

В.Ю. Корольов, М.І. Огурцов, О.В. Рибальченко, О.М. Ходзінський

РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ЛОКАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЇ ЗГРАЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ БПЛА ПІД ЧАС РУХУ РОЮ

З кожним роком зростають обсяги застосування безпілотних літальних апаратів та розширюються сфери такого застосування. Водночас поступово акцент зміщується від застосування окремих безпілотних літальних апаратів до використання роїв безпілотних літальних апаратів, оскільки для багатьох задач (наприклад, обстеження сільськогосподарських ділянок, зрошення і т.д.) це є ефективнішим, ніж застосування окремих безпілотних літальних апаратів.

Метою даної роботи є розробка алгоритму побудови системи локального позиціонування рою безпілотних літальних апаратів для утримання сталої структури під час руху рою впродовж виконання ним поставлених задач в двовимірній та тривимірній постановках. Однак слід вважати, що роєм керує один оператор, незважаючи на кількість елементів рою. Додатковим обмеженням розробленого алгоритму має бути запобігання потенційних зіткнень безпілотних літальних апаратів під час повітряних маневрів.

У рамках виконання роботи поставлено задачу формування та підтримання структури та конфігурації зграї сільськогосподарських безпілотних літальних апаратів у двовимірній та тривимірній постановках. Виконано формалізацію поставленої задачі. Розглянуті можливі методи відображення графа, що утворюється роєм безпілотних літальних апаратів, у двовимірній Евклідовій простір методом формування базового трикутника для створення відносної системи координат. Для визначення координат решти вершин графа на площині та відповідного підвищення точності локального позиціонування застосований метод мультилатерації. Розглянуті спрощені варіанти – застосування алгоритму трилатерації та триангуляції.

тановці розглянуто можливість застосування алгоритму багатовимірного масштабування з використанням методів багатовимірного масштабування/скорочення вимірів. Розроблена практична реалізація створеного алгоритму показала свою працездатність під час проведення практичних експериментів, дозволяючи визначити локальне позиціонування елементів рою, що містить від трьох до двадцяти елементів.

Ключові слова: БПЛА, дрон, рій, роєве керування, локальне позиціонування, мультилатерація, триангуляція, Евклідов простір.

V. Korolyov, M. Ogurtsov, O. Rybalchenko, O. Khodzinskyi

DEVELOPMENT OF THE LOCAL NAVIGATION ALGORITHM OF THE AGRICULTURAL UAVS FLOCK DURING SWARM MOVEMENT

Every year, the scope of unmanned aerial vehicles use is growing, and the amount of such applications is expanding. To enhance efficiency, the focus of development is shifting from individual unmanned aerial vehicles to utilizing swarms for various applications such as agricultural surveys, irrigation, etc.

The purpose of this work is to develop an algorithm for building a local positioning system for a swarm of unmanned aerial vehicles to maintain a stable structure during the swarm movement while performing its tasks in two-dimensional and three-dimensional settings. At the same time, it should be assumed that the swarm is controlled by one operator, regardless of the number of swarm elements. An additional limitation of the developed algorithm should be the prevention of potential collisions of unmanned aerial vehicles during aerial maneuvers.

As part of the work, the task of forming and maintaining the structure and configuration of an agricultural unmanned aerial vehicles flock in two-dimensional and three-dimensional settings was set. The formalization of the given task has been completed. Considered possible methods of mapping the graph formed by an unmanned aerial vehicles swarm into two-dimensional Euclidean space by the forming a basic triangle method to create a relative coordinate system. To determine the coordinates of the remaining graph vertices

on the plane and correspondingly increase the accuracy of local positioning, the multilateration method is used. Considered simplified options – application of the trilateration and triangulation algorithms.

For the problem in a three-dimensional setting, the possibility of applying the multidimensional scaling algorithm using the methods of multidimensional scaling/reduction of dimensions is considered. The developed practical implementation of the created algorithm showed its efficiency during practical experiments, allowing to determine the local positioning of elements of a swarm containing from three to twenty elements.

Key words: UAV, drone, swarm, swarm control, local positioning, multilateration, triangulation, Euclidean space.

