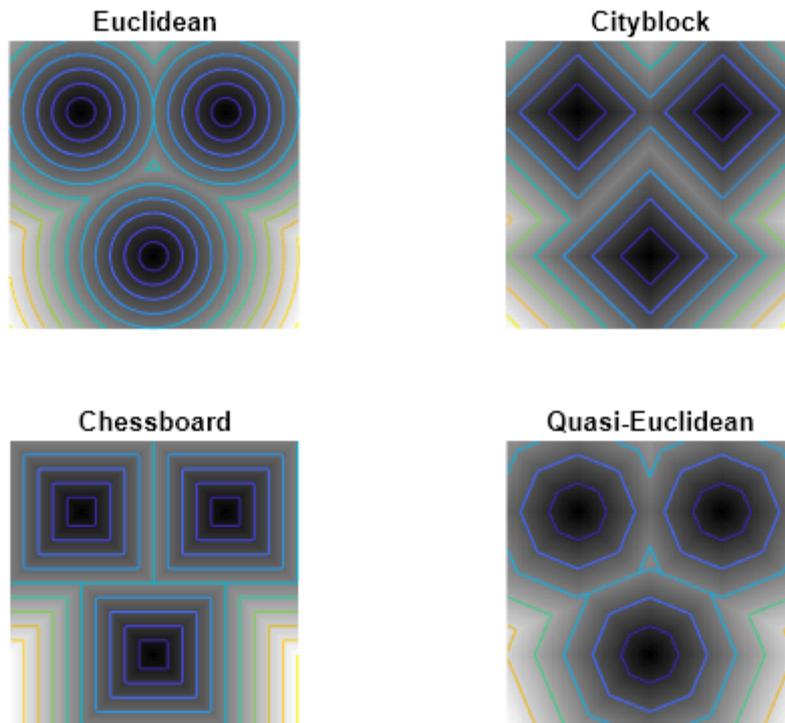


Рис. 3. Матриці відстаней, отримані за допомогою дистанційного перетворення із різними метриками, для прикладу трьох точок у двійковому зображенні. Контури показують рівні відстаней від ненульових пікселів [18]

Далі застосовується алгоритм вододілу (watershed), який сегментує матрицю відстаней на «басейни» та «гребені» – локальні долини і хребти рельєфу, де долини відповідають центральним коридорам руху, а гребені – межах між ними [19]. Таким чином, на виході формується карта, яка виділяє основні коридори руху, зменшуючи обчислювальні витрати хвильового алгоритму.

Хоча поєднання дистанційного перетворення та вододілу дозволяє виділити центральні коридори руху, на широких ділянках вільних областей U значення матриці відстаней D можуть бути великими, через що гребінь вододілу «вигинається» посередині області замість того, щоб слідувати вздовж її країв (рис. 4). Це призводить до побудови неоптимальних шляхів, які не відповідають природній геометрії коридорів (рис. 5).

