УДК 004.8:004.93:519.6:629.7 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.35

О. М. ШУШУРА
доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри цифрових технологій в енергетиці
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-3200-720X

О. С. ГЛАВАЦЬКИЙ
магістр кафедри цифрових технологій в енергетиці
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0002-5000-1397

УПРАВЛІННЯ ПРИЗЕМЛЕННЯМ КВАДРОКОПТЕРА НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

У статті розглянуто проблему автономного приземлення квадрокоптера у разі втрати зв'язку з оператором, що є важливим завданням для сучасних безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Основний акцент зроблено на використанні технологій комп'ютерного зору та нечіткої логіки для підвищення точності та надійності посадки в умовах високої невизначеності. Для обробки вхідних зображень використано модель YOLO, що забезпечує ефективне виявлення об'єктів у режимі реального часу та дозволяє ідентифікувати потенційно безпечні зони для приземлення дрону.

Інтеграція даних сенсорів і комп'ютерного зору дозволяє сформувати комплексну оцінку посадкової зони. Запропонований підхід включає алгоритми нечіткої логіки, які забезпечують адаптацію до динамічних умов та прийняття рішень у випадках неповних або шумових даних. Це особливо актуально для непередбачуваних ситуацій, таких як зміна погодних умов, наявність рухомих об'єктів або зниження якості сигналу сенсорів.

На основі дослідження було розроблено програмне забезпечення системи управління, що складається з контролера польоту та моделі обробки даних. Контролер активує автономний режим при втраті зв'язку з оператором, після чого система аналізує зображення місцевості та обирає оптимальну траєкторію для посадки. Для моделювання роботи системи використовувався симулятор LiftOff, що дозволило протестувати алгоритми у динамічних сценаріях та оптимізувати їх продуктивність.

Результати тестувань підтвердили високу точність і надійність роботи системи у різних умовах, що є важливим для застосувань у пошуково-рятувальних операціях, моніторингу територій та інших завданнях, які вимагають автономної роботи БПЛА. Запропонований підхід демонструє ефективність поєднання сучасних методів комп'ютерного зору та адаптивної нечіткої логіки для вирішення задач автономного управління квадрокоптерами.

Ключові слова: *квадрокоптер, автономне управління, комп'ютерний зір, нечітка логіка, алгоритми, дрон, автономне приземлення.*

O. M. SHUSHURA
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Digital Technologies in Energy
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0003-3200-720X

O. S. HLAVATSKYI
Master at the Department of Digital Technologies in Energy
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0002-5000-1397

QUADCOPTER LANDING CONTROL BASED ON FUZZY LOGIC AND COMPUTER VISION

The article addresses the problem of autonomous quadcopter landing in the event of loss of connection with the operator, which is a crucial task for modern unmanned aerial vehicles (UAVs). The main focus is on using computer vision and fuzzy logic technologies to improve the accuracy and reliability of landing under conditions of high uncertainty. The YOLO model is used for processing input images, ensuring efficient real-time object detection and enabling the identification of potentially safe landing zones for the drone.

The integration of sensor data and computer vision allows for a comprehensive assessment of the landing area. The proposed approach includes fuzzy logic algorithms that adapt to dynamic conditions and enable decision-making in cases of incomplete or noisy data. This is particularly relevant for unpredictable situations such as changing weather conditions, the presence of moving objects, or reduced sensor signal quality.

Based on the study, software of autonomous control system was developed, consisting of a flight controller and a data processing model. The controller activates the autonomous mode upon loss of connection with the operator, after which the system analyzes the terrain images and selects the optimal landing trajectory. To simulate the system's operation, the LiftOff simulator was used, which allowed testing the algorithms in dynamic scenarios and optimizing their performance.

The test results confirmed the system's high accuracy and reliability under various conditions, which is important for applications in search and rescue operations, territory monitoring, and other tasks requiring autonomous UAV operation. The proposed approach demonstrates the effectiveness of combining modern computer vision methods with adaptive fuzzy logic to solve quadcopter autonomous control tasks.

Key words: *quadcopter, autonomous control, computer vision, fuzzy logic, algorithms, drone, autonomous landing.*

Постановка проблеми

Забезпечення безпечного приземлення квадрокоптера у разі втрати зв'язку з оператором є однією з ключових проблем сучасних безпілотних літальних апаратів (БПЛА). У випадку аварійного відключення каналу управління дрон повинен виконати автономну посадку, з мінімальним ризиком для навколишнього середовища, техніки та людей. Ця задача ускладнюється тим, що квадрокоптери часто працюють у динамічних або невідомих умовах, де немає попередньо визначених координат чи чітко позначених зон для посадки.