Вступ

З кожним роком зростають обсяги застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та розширюються сфери такого застосування. При цьому поступово акцент зміщується від застосування окремих БПЛА до використання роїв БПЛА, оскільки для багатьох задач (наприклад, обстеження сільськогосподарських ділянок, зрошення і т.д.) це є ефективнішим, аніж застосування окремих БПЛА [1]. Підвищення ефективності досягається за рахунок зменшення кількості операторів, потрібних для функціонування тієї ж кількості БПЛА як елементів рою, замість їх використання в режимі «один оператор – один БПЛА». До того ж використання роїв уможлиблює застосування групового керування з елементами штучного інтелекту, що в багатьох задачах перевершує можливості та швидкість реакції людини-оператора [2]. Але водночас існує ряд проблем, зокрема, у ряді випадків недоступність GPS для сільськогосподарських дронів, які виконують завдання обробки сільськогосподарських угідь від шкідників чи моніторингу посівів [3].

Мета

Метою даної роботи є розроблення алгоритму побудови системи локального позиціонування рою БПЛА для утримання сталої структури під час руху рою впродовж виконання ним поставлених завдань в двовимірній та тривимірній постановках. Водночас слід зважати, що роєм керує один оператор, незалежно від кількості елементів рою. Додатковим обмеженням для розробленого алгоритму має бути запобігання потенційних зіткнень БПЛА під час повітряних маневрів.

Зазвичай в подібних задачах не використовують варіант з розробкою системи локального взаємного позиціонування елементів рою, поданий в даній роботі.

Аналіз попередніх розробок

В існуючих наукових дослідженнях, присвячених розв'язуванню поставленої задачі [1-7], слід виділити підходи, засновані на використанні парадигми Інтернету речей та засобах штучного інтелекту [4]. Варто зазначити, що вони є ресурсоемними, вимагають значних обчислювальних потужностей, що обмежує сферу можливого застосування. Цікавим також є застосування паралельних генетичних алгоритмів та інших методів комбінаторної оптимізації [5], хоча слід підкреслити, що, на думку авторів, розв'язування поставленої задачі у низці застосувань можливе без використання подібних методів простішим шляхом.

Іншим підходом є попереднє планування маршрутів рою БПЛА [6], але це значно звужує сферу застосування роїв на основі такого підходу.

Найпопулярнішим варіантом є використання алгоритмів оптимізації роєм частинок [6-7], хоча цей метод також є достатньо обчислювально трудомістким.

Основна частина

Розглянемо спочатку, як задача може розв'язуватися у спрощеній, двовимірній постановці, яка є застосовною, коли рій рухається на приблизно однаковій висоті, і різницею висоти можна знехтувати. Цей варіант застосовний для рою наземних дронів, що комунікують в зоні прямого поширення радіохвиль. Розглядатимемо

елементи рою як гомогенні, хоча із додаванням додаткових параметрів та обмежень можливе використання гетерогенних БПЛА.

Змістовно маємо набір дронів, які мають сформувати рій. В даній роботі розглядається рій до 20 дронів. Кожен дрон оснащений набором датчиків (GPS, компас, акселерометр, висотомір), що дозволить визначати взаємні позиції та побудову й утримання структури рою. Задачею є досягнення потрібної конфігурації взаємного розміщення рою за мінімальний час та подальше утримання цієї конфігурації з мінімальними витратами сумарного льотного ресурсу всіх елементів рою. Алгоритм має функціонувати ітеративно, з частотою повторення не менше, ніж раз на кілька секунд, щоб враховувати можливі зміни взаємного положення елементів рою. Конфігурація, яку має сформувати рій, повинна забезпечувати рівні відстані між суміжними елементами рою, тобто три БПЛА утворять рівносторонній трикутник, чотири – квадрат і так далі. Таким чином маємо:

Вхідні дані – дані з датчиків кожного елемента рою:

- координати GPS;
- напрям руху;
- швидкість;
- висота.