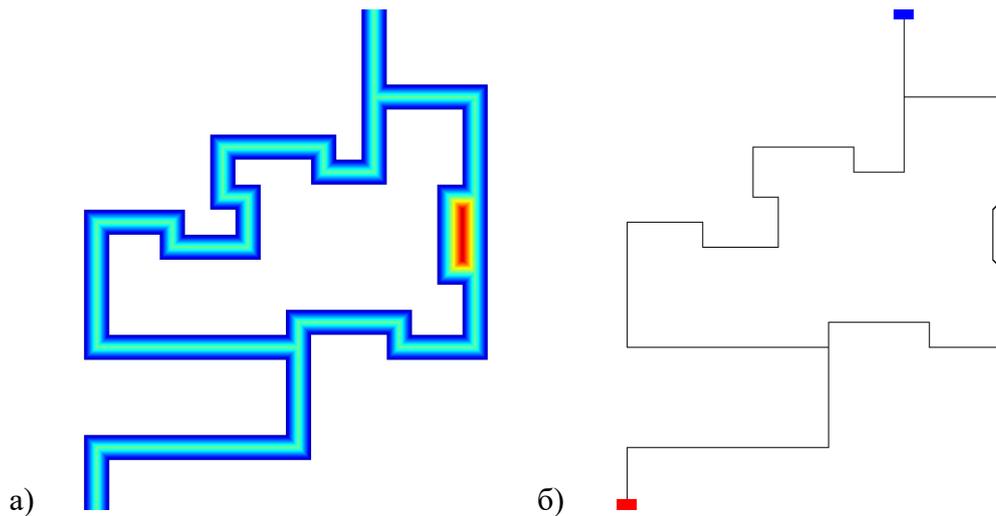


Рис. 4. Оптимізація області пошуку хвильового алгоритму: а) дистанційне перетворення; б) коридори руху, знайдені за допомогою алгоритму вододілу

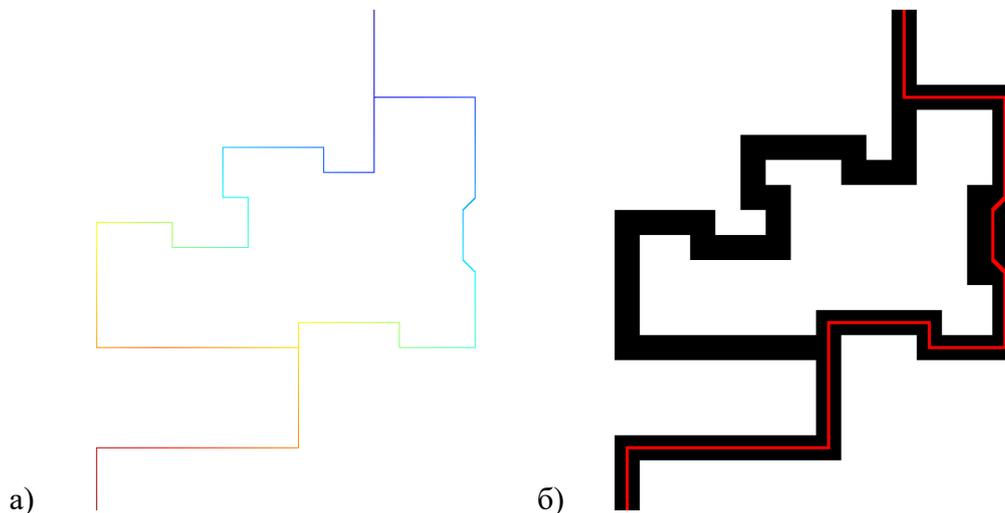


Рис. 5. Пошук оптимального шляху для оптимізованої області пошуку: а) ілюстрація роботи хвильового алгоритму, зміщення спектру кольору від синього до червоного залежить від кількості кроків до точки виходу нагорі; б) оптимальний шлях

Щоб уникнути цієї проблеми, застосовується корекція значень D . Спершу розраховується гістограма ненульових значень матриці відстаней з інтервалами на кожне ціле число, після чого знаходиться поріг як точка з максимальною зміною значень гістограми (рис. 6).

