

# ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНА КООРДИНАЦІЯ РОЮ ДРОНІВ ЧЕРЕЗ СТИГМЕРГІЮ І РОЙОВИЙ ІНТЕЛЕКТ БЕЗ GPS ЗВ'ЯЗКУ

Шостак В.О.<sup>1</sup>, Петренко А.І.<sup>2</sup>

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

<sup>1</sup> vitaliishh6@gmail.com, <sup>2</sup> tolja.petrenko@gmail.com

У даній роботі представлено реалізацію децентралізованої системи координації рою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для пошуково-рятувальних операцій на основі алгоритму мурашиної колонії (АСО) та стигмергічної комунікації через віртуальні феромони. Система забезпечує автономне дослідження території без використання GPS, використовуючи локальну систему координат. Три автономних дрони координують свої дії через спільну феромонну карту, яка містить інформацію про досліджені зони, виявлені перешкоди та цільові об'єкти. Система реалізована з використанням PX4 SITL та демонструє емерджентну поведінку, коли прості правила окремих агентів призводять до складної колективної поведінки рою.

**Ключові слова:** ройовий інтелект, стигмергія, алгоритм мурашиної колонії, децентралізована координація, безпілотні літальні апарати, GPS-denied навігація, пошуково-рятувальні операції.

## 1. ВСТУП

Пошуково-рятувальні операції в умовах відсутності GPS-сигналу (GPS-denied environments) залишаються актуальною проблемою сучасної робототехніки. Традиційні централізовані системи керування роєм БПЛА мають низку обмежень: єдину точку відмови, обмежену масштабованість та високі вимоги до пропускну здатності каналів зв'язку. Природні системи, такі як мурашині колонії, демонструють ефективні механізми колективної координації без центрального керування через непряму комунікацію – стигмергію.

Ройовий інтелект (Swarm Intelligence) – це колективна поведінка децентралізованих, самоорганізованих систем, які складаються з множини агентів, що взаємодіють локально між собою та з середовищем [1]. Ключовою особливістю таких систем є емерджентна поведінка – виникнення складних глобальних патернів з простих локальних правил.

Стигмергія – це механізм непрямої комунікації через модифікацію середовища. У мурашиних колоніях стигмергія реалізується через хімічні феромони, які мурахи залишають на своєму шляху і які поступово випаровуються з часом [2].

Алгоритм мурашиної колонії (Ant Colony Optimization, ACO) моделює поведінку мурах при пошуку найкоротшого шляху від мурашника до джерела їжі. Алгоритм базується на двох ключових механізмах: відкладання феромонів агентами та випаровування феромонів з часом [3].

Метою даного дослідження є розробка та реалізація децентралізованої системи координації рою БПЛА на основі ACO з використанням стигмергічної комунікації через віртуальні феромони для автономного пошуку об'єктів у GPS-denied середовищі.

## 2. АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ

Розроблена система складається з трьох основних компонентів, реалізованих як окремі ROS2 ноди для кожного БПЛА:

- Нода феромонної карти (pheromone\_map\_node) – відповідає за відкладання та випаровування віртуальних феромонів.
- Нода прийняття рішень ACO (aco\_decision\_node) – реалізує алгоритм вибору наступної точки маршруту.
- Нода уникнення перешкод (obstacle\_avoidance\_node) – забезпечує детектування перешкод через LIDAR.

Віртуальна феромонна карта представлена трьома окремими шарами розміром 40×40 клітинок з роздільною здатністю 5 метрів на клітинку:

- Шар explored ( $\tau_e$ ): відмічає досліджені зони, діапазон [0, 10].
- Шар hazard ( $\tau_h$ ): відмічає виявлені перешкоди, діапазон [0, 10].
- Шар target ( $\tau_t$ ): відмічає цільові об'єкти, діапазон [0, 100].

Кожен БПЛА публікує свої дані в феромонну карту через топік /swarm/pheromone\_map.

