

ФОРМУВАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ СТЕЖЕННЯ СУЧАСНИХ БПЛА НА БАЗІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Юрій Кубрак

кандидат технічних наук доцент кафедра інженерії програмного забезпечення

Державний університет «Житомирська політехніка» 10005, Україна, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103, kipz_kyua@ztu.edu.ua,

ORCID: 0000-0002-1122-7580, Scopus Author ID: 57215318599

Дмитро Плечистий

кандидат технічних наук доцент кафедра комп'ютерних наук

Державний університет «Житомирська політехніка» 10005, Україна, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103, kkn_pdd@ztu.edu.ua,

ORCID: 0000-0002-4803-159X

Ігор Толстой

старший викладач кафедра інженерії програмного забезпечення

Державний університет «Житомирська політехніка» 10005, Україна, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103, igor-tolstoy@itlab-studio.com,

ORCID: 0000-0001-8879-8827

У статті розкрито принципи формування комплексної системи стеження сучасних БПЛА на базі штучного інтелекту. Окреслено сферу застосування сучасних безпілотних комплексів та особливості їх структурної ідентифікації. Підкреслено, що автономність безпілотних літальних апаратів визначається рівнем коефіцієнту свободи від контролю та варіюється від 0 до 100%. Наголошено на значущості комплексної системи стеження сучасних БПЛА на базі штучного інтелекту як механізму відстеження та контролю. Запропонована комплексна система стеження, яка не вимагає наявності GSM або обов'язкового встановлення веб-сервера на базі наземної станції, що є однією з головних проблем сьогодення. Наголошено, що розроблена система займає менше часу для відстеження БПЛА та має мінімальну кількість обладнання, що позитивно впливає на кінцеву вартість системи, а за рахунок відсутності статичного Інтернет-протоколу для веб-сервера виключається залежність від порту та можливості переадресації портів. Графічно представлено структуру комплексної системи та описано принцип взаємодії окремих модулів. У математичному представленні розкрито механізм моделювання загортової нейронної мережі, яка використовується з метою зворотного зв'язку для підвищення точності розпізнавання об'єктів. Зазначається, що модуль стеження ґрунтується на алгоритмі розпізнавання фону, що дозволяє сканувати задану область. Підкреслено, що налаштування комплексної системи стеження сучасних БПЛА на базі штучного інтелекту здійснюється за рахунок регуляції повної частоти кадрів з камери, що дозволяє отримувати максимально можливу точність, а також попередня обробка відеовходу камери за типом віднімання поточного кадру від попереднього та отримання абсолютних значень попиксельно дозволяє отримати найбільш точне зображення поточного кадру. Результатом дослідження є комплексна система стеження сучасних БПЛА, яка дозволяє здійснювати високопродуктивний моніторинг за об'єктами, мінімізує кількісну складову частину бази даних за рахунок зменшення розміру тренувальної вибірки та може використовуватися як на рухомих об'єктах (літак, автомобіль, тощо) так і на наземних.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, комплексна система, детектор, стеження, розпізнавання, штучна нейронна мережа, машинне навчання.

Вступ та постановка проблеми. В умовах сьогодення безпілотні авіаційні системи стали універсальним рішенням для різних програм, пов'язаних з моніторингом та дослідженням великих відкритих територій, виявленням об'єктів та розпізнавання останніх в умовах перешкод. Безпілотні авіаційні системи являють собою більш повне визначення, ніж тради-

ційний безпілотний літальний апарат (БПЛА), оскільки він охоплює не тільки літальний апарат, а й канали зв'язку, систему керування, корисне навантаження та наземну базову станцію. Враховуючи це, є можливість стверджувати той факт, що БПЛА складається з різних підсистем, які діють у комплексі та доповнюють один одного. Кожна окрема з підсистем є важливою та виконує

функції, покладені на неї, оскільки у комплексі вони впливають на нормальну роботу літального апарату загалом.

До основних компонент, що входять до складу, варто віднести базову станцію та систему зв'язку. Безпілотний літальний апарат відповідає за корисне навантаження на борту, яке є, наприклад, системою камер для отримання зображень під час польоту. Наземна станція є центром керування всім апаратом загалом. Це допомагає користувачеві контролювати роботу літального засобу та всіх інших підсистем під час польоту, завжди приділяючи першорядну увагу безпеці експлуатації. Також важливим фактором впливу є система зв'язку, яка забезпечує бездротовий зв'язок між наземною станцією та повітряною платформою для передачі даних телеметрії та команд управління.