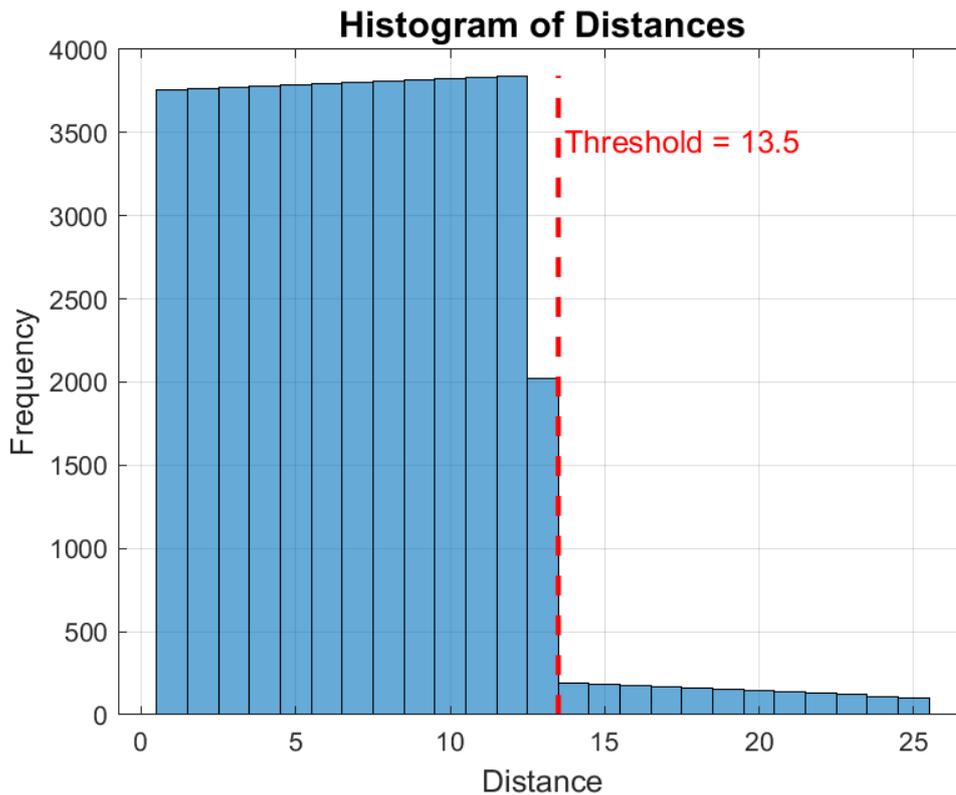


Рис. 6. Гістограма ненульових значень матриці відстаней (показано знайдене значення порогу)

Усі значення D , що перевищують цей поріг, обнуляються, що дозволяє гребеню вододілу слідувати вздовж країв коридору, а не по центру. Така корекція забезпечує, що хвильовий алгоритм побудує оптимальний маршрут уздовж однієї із природних меж широкого проходу, а не по його середині (рис. 7, 8).

На рис. 9 показано приклад руху 5 модельних агентів, перший з них рухається оптимальним шляхом, решта слідують один за одним, при цьому враховано, що рух можливий тільки по вільних клітинках.