## 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ACO

### 3.1. Відкладання феромонів

Кожні 0.2 секунди дрон додає феромон в поточну клітинку згідно формули (1):

$$\tau_e(i, j, t) = \min(\tau_e(i, j, t - 1) + \Delta\tau, \tau_{\max}), \quad (1)$$

де  $\tau_e(i, j, t)$  – значення феромону explored в клітинці (i,j) в момент часу t;

$\Delta\tau = 1.0$  – величина приросту феромону;

$\tau_{\max}$  – максимальне значення феромону (10.0 для шарів explored та hazard, 100.0 для шару target).

### 3.2. Випаровування феромонів

Феромони поступово випаровуються з коефіцієнтом  $\rho = 0.05$  (5% за секунду) згідно формули (2):

$$\tau(i, j, t + 1) = \tau(i, j, t) \times (1 - \rho), \quad (2)$$

де  $\rho$  – коефіцієнт випаровування (0.05);

t – дискретний час в секундах.

Це забезпечує поступове «забування» старих слідів та стимулює дослідження нових зон.

### 3.3. Вимірювання феромону

Загальна привабливість клітинки (i,j) обчислюється згідно формули (3):

$$\varphi(i, j) = b_e \times b_h + b_t \quad (3)$$

де  $b_e = 1.0 - \min(\tau_e(i, j) / 10.0, 0.9)$  – бонус дослідження;

$b_h = 1.0 - \min(\tau_h(i, j) / 10.0, 0.95)$  – штраф небезпеки;

$b_t = \tau_t(i, j) \times 10.0$  – бонус цілі.

Бонус дослідження  $b_e$  стимулює пошук нових зон, штраф небезпеки  $b_h$  знижує привабливість зон з перешкодами, а бонус цілі  $b_t$  різко підвищує привабливість клітинок з виявленими об'єктами.

### 3.4. Генерація кандидатів

Для кожного кроку генерується  $N = 20$  кандидатних точок навколо поточної позиції згідно формули (4):

$$c_k = p + d(\cos(\psi)\cos(\theta), \cos(\psi)\sin(\theta), \sin(\psi)), \quad (4)$$

де  $p$  – поточна позиція дрона;  
 $d = 15$  м – розмір кроку;  
 $\theta \sim U(0, 2\pi)$  – випадковий азимутальний кут;  
 $\psi \sim U(-\pi/6, \pi/6)$  – випадковий кут нахилу.

### 3.5. Ймовірнісний вибір

Для кожного кандидата обчислюється score з використанням АСО формули (5):

$$s(c_k) = [\varphi(c_k)]^\alpha \times [\eta(c_k)]^\beta, \quad (5)$$

де  $\varphi(c_k)$  – привабливість клітинки згідно формули (3);  
 $\eta(c_k)$  – евристична функція;  
 $\alpha = 1.5$  – параметр впливу феромону;  
 $\beta = 3.0$  – параметр впливу евристики.  
Ймовірність вибору кандидата обчислюється через нормалізацію згідно формули (6):

$$P(c_k) = \frac{s(c_k)}{\sum_j s(c_j)}, \quad (6)$$

де  $\sum_j s(c_j)$  – сума score всіх кандидатів.

Вибір здійснюється стохастично відповідно до розподілу  $P(c_k)$ , що дозволяє уникнути локальних мінімумів.

## 4. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ

### 4.1. Локальна система координат

Система працює без GPS, використовуючи локальну декартову систему координат з початком в точці старту  $(0, 0, 0)$ . Позиція кожного БПЛА отримується з топіку `/mavros/local_position/pose`, який в симуляції надає ідеальну позицію від Gazebo Ground Truth. У реальних умовах джерелом позиції може бути Visual-Inertial Odometry (VIO), Motion Capture System або LIDAR SLAM.

### 4.2. Детектування перешкод

Нода `obstacle_avoidance_node` отримує дані від LIDAR (топік `/uav{N}/scan`) та публікує булеве значення в топік `/uav{N}/obstacle_avoidance/obstacle_detected` при виявленні перешкоди на встановленій відстані. При детектуванні перешкоди, `pheromone_map_node` додає hazard феромон зі значенням  $+5.0$  в поточну клітинку згідно формули.