Параметри:

- максимальна швидкість руху БПЛА;
- максимально допустима висота польоту БПЛА;
- мінімально допустима висота польоту БПЛА;
- максимальна дальність польоту БПЛА;
- мінімально допустима відстань між БПЛА.

Обмеження:

Мінімізація сумарного додаткового руху всіх БПЛА рою, потрібного для відновлення заданої конфігурації.

Вихідні дані:

GPS координати точок, куди має переміститись кожен БПЛА для відновлення заданої конфігурації рою.

1. Двовимірна постановка задачі

Двовимірна постановка задачі передбачатиме відображення графа, що утворюється роєм БПЛА, спочатку у тривимірний Евклідов простір [8], який потім має бути приведений до двовимірного простору.

Розглянемо *формальну постановку задачі*:

$G(V, E)$ – повний граф БПЛА, заданий

$n = |V|$ – кількість вершин графа,

$V = \{v_1, \dots, v_n\}$, кожна вершина представляє собою елемент рою, окремий БПЛА, що має набір із трьох координат

(x_i, y_i, z_i) , $i = \overline{1, n}$ – координати цих вершин, де x_i, y_i невідомі, а z_i відомі.

$E = \{e_{12}, e_{13}, \dots, e_{n-1, n}\}$ – відомі довжини ребер.

Розглянемо тепер відображення графа з тривимірного Евклідова простору до задачі на площині (Рис. 1).

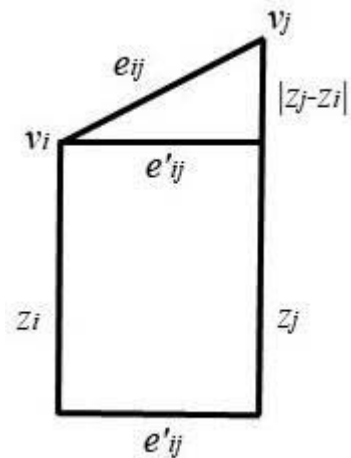


Рис. 1. Зведення тривимірної задачі до задачі на площині

З рисунка легко побачити, що довжина проекції ребра e_{ij} між вершинами v_i, v_j на площину $ХОУ$:

$$e'_{ij} = \sqrt{e_{ij}^2 - (z_j - z_i)^2}$$

Для того, щоб сформувати на основі відомих координат елементів рою, потрібну конфігурацію, спочатку треба обрати базовий (найбільший) трикутник. Його ви-

користання дозволить формувати потрібну конфігурацію всередині базового трикутника та не вимагатиме збільшення максимальної відстані між будь-якими двома елементами рою.

Базовий трикутник у графі можна вибрати за такими ознаками:

- найбільша сума сторін $a+b+c$, де a, b, c – ребра графа для деякої трійки вершин.

або

- найбільша площа $S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$, де $p = \frac{a+b+c}{2}$ – півпериметр.

В даній роботі використаний саме базовий трикутник за найбільшою площею.

При виборі базового трикутника деякі конфігурації рою призводять до того, що частина елементів рою можуть опинитись ззовні базового трикутника (наприклад, квадрат для рою з чотирьох елементів). Це штатна ситуація, в подальшому позиція елементів буде скоригована і вони перемістяться всередину базового трикутника.

2. Фіксація базового трикутника на площині

Після вибору базового трикутника зберігається кілька ступенів свободи у разі розміщення проєкції графа на площині. Виберемо такі: початок системи координат (перша вершина трикутника), напрямок осі абсцис (друга вершина трикутника), напрямок осі ординат (третья вершина трикутника).

- 1) Зафіксуємо координати вершини v_b як початок координат: $v_b = (0, 0)$
- 2) Сторона $v_b v_c$ нехай буде частиною осі OX : $v_c = (e'_{bc}, 0) = (a, 0)$
- 3) y_a – координату вершини v_a визначимо з площі трикутника:

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} = \frac{ay_a}{2}$$

- 4) x_a – координату вершини v_a визначимо за теоремою Піфагора: $x_a = \sqrt{c^2 - y_a^2}$

Для визначення координат решти вершин графа на площині можна застосувати метод мультилатерації [9].