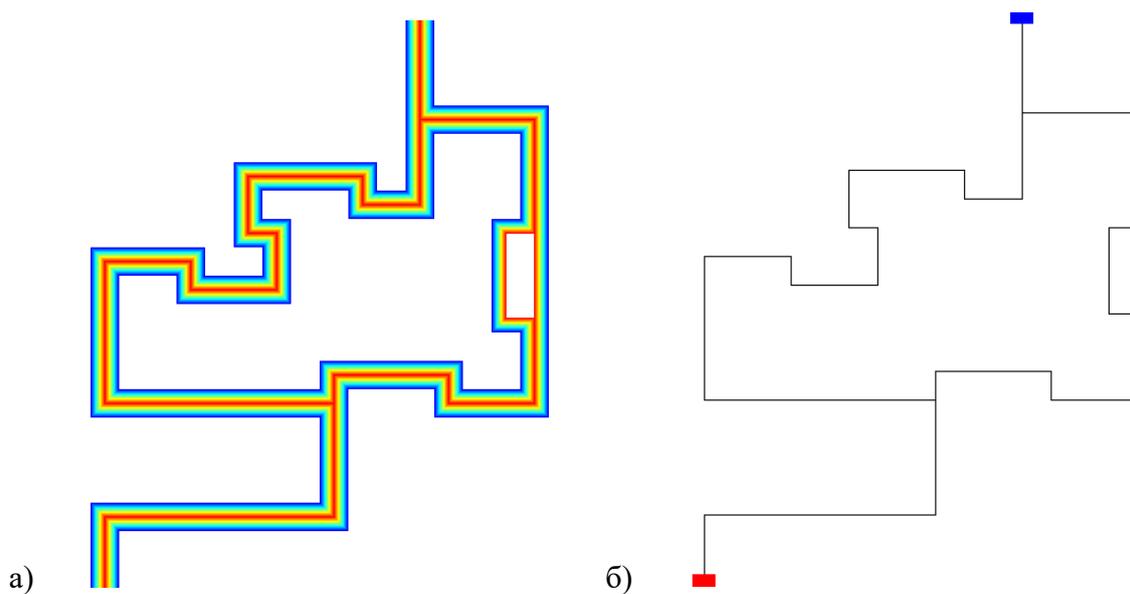


Рис. 7. Оптимізація області пошуку хвильового алгоритму (з корекцією матриці відстаней): а) скоректоване дистанційне перетворення; б) коридори руху, знайдені за допомогою алгоритму вододілу

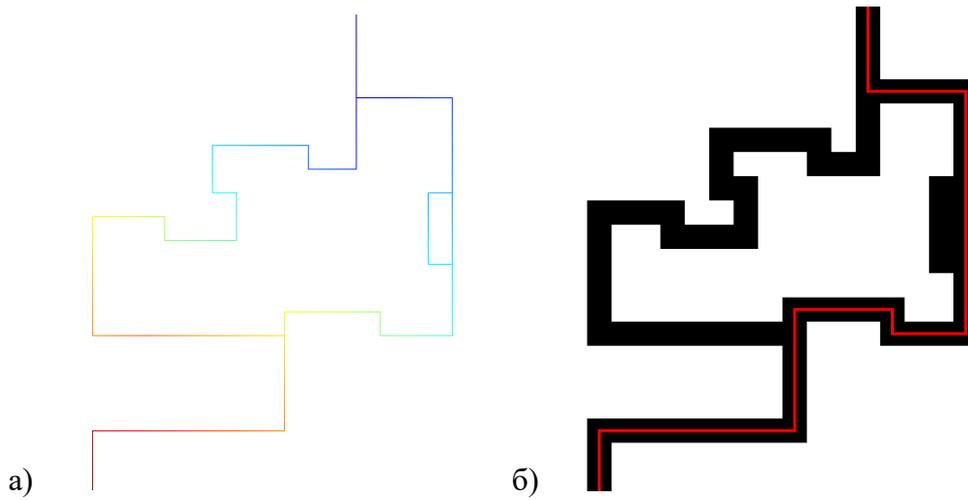


Рис. 8. Пошук оптимального шляху для оптимізованої області пошуку (з корекцією матриці відстаней):
а) ілюстрація роботи хвильового алгоритму, зміщення спектру кольору від синього до червоного
залежить від кількості кроків до точки виходу нагорі; б) оптимальний шлях