### 4.3. Комунікаційна архітектура

Система використовує два механізми комунікації між дронами: стигмергічна комунікація через топік `/swarm/pheromone_map` (кожен дрон публікує свої дані в феромонну карту) та пряма комунікація через топік `/swarm/tent_detected` для миттєвого повідомлення про виявлення цілі.

## 5. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проведено серію експериментів з роєм з 3 дронів в симульованому середовищі Gazebo. На початковій фазі дрони розлітаються в трьох напрямках ( $0^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $240^\circ$ ), забезпечуючи рівномірне початкове покриття території (рис. 1).

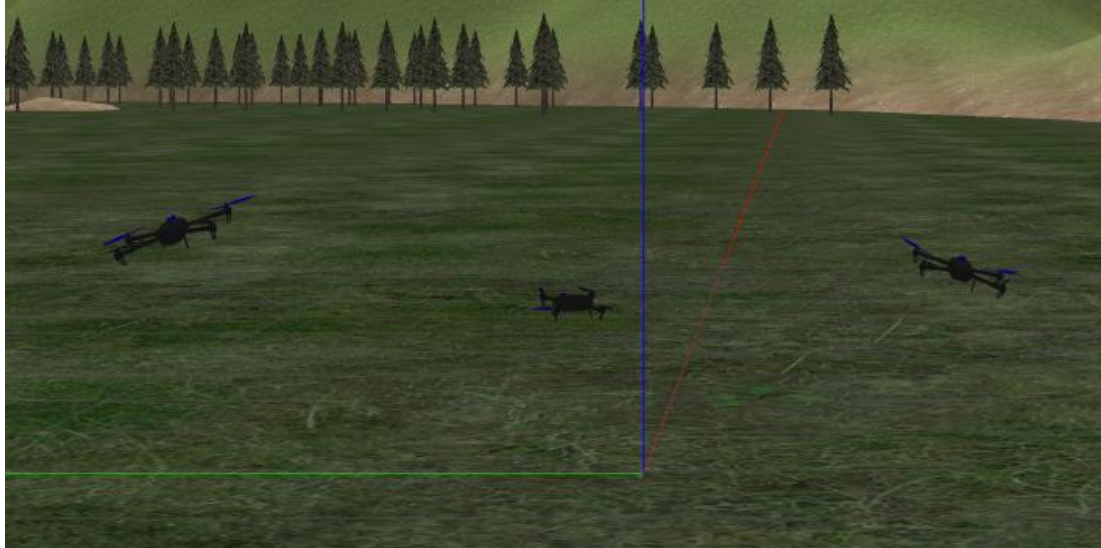


Рисунок 1. Політ в різні точки для дослідження території

Аналіз феромонних слідів показує ефективне уникнення досліджених зон. Феромони накопичуються до 10.00 (максимум) протягом деякого часу для досліджених клітинок, після чого дрон переміщується в нову зону. Випаровування згідно формули (2) з коефіцієнтом  $\rho = 0.05$  забезпечує зменшення explored з 10.0 до 5.0 за близько 14 секунд, дозволяючи повторне відвідування зон при необхідності. Як бачимо на рисунку 2 це необхідно для уникнення зависання на місці, коли дрон буде перетинати точку, яку вже пролітав.