Однак, враховуючи неспинний розвиток сучасної науки та техніки, на сьогодні одним із головних завдань є скорочення вартості кінцевого пристрою, його унікалізація, підвищення рівня якості процесів розпізнавання та стеження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науковий підхід у сфері машинного навчання та штучного інтелекту є глобальним. Простежується зростання наукових набуток щодо впровадження механізмів машинного навчання у воєнну сферу та сферу геодезії. Здійснено підхід до формування алгоритму верифікації даних у кадастровій сфері [1].

О. І. Тумочко, et al. [2] описали підхід до автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об'єктів. Зазначена робота внесла великий вклад у науку, розроблений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів, що, на відміну від наявних, враховує зв'язаність структури стаціонарних об'єктів на різних топологічних рівнях та дозволяє оцінити важливість даного типу об'єктів в загальній структурі.

Формування процесу створення бази знань про розпізнавання об'єктів і дій противника на основі нейромереж та нечіткої логіки запропонував J.C. Culloch [3]. У свою чергу, I. Zhuravska, M. Musiyenko, O. Tohoiev [4] дослідили методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування, які покладені в основу генерації суб-оптимальних маршрутів безпілотного літального апарата.

R. Abdelfatah et al. 2021 [5] описали конструкцію безпілотних літальних апаратів та шляхи для

удосконалення систем керування такими апаратами для розширення областей їхнього використання. Також авторами розглянуті та описані наявні розробки датчиків виміру висоти БПЛА та стабілізації положення.

У [6] розроблений альтернативний спосіб налаштування системи завдяки створенню імітаційного стенду польоту БПЛА, який має багато переваг, таких як можливість розробки системи візуальної навігації з нуля, швидкий запуск та аналіз ефективності нових алгоритмів візуальної навігації, опублікованих в наукових статтях, паралельне порівняння в реальному часі різних алгоритмів візуальної навігації та оцінка їх точності, вдосконалення наявного програмного забезпечення системи.

Із зарубіжних авторів варто відзначити таких, як: Yang, K. & Xie, M. & An, J. & Zhang, X. & Su, H. & Fu, X. [7], Li, Shujuan & Ding, Junhang & Li, Jianzhi [8], P. Radanliev et al. [9], Gidwani, Ansh [10] та інші.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за окресленою тематикою, питання розкриття принципів формування комплексної системи стеження сучасних БПЛА на базі штучного інтелекту залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Розкрити принципи формування комплексної системи стеження сучасних БПЛА на базі штучного інтелекту.

Викладення основного матеріалу дослідження. Наукові дослідження та розробки сучасних БПЛА розширюються у рамках зростання сфер використання останніх. Так, БПЛА використовують для операцій розвідки, координації систем стеження, доставки вантажів по типу медикаментів, небезпечних елементів тощо у віддалені або недоступні регіони. Ступінь автономності БПЛА визначається рівнем коефіцієнту свободи від контролю, у випадку управління БПЛА з пульта дистанційного керування ступінь автономності мінімальна з показником 0%. БПЛА, побудований на одноплатному комп'ютері, має максимальну ступінь автономності з показником 100%. Відстеження БПЛА як одиначної системи, так і групи таких систем, є важливим у цілях безпеки та вирішення проблем стійкості. У разі виникнення непередбачуваних ситуацій у момент польоту система стеження здатна повідомити про місце перебування апарата та, у деяких випадках, визначити рівень ураження.

Комплексна система стеження сучасних БПЛА має на меті відстеження та контроль за шляхом

безпілотного літального апарату. Головною умовою ефективного стеження є безпроводний зв'язок між БПЛА та системою наземного стеження, проте сучасні механізми за типом Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee через обмежену дальність підключення від 10 до 100 метрів є неефективними.

Спираючись на практичні дослідження в обраній галузі, комунікаційні технології для стеження та моніторингу ґрунтуються на технології GPS та глобальній мобільній системі GSM. У комплексі дане рішення є ефективним та дієвим, однак такий підхід вимагає дублювання системи GSM як на БПЛА, так і на наземній станції, також необхідний сервер з веб-підключенням. Ще одним із недоліків є той факт, що GSM має низьку швидкість передачі та тривалу затримку передачі.