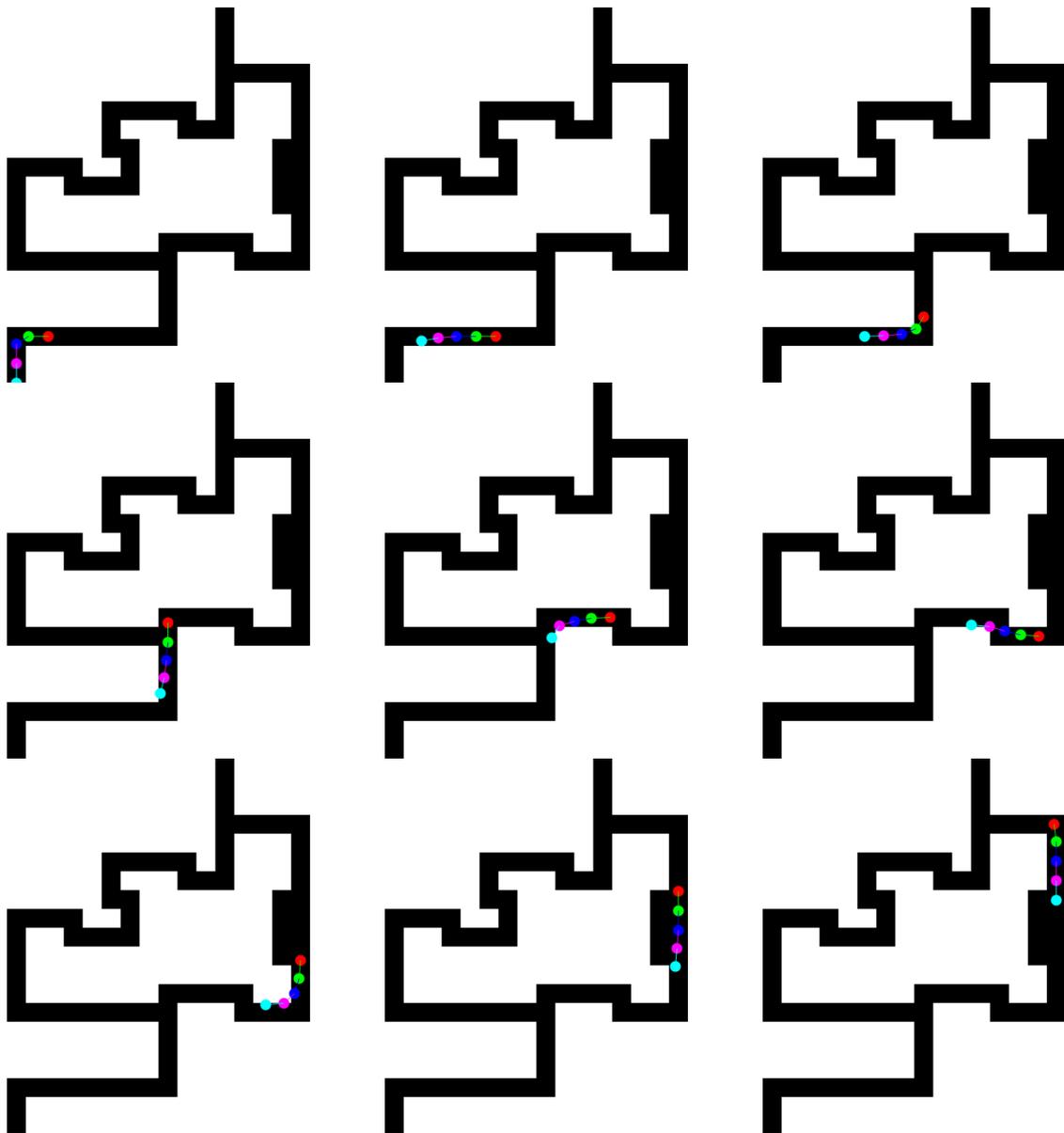


Рис. 9. Приклад руху модельних агентів

Для ілюстрації роботи алгоритму було побудовано повні траєкторії руху для кожного модельного агента (рис. 10).