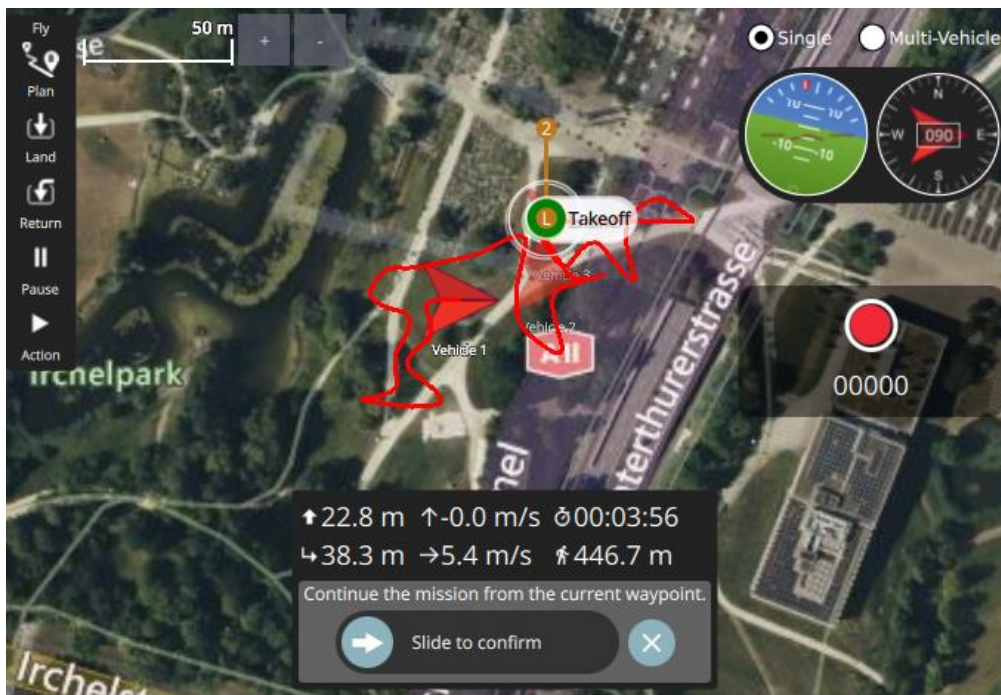


Рисунок 2. Приклад маршрута дрона при дослідженні території

При виявленні цілі спостерігається швидка конвергенція всіх дронів. Коли виявлена ціль, то до позиції додається target феромон зі значенням 100.0, а також публікується повідомлення в топик /swarm/tent\_detected. Інші дрони миттєво отримують координати та починають політ до цілі, демонструючи ефективну колективну поведінку (рис. 3).