Для вирішення зазначених проблем пропонується комплексна система стеження сучасних БПЛА на базі штучного інтелекту, яка не вимагає наявності GSM або обов'язкового встановлення веб-сервера на базі наземної станції. Запропонована система займає менше часу для відстеження

БПЛА та має мінімальну кількість обладнання, що позитивно впливає на кінцеву вартість системи. За рахунок відсутності статичного Інтернет-протоколу для веб-сервера виключається залежність від порту та можливості переадресації портів.

Принцип роботи комплексної системи стеження сучасних БПЛА на базі штучного інтелекту ґрунтується на взаємозв'язку між датчиком GPS, встановленим на базі БПЛА, та супутниками. Сформовані координати місцезнаходження БПЛА на мікроконтролері шляхом передачі у вигляді HTTP-запиту направляються до наземної станції, де формується електронна таблиця, що безпосередньо зв'язана зі статичними картами Google. Шляхом встановлення системи відеостеження на БПЛА є можливість збирати дані з навколишньої середовища та аналізувати їх. Система стеження складається з двох модулів: модуля стеження та модуля виявлення об'єкта. Останній працює на основі нейронної мережі, яка забезпечує максимальну продуктивність. Модуль стеження ґрунтується на алгоритмі роз-

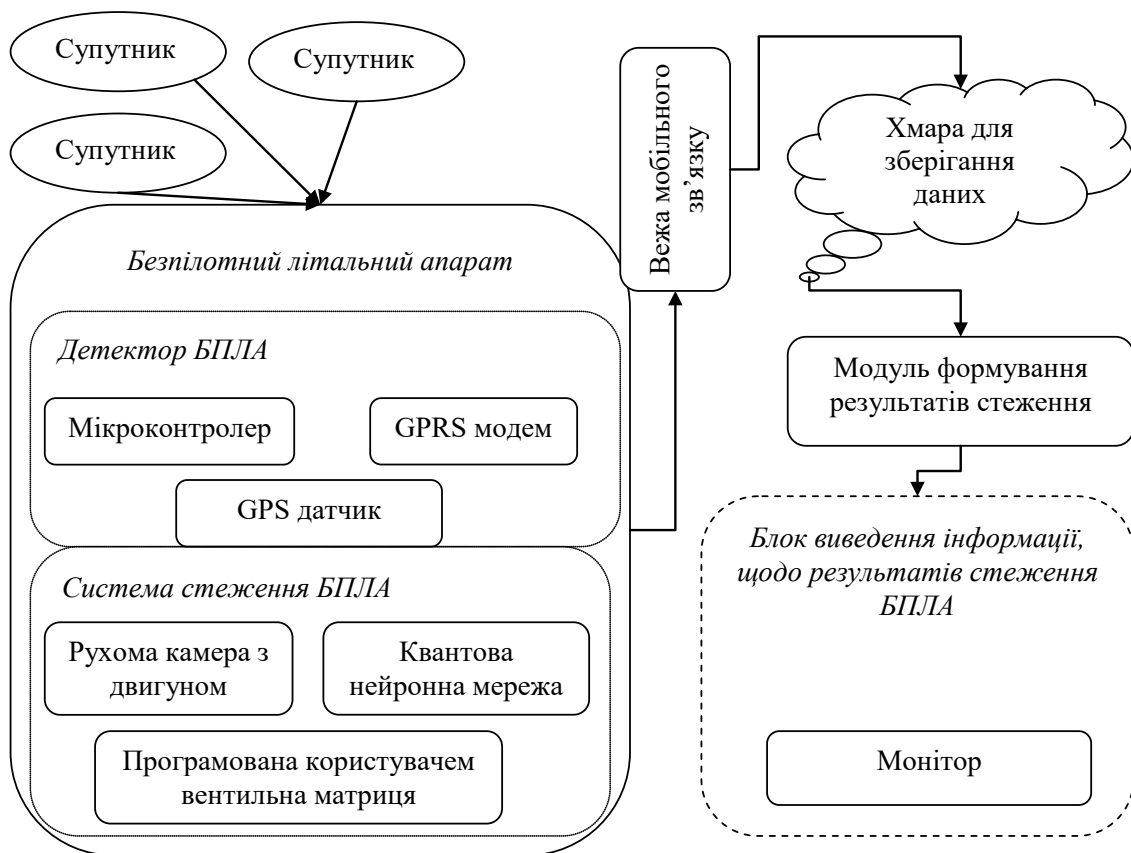


Рисунок 1 – Структурна схема комплексної системи стеження сучасних БПЛА на базі штучного інтелекту

пізнання фону, що дозволяє сканувати задану область. Штучна нейронна мережа використовується з метою зворотного зв'язку для підвищення точності розпізнавання об'єктів.