Оскільки доступні дані супутникового позиціонування, то задача підтримки структури рою може бути зведена до підтримки позиції БПЛА у заданій локації геометричної фігури на основі абсолютних значень координат. Але у випадку малих відстаней між БПЛА точність визначення координат може бути недостатньою та порушуватись мінімальна відстань між БПЛА, введена для запобігання зіткненням.

3. Проблема підвищення точності локального позиціонування

Глобальне позиціонування часто не дає достатнього рівня точності для виконання поставленої задачі – потенційні похибки, що у випадку двох БПЛА, які швидко рухаються, можуть накладатись та сумуватись, що може викликати зіткнення елементів рою. Одним з варіантів з вирішення цієї проблеми є застосування методів мультилатерації – локального позиціонування, яке не залежить від супутникових систем глобального позиціонування і є точнішим за GPS [10].

Спрощений алгоритм трилатерації складається з наступних кроків:

Етап 0. Калібрування відстані між вузлами за потужністю.

Вхідні дані: таблиця відстані на основі калібрування.

Вихідні дані: відстань між вузлами.

Етап 1. Кожний вузол мережі отримує інформацію про потужність сигналу від інших вузлів і передає цим вузлам свої дані.

Етап 2. Кожний вузол для всіх видимих вузлів розраховує відстані за таблицею та розраховує локальні координати, розв'язуючи систему рівнянь трилатерації. Отримані значення надсилаються всім вузлам [11].

Наступним етапом стає застосування алгоритмів триангуляції.

4. Задача в тривимірній постановці

Розглянемо тепер тривимірну постановку задачі. Маємо до двадцяти об'єктів, відстані між якими відомі, та НСК, до якої теж відома відстань. Крім того, всі об'єкти (1-20 шт.) можуть постійно окремо дистанційно керуватись (тобто на НСК отримується телеметрія і вимірюється відстань за силою сигналу та часом відправлення/отримання пакетів даних), коли це потрібно оператору. Для НСК відомі абсолютні координати. Таким чином маємо таку постановку задачі:

Дано матрицю відстаней між двомадцятьма однією точкою тривимірного простору. Для однієї з цих точок відомі її абсолютні координати. Треба розробити алгоритм побудови відносної системи координат для цих точок.

Алгоритм багатовимірного масштабування. Задачу визначення координат об'єктів за відстанями між ними можна звести до відомої задачі скорочення розмірності вхідних даних. Загальний підхід до вирішення проблеми скорочення розмірності даних полягає у виконанні послідовних кроків для зменшення кількості змінних, що описують ці дані, а результатом роботи відповідних алгоритмів є впорядкована множина головних змінних.

Методи багатовимірного масштабування/скорочення вимірів (Multidimensional Scaling – MDS) застосовані до різних типів даних [12].

Основна ідея MDS полягає в тому, щоб знайти загальний процес у низьковимірному просторі, який мінімізує дисперсію (D) у високовимірному просторі та залежну дисперсію (d) у низьковимірному просторі. Маючи матрицю несхожості або відстані D , що представляє різницю між точками i та j у просторі, де D_{ij} є, евклідовою відстанню, MDS намагається знайти набір координат x_i та x_j . Це робиться в низьковимірному просторі, щоб евклідова відстань між точками i та j (позначена d_{ij}) була якомога ближчою до різниці D_{ij} .

Метрикою алгоритму MDS є функція напруги S (цільова функція):

$$S = \sqrt{W_{ij} * (d_{ij} - D_{ij})^2}$$

де W_{ij} — це вага, яку можна використовувати для підкреслення або зменшення акценту на певних відстанях.

d_{ij} — евклідова відстань між точками даних i та j у просторі нижчого виміру.

D_{ij} — це відмінність (відстань) між точками даних i та j у просторі великої вимірності.

Функція напруги S визначається як:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (l_{i,j} - \hat{l}_{i,j})^2}$$

де l_{ij} — відстань між точками даних i та j у вихідному просторі, $\hat{l}_{i,j}$ — відстань між точками даних i та j у просторі нижчої вимірності, а n — число точок даних. Функція напруги S є мірою відхилення відстаней у низьковимірному просторі від відстаней у вихідному просторі та використовується для оцінки якості проєкції.