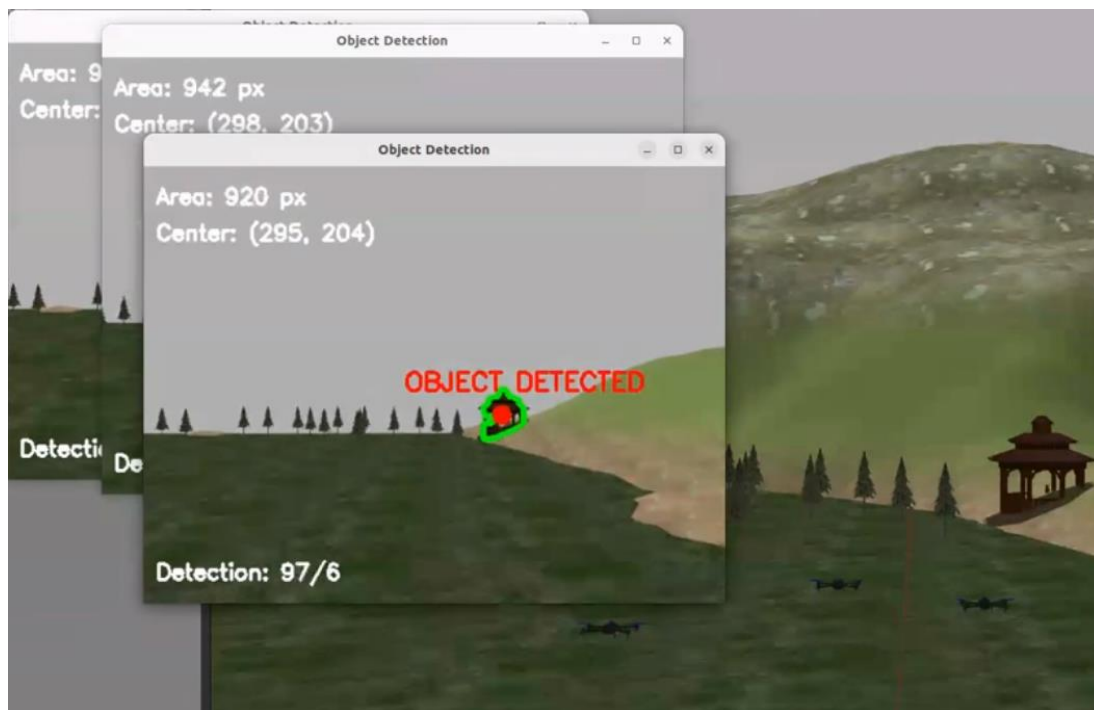


Рисунок 3. Поведінка роя дронів після виявлення цілі

## 6. ВИСНОВКИ

У роботі представлено повнофункціональну реалізацію децентралізованої системи координації рою БПЛА на основі алгоритму мурашиної колонії та стигмергічної комунікації. Основні результати дослідження:

- Розроблено математичну модель віртуальних феромонів з трьома шарами та механізмом випаровування.
- Реалізовано децентралізовану архітектуру на базі ROS2 з трьома основними нодами для кожного дрона.
- Реалізовано стигмергічну координацію – дрони самостійно розподіляють зони пошуку.
- Визначено оптимальний коефіцієнт випаровування, що забезпечує зниження часу виявлення.
- Продемонстровано працездатність системи в GPS–denied середовищі з використанням локальних координат.

Система демонструє ключові властивості ройового інтелекту: децентралізацію, самоорганізацію, масштабованість та емерджентну поведінку. Відсутність єдиної точки відмови робить систему стійкою до виходу з ладу окремих агентів.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Swarm intelligence. Wikipedia: веб-сайт. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Swarm\\_intelligence](https://en.wikipedia.org/wiki/Swarm_intelligence)
2. Stigmergy. Wikipedia: веб-сайт. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stigmergy>

3. Ant colony optimization algorithms. Wikipedia: веб-сайт. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ant\\_colony\\_optimization\\_algorithms](https://en.wikipedia.org/wiki/Ant_colony_optimization_algorithms)
4. Dorigo, M., Stützle, T. (2019). Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances. In: Gendreau, M., Potvin, JY. (eds) Handbook of Metaheuristics. International Series in Operations Research & Management Science, vol 272. Springer, Cham.
5. Roggi, G., Meraglia, S., & Lovera, M. (2022). Leonardo Drone Contest 2021: Politecnico di Milano team architecture. In 2022 IEEE International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) (pp. 191–196). <https://doi.org/10.1109/ICUAS54217.2022.9836168>
6. Soria, E., Schiano, F., & Floreano, D. (2020). SwarmLab: A MATLAB drone swarm simulator. In 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 8005–8011). <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341677>
7. Adams, J. A., & Humphrey, C. M. (2024). Human–swarm interaction in complex urban environments: Insights from DARPA OFFSET. IEEE Transactions on Field Robotics, 41(3), 123–135. <https://doi.org/10.1002/rob.22345>
8. Swarmer (2024). <https://www.getswarmer.com/>
9. Jun Tang; Gang Liu; Qingtao Pan. Review on Representative Swarm Intelligence Algorithms for Solving Optimization Problems: Applications and Trends. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica ( Volume: 8, Issue: 10, October 2021), pp. 1627 – 1643. DOI: 10.1109/JAS.2021.1004129
10. Luong Vuong Nguyen. Swarm Intelligence–Based Multi–Robotics: A Comprehensive Review. AppliedMath 2024, 4(4), 1192–1210; <https://doi.org/10.3390/appliedmath4040064>
11. Wei W, He X, Wang X, Wang M. Research on swarm munitions cooperative warfare. In: International Conference on Autonomous Unmanned Systems. Singapore: Springer; 2021. pp. 717–727.