За своїм складом нейронна мережа структурована шарами, нейрони формують свої значення з попереднього шару та створюють вагову групу. Активация нейронів відбувається за допомогою лінійної функції активації, за якою здійснюється функція випрямлення лінійного вузла з пороговим значенням для вилучення ознаки, кожен нейрон вираховує власну зважену вагу входів ω_{ij} . Значення ваги передаються у блочну оперативну пам'ять для максимізації продуктивності роботи.

$$f = \sum_i^n \omega_{ij} x_i + b_j$$

де ω_{ij} – це значення ваги i -го входу (x_i) та j -го об'єкту;

b_j – це значення зміщення для j -го вихідного нейрона.

Основною структурною властивістю штучної нейронної мережі є наявність безлічі взаємозалежних шарів. Вага кожного шару та їх усунення фіксуються в процесі навчання, після закінчення навчання можна виконати певну оптимізацію, щоб видалити небажані шари та стиснути нейрони. Штучна нейронна мережа обирає певну ділянку пікселів або даних і обчислює нове значення в новому шарі карти об'єктів. Зазначена дія повторюється на всій просторовій карті вхідного шару. Як наслідок, в результаті математичної операції над двома функціями та обробкою третьої отримуємо відносно невелику кількість ваг.

$$y = ReLU \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_{ij} x_{ij} + b_j \right)$$

де функція випрямлення лінійного вузла $\max(0, x)$,

i – кількість входів нейронної мережі,

ω_{ij} – вага для i -го входу (x_i) і j -го вихідного нейрона карти ознак,

b_j – значення зсуву для j -го вихідного нейрона,

n, m – розмір згортки.

Налаштування комплексної системи стеження сучасних БПЛА на базі штучного інтелекту здійснюється за рахунок регуляції повної частоти кадрів з камери, це дозволить отримувати максимально можливу точність. Також попередня обробка відеовходу камери за типом віднімання поточного кадру від попереднього та отримання абсолютних значень попиксельно дозволить отримати найбільш точне зобра-

ження поточного кадру. Для отримання кольорового зображення зазначена процедура проводиться для кожного каналу RGB кольорового зображення, щоб отримати остаточне кольорове зображення.

У випадку, якщо є панорамування (збільшення або зменшення) руху камери, необхідно компенсувати глобальний рух всього кадру перед операцією віднімання кадру з урахуванням значення фону зображення (B). Числове значення (B) вказує на статичність фону, нечислове значення має на увазі, що об'єкт рухомий (нестатичний).

Значення фону зображення B розраховується за допомогою «алгоритма Штауффера-Грімсона», який еквівалентним гаусівської адаптації, метод максимальної правдоподібності використовується для оцінки середніх значень шляхом адаптації по одній вибірці за раз. У алгоритмі Штауффера-Грімсона інформація не використовується для керування генератором випадкових чисел для центрування, максимізації середньої придатності, середньої інформації чи виробничого виходу.

$$B = \arg_{b_{min}} \left(\sum_{k=1}^b \omega_k > T \right),$$

де T – це поріг, який є мірою мінімальної частини даних, яка повинна бути врахована фоном (B),

ω_k – це відповідне середнє значення для k -ої моделі Гаусса,

b – це загальна кількість моделей Гаусса.

Алгоритм моделює кожен піксель як суміш функцій Гаусса. У кожному кадрі для кожного пікселя відстань значення кольору пікселя обчислюється з кожного з пов'язаних K розподілів Гаусса (значення за замовчуванням $K=3$). Класифікація пікселів здійснюється з урахуванням наступних умов:

якщо значення інтенсивності кольору пікселя не відповідає ні одному значенню з K кластерів, значення за замовчуванням встановлюється у позначку 3;

якщо значення інтенсивності кольору пікселя присвоюється одному і тому ж кластеру для двох послідовних кадрів, а значення інтенсивності $x(T)$ та $x(T-1)$ знаходяться в межах 50% (налаштовується користувачем) середнього діапазону.