Для створення відносної системи координат у кількості точок від трьох до двадцяти однієї у тривимірному просторі на основі матриці відстаней та абсолютних координат однієї точки, ми використали розроблену нами модифікацію алгоритму MDS. Додатково потрібно було налаштувати вихідні координати, щоб включити відомі абсолютні координати однієї точки. При цьому акцент робився на виконанні обчислень на одноплатних комп'ютерах типу Raspberry Pi 4B на борту дронів [13].

Для практичної реалізації поставленої задачі на основі розробленого алгоритму був створений сценарій Python, який використовує бібліотеку scikit-learn для випадку 10 БПЛА. Вони містяться у локальній системі координат та один керуючий об'єкт прив'язаний до глобальної системи координат.

Алгоритм MDS застосований до матриці відстаней між дронами дозволив знайти відносні координати десяти точок у тривимірному просторі (локальна система координат рою), а потім відкоригував ці відносні координати, щоб включити відомі абсолютні координати однієї точки (Рис. 2).

Таким чином десять об'єктів знаходяться у локальній системі координат без

прив'язування до абсолютної географічної системи координат.

Розроблений сценарій застосовує MDS до матриці відстаней, щоб знайти відносні координати точок (у прикладі – десяти) у тривимірному просторі, а потім коригує ці відносні координати, з метою включення відомих абсолютних координат однієї точки.

Relative Coordinate System for Ten Points in 3D Space

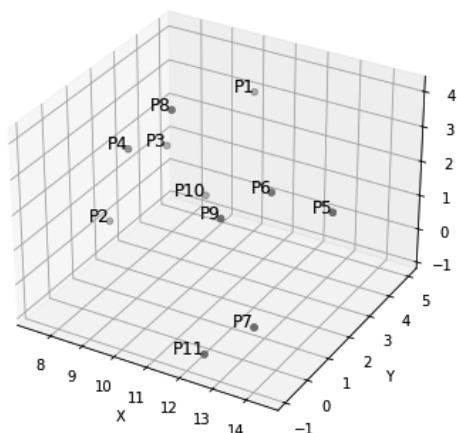


Рис. 2. Подання матриці відстаней між одинадцятьма об'єктами у вигляді неорієнтованого повнозв'язного графу

Нарешті, він малює точки на тривимірному графіку за допомогою matplotlib, причому кожна точка позначена для ідентифікації. Можна налаштувати масив `distances_matrix` і змінну `absolute_coordinates` для представлення різних відстаней між точками та різними відомими абсолютними координатами відповідно (Рис. 3).

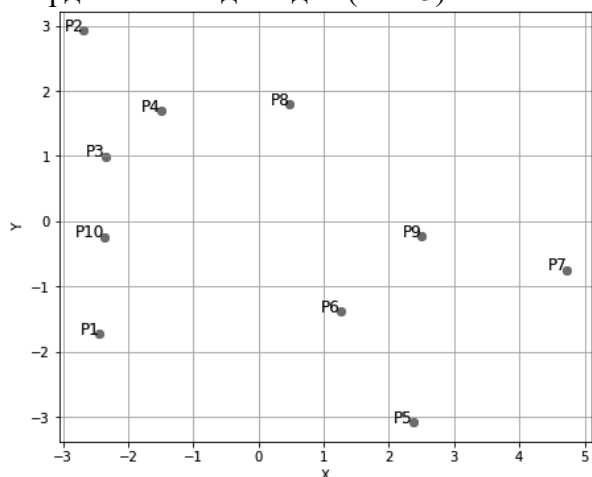


Рис. 3. Результат розв'язання задачі MDS для десятих об'єктів з побудовою локальної системи координат

Отож, модифікований алгоритм MDS, застосований до матриці відстаней

між дронами, дозволяє знайти відносні координати точок у тривимірному просторі (локальна система координат рою) для випадків від трьох до двадцяти БПЛА.

У разі його застосування побудова локальної системи позиціонування елементів рою є менш обчислювально складною, ніж в альтернативних постановках [1-7].