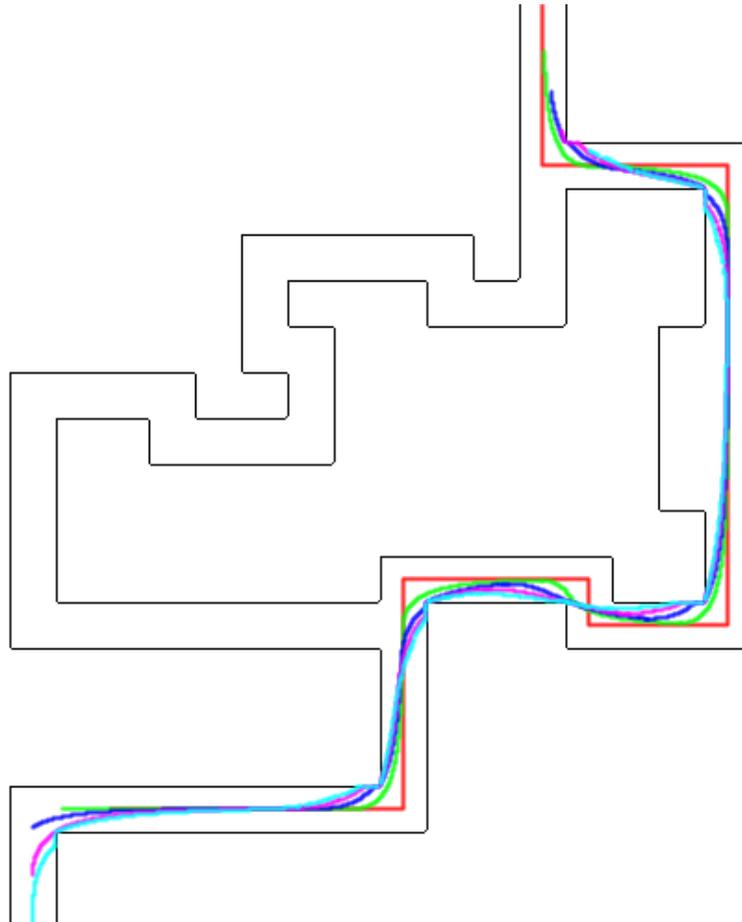


Рис. 10. Приклад руху модельних агентів

Як видно з рис. 10, всі траєкторії чітко лежать в межах дозволених коридорів руху. Перший агент слідує оптимальним шляхом, який проходить по середині коридору, решта слідує один за одним, що призводить до згладжування їх траєкторій.

Висновки та пропозиції

Розроблена агент-орієнтована модель ефективно відтворює координований рух групи за принципом «лідер–послідовник», забезпечуючи підтримку безпечної міжагентної відстані та уникнення перешкод. Хвильовий алгоритм у поєднанні з оптимізацією області пошуку через дистанційне перетворення та вододіл дозволяє виділити центральні коридори і зменшити обчислювальні витрати. Корекція матриці відстаней на основі гістограми гарантує, що маршрути прокладаються уздовж природних меж проходів, підвищуючи точність і оптимальність шляхів. Подальші дослідження можуть зосередитися на динамічних перешкодах, змінній чисельності агентів та адаптивних метриках відстаней для складних середовищ.

Розроблена модель має широке практичне застосування, зокрема в автономній робототехніці та транспорті, моделюванні руху пішоходів і натовпу, рятувальних операціях та аналізі поведінки біологічних систем, таких як зграї та рої.

Список літератури

1. Зінько Р. В., Залужний В. Ф., Самсін Р. І., Заярний О. А. Концепція застосування військових наземних мобільних роботів. Львів : Растр 7, 2025. 256 с. ISBN 978-617-8537-96-8.
2. Маковейчук О. М. Моделювання транспортних потоків методами клітинкових автоматів. Науковий вісник НЛТУ України. 2007. Вип. 17(4). С. 269–271.