Середній діапазон:

$$(c_k - X, c_k + X)$$

Значення інтенсивності кольору пікселя:

$$(x(T), x(T-1))$$

де x – поточний піксель,
 X – загальна кількість пікселів,
 c_k – центральне значення Гаусса,
 T – порогове значення даних.

Оскільки існує сильна кореляція між двома послідовними зображеннями, більша частина фону необроблених зображень не буде враховуватися, і тільки об'єкти, що швидко рухаються, залишаться в залишковому зображенні. Це особливо актуально, коли об'єкт знаходиться на відстані від камери БПЛА та розмір об'єкту відносно невеликий. Слідування за об'єктом може бути апроксимовано рухом твердого тіла. Крім того, якщо пристрій стеження БПЛА на короткий час втрапить об'єкт з поля зору, все ще існує велика ймовірність того, що пристрій стеження БПЛА знайде об'єкт у просторі, але може знадобитися деяке втручання користувача. Крім того, необхідно дати камері додатковий час для повторного панорамування та фокусування.

Працює даний алгоритм за схемою, наведеною на рисунку 2.

Виявити та вірно розпізнати об'єкт виявляється можливим, якщо він знаходиться в полі зору і має допустимий розмір. Детектор повідомить про розташування об'єкта камері стеження, щоб камера могла перефокусуватися на об'єкті.

У процесі відстеження детектор продовжує надавати оцінки достовірності місця знаходження об'єкта в місці, що відстежується. Остаточне оновлене розташування може бути отримане шляхом об'єднання показників достовірності відстеження та виявлення, які сформовані штучною нейронною мережею.

$$A_d = \frac{1}{(1 + e^{-\beta_1(R_d - \alpha_1)})^{adj}}$$

$$A_t = \frac{1}{(1 + e^{-\beta_2(R_t - \alpha_2)})^{adj}}$$

$$A_f = \max(A_n, A_t)$$

де R_d – достовірність виявлення;
 R_t – рівень достовірності трека;
 A_d – показник достовірності виявлення об'єкта;
 A_t – показник достовірності відстеження об'єкта;
 A_f – загальна оцінка точності розпізнавання об'єктів;

$\beta_1, \beta_2, \alpha_1, \alpha_2$ – порогові параметри якості даних, які встановлюються користувачем та які можна використовувати під час оцінки умови в блок-схемі виявлення об'єктів на базі системи стеження сучасних БПЛА з використанням штучного інтелекту.

Таким чином, основна мета системи відстеження та виявлення полягає в тому, щоб змен-

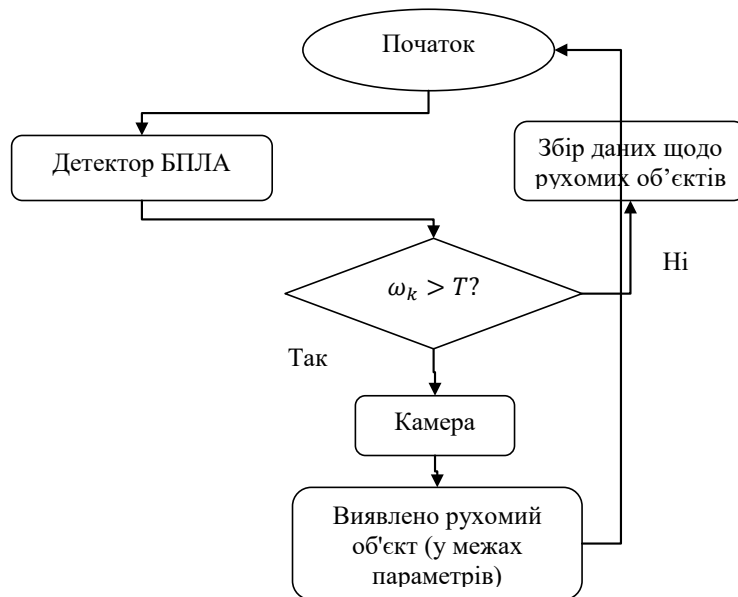


Рисунок 2 – Алгоритм реалізації системи стеження БПЛА

шити варіації необроблених даних датчика і отримати найбільш точні дані з мінімально можливою дисперсією.