Висновки

У рамках виконання роботи поставлено задачу формування та підтримання структури та конфігурації зграї сільськогосподарських БПЛА в двовимірній та тривимірній постановках. Виконано формалізацію поставленої задачі. Розглянуті можливі методи відображення графа, що утворюється роєм БПЛА, у двовимірній Евклідовій простір методом формування базового трикутника для створення відносної системи координат. Для визначення координат решти вершин графа на площині та відповідного підвищення точності локального позиціонування застосований метод мультилатерації. Розглянуті спрощені варіанти – застосування алгоритму трилатерації та триангуляції.

Для задачі в тривимірній постановці розглянуто можливість застосування алгоритму багатовимірного масштабування з використанням методів багатовимірного масштабування/скорочення вимірів. Розроблена практична реалізація створеного алгоритму показала свою працездатність під час проведення практичних експериментів, дозволяючи визначити локальне позиціонування елементів рою, що містить від трьох до двадцяти елементів.

Напрямом подальших досліджень є розроблення алгоритму, що дозволяє на основі визначених локальних координат ліквідувати збурення, внесені в структуру рою через внутрішні чи зовнішні чинники, наприклад, втрату одного з елементів рою [14].

Література

1. Y. Zhou, R. Bin, W. Wei, UAV swarm intelligence: Recent advances and future trends, *Ieee Access* 8 (2020): 183856-183878.
2. M. Campion, R. Prakash, F. Saleh, UAV swarm communication and con-

- trol architectures: a review, *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2018. 7.2. Pp. 93-106.
3. Сучасні методи цифрового моніторингу в рослинництві: монографія/ Зозуля О.Л. та ін. К.: *КНУ імені Тараса Шевченка*, 2023. 254 с.
 4. X. Wang, G. Chen, H. Gong, J. Jiang, UAV swarm autonomous control based on Internet of Things and artificial intelligence algorithms, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2021. 40(4). Pp. 7121-7133.
 5. V. Roberge, M. Tarbouchi, G. Labonté, Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 2012. 9(1). Pp. 132-141. <http://dx.doi.org/10.1109/TII.2012.2198665>
 6. S. Shao, Y. Peng, C. He, Y. Du, Efficient path planning for UAV formation via comprehensively improved particle swarm optimization. *ISA transactions*, 2020. 97. Pp. 415-430.
 7. M. D. Phung, Q. P. Ha, Safety-enhanced UAV path planning with spherical vector-based particle swarm optimization. *Applied Soft Computing*, 2021. 107. Pp. 107376. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107376>
 8. D. Sikeridis, E. Eleni Tsiropoulou, M. Devetsikiotis, S. Papavassiliou, Self-adaptive energy efficient operation in UAV-assisted public safety networks, 2018 IEEE 19th international workshop on signal processing advances in wireless communications (SPAWC) 2018, June, IEEE. 2018. Pp. 1-5.
 9. S. N. Othman, Node positioning in zigbee network using trilateration method based on the received signal strength indicator (RSSI). *European Journal of Scientific Research*, 2010. 46(1). Pp. 048-061.
 10. F. He, T. Zhou, W. Xiong, S. M. Hasheminnasab, A. Habib, Automated aerial triangulation for UAV-based mapping, *Remote Sensing*, 10(12). 2018, p. 1952. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10121952>
 11. B. Yang, E. Yang, L. Yu, A. Loeliger, High-precision UWB-based localisation for UAV in extremely confined environments, *IEEE Sensors Journal*, 2021. 22(1). Pp. 1020-1029.
 12. R. Chen, B. Yang, W Zhang, Distributed and collaborative localization for swarming UAVs, *IEEE Internet of Things Journal*, 2020. 8(6). Pp. 5062-5074.
 13. M. Ogurtsov, V. Korolyov, O. Khodzinskyi, Improving the Productivity of UAV Operations Based on Granular Computing and Fuzzy Sets, 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD) 19-21 Oct. 2021. 2021, Pp. 33-36. <https://doi.org/10.1109/APUAVD53804.2021.9615419>
 14. V.P. Horbulin, L.F. Hulianytskyi, I.V. Sergienko, Planning of Logistics Missions of the “UAV+Vehicle” Hybrid Systems, *Cybernetics and System Analysis*, 59, 2023. Pp. 733-742. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00609-8>