3. Маковейчук О. М., Зінько Р. В. Принципи організації анізотропного середовища для клітинкових автоматів. *Науковий вісник ХІІТУ України*. 2007. Вип. 17(5). С. 210–213.
4. Mazurkiewicz A., Zinko R., Makoveychuk O., Polishchuk O. Simulation of passenger movement dynamics in a vehicle. *MATEC Web of Conferences*. 2023. Vol. 375. Article 02004.
5. Reynolds C. W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *Computer Graphics*. 1987. Vol. 21, No. 4. P. 25–34.
6. Vicsek T., Czirók A., Ben-Jacob E., Cohen I., Shochet O. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Physical Review Letters*. 1995. Vol. 75, No. 6. P. 1226–1229.
7. Burstedde C., Klauck K., Schadschneider A., Zittartz J. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A*. 2001. Vol. 295, No. 3–4. P. 507–525.
8. Helbing D., Farkas I., Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*. 2000. Vol. 407. P. 487–490.
9. Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I France*. 1992. Vol. 2, No. 12. P. 2221–2229.
10. Olfati-Saber R., Murray R. M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2004. Vol. 49, No. 9. P. 1520–1533.
11. Ren W., Beard R. W. Formation feedback control for multiple spacecraft via virtual structures. *IEE Proceedings – Control Theory and Applications*. 2002. Vol. 149, No. 3. P. 208–215.
12. Desai J. P., Ostrowski J. P., Kumar V. Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1998. Vol. 17, No. 6. P. 905–908.
13. Ren W., Beard R. W. *Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control: Theory and Applications*. London : Springer, 2008. 316 p.
15. Couzin I. D., Krause J., Franks N. R., Levin S. A. Effective leadership and decision-making in animal groups on the move. *Nature*. 2005. Vol. 433. P. 513–516.
16. Lee C. Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications. *IRE Transactions on Electronic Computers*. 1961. Vol. EC 10, No. 2. P. 224–231. URL: <https://www.semanticscholar.org/> (дата звернення: 06.11.2025).
17. Rubín F. The Lee Path Connection Algorithm. *IEEE Transactions on Computers*. 1974. Vol. C 23, No. 9. P. 907–918. URL: <https://www.scispace.com/> (дата звернення: 06.11.2025).
18. Paglieroni D. *Distance Transforms: Properties and Machine Vision Applications*. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing: Graphical Models and Image Processing*. 1992. Vol. 54, No. 1. P. 57–58.
19. MathWorks. bwdist. URL: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2024b/images/ref/bwdist.html> (дата звернення: 06.11.2025).
20. Meyer F. Topographic distance and watershed lines. *Signal Processing*. 1994. Vol. 38. P. 113–125.

O. Makoveichuk, R. Zinko, O. Golubenko

SIMULATION OF GROUP MOTION IN A DISCRETE ENVIRONMENT

This paper presents a comprehensive approach to modeling coordinated group motion of agents in discrete environments, based on the leader–follower paradigm. The proposed agent-based framework is designed to simulate collective navigation in constrained and obstacle-rich spaces, addressing challenges commonly encountered in autonomous robotics, multi-agent coordination, and swarm intelligence applications. A key feature of the model is the determination of an optimal trajectory for the leading agent using a wave propagation algorithm, which ensures the feasibility of collision-free paths within a discretized environment. Computational efficiency is further enhanced by constraining the search domain using a distance map to the nearest obstacles, generated through distance transform and watershed segmentation techniques. This approach highlights central navigation corridors and reduces computational overhead while preserving routing accuracy. The methodology is grounded in rigorous algorithmic design and demonstrates robustness across varying environmental configurations.

Follower agents adjust their positions relative to the leader, maintaining a minimum safe inter-agent distance, which ensures a stable, coordinated group configuration and realistic collective dynamics. The model effectively reproduces characteristic behaviors observed in natural and engineered systems, including flocking, marching formations, and cooperative maneuvering of autonomous platforms. Experimental results demonstrate that the framework scales efficiently to larger agent groups and complex environments without compromising coordination or path optimality. Furthermore, the framework provides a flexible platform for integrating additional behavioral rules and adaptive strategies, thereby extending its applicability to a broad spectrum of multi-agent scenarios.

The developed methodology provides a robust basis for practical applications in autonomous navigation, crowd simulation, rescue operations, and bio-inspired swarm systems. Future work may extend the framework to dynamic obstacles, variable group sizes, and adaptive distance metrics to enhance performance in highly dynamic and uncertain environments.

Keywords: collective motion; agent-based modeling; discrete environment; wavefront algorithm; leader–follower motion; optimal path.

Надійшла до редакції: 12.12.2025

Прийнята до друку: 20.01.2026

Опубліковано: 27.02.2026

© 2026 Маковейчук О. М., Зінько Р. В., Голубенко О. І. Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0.<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>