Висновки. У роботі розкрито принципи формування комплексної системи стеження сучасних БПЛА на базі штучного інтелекту. Описана комплексна система стеження сучасних БПЛА на базі штучного інтелекту за рахунок використання модулю стеження та детектора дозволяє здійснювати високопродуктивний моніторинг за об'єктами, мінімізує кількісну складову частину бази даних за рахунок зменшення розміру тренувальної вибірки та може використовуватися як на рухомих об'єктах (літак, автомобіль тощо), так і на наземних.

Перспективами подальшого дослідження є розробка макету описаної комплексної системи стеження сучасних БПЛА на базі штучного інтелекту з використанням програмованої логічної інтегральної схеми.

ЛІТЕРАТУРА

1. Desyatnyuk O., Muravskiy V., Shevchuk O. Accounting Automation in Agroindustrial Enterprises Using Drones (UAVs). 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, Germany, 15-17 September 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/acit52158.2021.9548424> (date of access: 27.07.2022).
2. The method of planning the flight route of unmanned aerial vehicles while monitoring the behavior of dynamic objects in the forest-steppe area / O. I. Tymochko, et al. *Information processing systems*. 2020. 3(162),. P. 95–110. URL: <https://doi.org/10.30748/soi.2020.162.10> (date of access: 27.07.2022).
3. Culloch J.C. Novel methods of measuring the similarity and distance between complex fuzzy sets [PhD thesis]. Nottingham: University of Nottingham, 2016. 267 p.
4. Zhuravska I., Musiyenko M., Tohoiev O. Development the Heat Leak 37 Detection Method for Hidden Thermal Objects by Means the Information-Measuring Computer System. *CEUR Workshop Proc. Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019)* : Proc. of the 2nd Int. Workshop, Zaporizhzhia, Ukraine, April 15–19, 2019. Vol. 2353. P. 350–364.
5. UAV Tracking System Using Integrated Sensor Fusion with RTK-GPS / R. Abdelfatah et al. 2021 International Mobile, Intelligent, and Ubiquitous Computing Conference (MIUCC), Cairo, Egypt, 26–27 May 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/miucc52538.2021.9447646> (date of access: 27.07.2022).
6. Helical Antenna Design for Automated UAV Tracking System / F. Catargiu et al. *Journal of Military Technology*. 2018. Vol. 1, no. 1. P. 25–28. URL: <https://doi.org/10.32754/jmt.2018.1.04> (date of access: 27.07.2022).
7. Correlation filter based UAV tracking system on FPGA / K. Yang et al. *IET International Radar Conference (IET IRC 2020), Online Conference*, 2021. URL: <https://doi.org/10.1049/icp.2021.0758> (date of access: 27.07.2022).
8. Li S., Ding J., Li J. Error Analysis of Dual Antenna UAV Tracking System. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore, 2019. P. 243–250. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9050-1_28 (date of access: 27.07.2022).
9. Forecasts on future evolution of artificial intelligence and intelligent systems / P. Radanliev et al. *IEEE Access*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3169580> (date of access: 27.07.2022).
10. Gidwani A. Vehicle Tracking System based on Artificial Intelligence and Networking. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2019. Vol. 7, no. 3. P. 2689–2694. URL: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.3490> (date of access: 27.07.2022).

FORMATION OF A COMPLEX SYSTEM FOR MONITORING MODERN UAVS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Yuri Kubrak

candidate of technical sciences, associate professor

department of software engineering Zhytomyr State Technological University 103, Chudnivska str., Zhytomyr, 10005, Ukraine kipz_kyua@ztu.edu.ua,

ORCID: 0000-0002-1122-7580

Dmytro Plechystyy

candidate of technical sciences, associate professor department of computer science

Zhytomyr State Technological University 103, Chudnivska str., Zhytomyr, 10005, Ukraine kkn_pdd@ztu.edu.ua,

ORCID: 0000-0002-4803-159X

Ihor Tolstoi

Senior Lecturer department of software engineering Zhytomyr State Technological University