References

1. Y. Zhou, R. Bin, W. Wei, UAV swarm intelligence: Recent advances and future trends, *Ieee Access* 8 (2020): 183856-183878.
2. M. Campion, R. Prakash, F. Saleh, UAV swarm communication and control architectures: a review, *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2018. 7.2. Pp. 93-106.
3. Modern methods of digital monitoring in crop production: monography/ Zozylyya et al. K.: *Taras Shevchenko National University of Kyiv*, 2023. 254 p.
4. X. Wang, G. Chen, H. Gong, J. Jiang, UAV swarm autonomous control based on Internet of Things and artificial intelligence algorithms, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2021. 40(4). Pp. 7121-7133.

5. V. Roberge, M. Tarbouchi, G. Labonté, Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 2012. 9(1). Pp. 132-141. <http://dx.doi.org/10.1109/TII.2012.2198665>
6. S. Shao, Y. Peng, C. He, Y. Du, Efficient path planning for UAV formation via comprehensively improved particle swarm optimization. *ISA transactions*, 2020. 97. Pp. 415-430.
7. M. D. Phung, Q. P. Ha, Safety-enhanced UAV path planning with spherical vector-based particle swarm optimization. *Applied Soft Computing*, 2021. 107. Pp. 107376. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107376>
8. D. Sikeridis, E. EleniTsirpoulou, M. Devetsikiotis, S. Papavassiliou, Self-adaptive energy efficient operation in UAV-assisted public safety networks, 2018 IEEE 19th international workshop on signal processing advances in wireless communications (SPAWC) 2018, June, IEEE. 2018. Pp. 1-5.
9. S. N. Othman, Node positioning in zigbee network using trilateration method based on the received signal strength indicator (RSSI). *European Journal of Scientific Research*, 2010. 46(1). Pp. 048-061.
10. F. He, T. Zhou, W. Xiong, S. M. Hasheminasab, A. Habib, Automated aerial triangulation for UAV-based mapping, *Remote Sensing*, 10(12). 2018, p. 1952. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10121952>
11. B. Yang, E. Yang, L. Yu, A. Loeliger, High-precision UWB-based localisation for UAV in extremely confined environments, *IEEE Sensors Journal*, 2021. 22(1). Pp. 1020-1029.
12. R. Chen, B. Yang, W Zhang, Distributed and collaborative localization for swarming UAVs, *IEEE Internet of Things Journal*, 2020. 8(6). Pp. 5062-5074.
13. M. Ogurtsov, V. Korolyov, O. Khodzinskyi, Improving the Productivity of UAV Operations Based on Granular Computing and Fuzzy Sets, 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD) 19-21 Oct. 2021. 2021, Pp. 33-36. <https://doi.org/10.1109/APUAVD53804.2021.9615419>
14. V.P. Horbulin, L.F. Hulianytskyi, I.V. Sergienko, Planning of Logistics Missions of the “UAV+Vehicle” Hybrid Systems, *Cybernetics and System Analysis*, 59, 2023. Pp. 733–742. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00609-8>

Одержано: 09.04.2024

Внутрішня рецензія отримана: 19.04.2024

Зовнішня рецензія отримана: 28.04.2024

Про авторів:

¹ Корольов Вячеслав Юрійович,
Кандидат технічних наук,
Старший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0003-1143-5846>.

¹ Огурцов Максим Ігорович,
Науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0002-6167-5111>.

¹ Рибальченко Олег Валерійович,
доктор філософії,
молодший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0002-5716-030X>.

¹ Ходзінський Олександр Миколайович,
Кандидат фізико-математичних наук,
Старший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0003-4574-3628>.

Місце роботи авторів:

¹ Інститут кібернетики
імені В.М. Глушкова
НАН України,
тел. +38-044-526-55-85
E-mail: incyb@incyb.kiev.ua,
Сайт: www.incyb.kiev.ua