103, Chudnivska str., Zhytomyr, 10005, Ukraine igor-tolstoy@itlab-studio.com,

ORCID: 0000-0001-8879-8827

The article reveals the principles of forming a complex tracking system for modern UAVs based on artificial intelligence. The scope of application of modern unmanned systems and the peculiarities of their structural identification are outlined. It is emphasized that the autonomy of unmanned aerial vehicles is determined by the level of the coefficient of freedom from control and varies from 0 to 100%. The importance of a complex tracking system for modern UAVs based on artificial intelligence as a tracking and control mechanism is emphasized. A comprehensive tracking system is proposed, which does not require the presence of GSM or the mandatory installation of a web server based on a ground station, which is one of the main problems today. It is emphasized that the developed system takes less time to track UAVs and has a minimum amount of equipment, which positively affects the final cost of the system, and due to the absence of a static Internet protocol for the web server, port dependence and the possibility of port forwarding are excluded. The structure of the complex system is graphically presented and the principle of interaction of individual modules is described. In the mathematical section, the modeling mechanism of the convolutional neural network, which is used for the purpose of feedback to increase the accuracy of object recognition, is presented. It is noted that the tracking module is based on the background recognition algorithm, which allows you to scan a given area. It is emphasized that the setting of the complex tracking system of modern UAVs based on artificial intelligence is carried out due to the regulation of the full frequency of frames from the camera, which allows to obtain the maximum possible accuracy, as well as the pre-processing of the video input of the camera by the type of subtraction of the current frame from the previous one, and obtaining absolute values pixel by pixel allows get the most accurate image of the current frame. The result of the research is a complex tracking system of modern UAVs, which allows for high-performance monitoring of objects, minimizes the quantitative component of the database due to the reduction of the size of the training sample, and can be used both on moving objects (plane, car, etc.) and on land.

Key words: unmanned aerial vehicle, complex system, detector, tracking, recognition, artificial neural network, machine learning.

REFERENCES

1. Desyatnyuk O., Muravskiy V., Shevchuk O. Accounting Automation in Agroindustrial Enterprises Using Drones (UAVs). 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, Germany, 15-17 September 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/acit52158.2021.9548424> (date of access: 27.07.2022).
2. The method of planning the flight route of unmanned aerial vehicles while monitoring the behavior of dynamic objects in the forest-steppe area / O. I. Tymochko, et al. *Information processing systems*. 2020. 3(162),. P. 95–110. URL: <https://doi.org/10.30748/soi.2020.162.10> (date of access: 27.07.2022).
3. Culloch J.C. Novel methods of measuring the similarity and distance between complex fuzzy sets [PhD thesis]. Nottingham: University of Nottingham, 2016. 267 p.
4. Zhuravska I., Musiyenko M., Tohoiev O. Development the Heat Leak 37 Detection Method for Hidden Thermal Objects by Means the Information-Measuring Computer System. *CEUR Workshop Proc. Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019)* : Proc. of the 2nd Int. Workshop, Zaporizhzhia, Ukraine, April 15–19, 2019. Vol. 2353. P. 350–364.
5. UAV Tracking System Using Integrated Sensor Fusion with RTK-GPS / R. Abdelfatah et al. 2021 International Mobile, Intelligent, and Ubiquitous Computing Conference (MIUCC), Cairo, Egypt, 26–27 May 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/miucc52538.2021.9447646> (date of access: 27.07.2022).
6. Helical Antenna Design for Automated UAV Tracking System / F. Catargiu et al. *Journal of Military Technology*. 2018. Vol. 1, no. 1. P. 25–28. URL: <https://doi.org/10.32754/jmt.2018.1.04> (date of access: 27.07.2022).
7. Correlation filter based UAV tracking system on FPGA / K. Yang et al. *IET International Radar Conference (IET IRC 2020), Online Conference, 2021*. URL: <https://doi.org/10.1049/icp.2021.0758> (date of access: 27.07.2022).
8. Li S., Ding J., Li J. Error Analysis of Dual Antenna UAV Tracking System. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore, 2019. P. 243–250. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9050-1_28 (date of access: 27.07.2022).
9. Forecasts on future evolution of artificial intelligence and intelligent systems / P. Radanliev et al. *IEEE Access*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3169580> (date of access: 27.07.2022).
10. Gidwani A. Vehicle Tracking System based on Artificial Intelligence and Networking. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2019. Vol. 7, no. 3. P. 2689–2694. URL: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.3490> (date of access: 27.07.2022).

Стаття надійшла 26.05.2022