Основними викликами є адаптація до змінних середовищ, точна оцінка безпечної посадкової поверхні та прийняття рішень за умов невизначеності. Сенсори, які використовуються у квадрокоптерах, можуть надавати шумові або неповні дані, що створює додаткові ризики. У складних середовищах, таких як міські локації або лісові зони, забезпечення точності навігації стає ще більш проблематичним через велику кількість потенційних перешкод.

Крім того, вимоги до обчислювальних ресурсів та енергоспоживання дронів обмежують можливості використання складних алгоритмів вбудованого аналізу. Це підсилює необхідність пошуку ефективних підходів для автономного управління у таких сценаріях. Розв'язання цієї проблеми є критично важливим для підвищення надійності квадрокоптерів у пошукових операціях, моніторингу та інших сферах застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В останні роки об'єктна детекція в зображеннях з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стала важливою складовою багатьох досліджень. Проблеми, пов'язані з великими розмірами зображень, малими об'єктами для виявлення, їх щільним розташуванням і недостатнім освітленням, значно ускладнюють завдання. У досліджених статях на дану тему пропонується метод Drone-YOLO, який є покращеною версією моделі YOLOv8 для детекції об'єктів у зображеннях з БПЛА [1–3]. Однією з основних інновацій є застосування триярусної структури PAFPN та спеціалізованої головки для детекції малих об'єктів. Це значно підвищує ефективність алгоритму у виявленні дрібних цілей, що є важливим для безпілотників, які працюють у складних умовах, наприклад, на великих висотах або у міських умовах [4–6].

Додатково було введено модуль сандвіч-об'єднання, який поєднує ознаки мережі з низькорівневими ознаками, що дозволяє краще обробляти просторову інформацію про об'єкти на різних етапах виявлення. Цей підхід значно покращує точність детекції, а також забезпечує більш ефективну обробку зображень без значних витрат на параметри [7]. Результати експериментів показують, що метод Drone-YOLO перевищує стандартні моделі YOLOv8 за точністю детекції, зокрема, на наборах даних VisDrone2019, де було досягнуто покращення на 13,4 % порівняно з базовими методами.

Крім того, у досліджених статтях що стосуються управління розглядається використання нечіткої логіки для управління квадрокоптерами, зокрема для контролю висоти та орієнтації [8; 10]. Це дозволяє дрону адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища, таких як зміни заряду батареї та варіації сигналів від сенсорів. Нечітка логіка допомагає забезпечити стійкість польоту і забезпечує стабільність навіть у випадках непередбачуваних змін, таких як падіння напруги або коливання сигналів. Це важливий аспект для автономних систем, де можливість адаптації до різних умов є критичною для їх ефективності.

Нарешті, дослідження, що поєднують нейронні мережі та нечітку логіку, як у статті Design of Combined Neural Network and Fuzzy Logic Controller for Marine Rescue Drone Trajectory-Tracking [9], продовжують розвивати адаптивні системи для дронів, що працюють в складних умовах, таких як морські рятувальні операції. Система, яка комбінує нейронні мережі та нечітку логіку, показує високу стійкість до турбулентності та здатність ефективно слідувати заданій траєкторії в умовах сильного вітру та інших зовнішніх факторів.

Ці дослідження демонструють, як поєднання сучасних методів глибокого навчання, таких як YOLO, та адаптивних підходів, як нечітка логіка, може значно покращити автономне управління дронами в складних і непередбачуваних умовах, що є важливим для рятувальних місій, моніторингу навколишнього середовища та інших застосувань в реальному часі. Сучасні квадрокоптери, що використовуються для різних завдань, часто залежать

від надійного зв'язку з оператором для стабільного польоту та виконання місій. Проблема виникає у випадку втрати або переривання зв'язку з пультом керування через технічні несправності, радіоперешкоди чи обмежену дальність сигналу. Особливо важливо забезпечити стабільність польоту та перехід у режим автономного управління за допомогою інтелектуальних алгоритмів. В умовах невизначеності або збоїв сенсорів традиційні методи управління стають неефективними. Використання методів нечіткої логіки дозволяє адаптувати роботу контролера для прийняття зважених рішень у реальному часі на основі шумових чи неповних даних.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є розробка архітектури та програмного забезпечення системи автономного управління квадрокоптером для забезпечення його стабільного польоту та безпечної посадки у разі втрати зв'язку з оператором. Особлива увага приділяється використанню методів комп'ютерного зору та нечіткої логіки для адаптивного управління в умовах невизначеності та неповних даних від сенсорів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити архітектуру та алгоритм функціонування системи для контролера квадрокоптера, що забезпечуватиме стабільність польоту та автономне управління у разі втрати зв'язку з оператором.
2. Розробити нечіткої моделі управління, що дозволить адаптувати траєкторію польоту квадрокоптера на основі нечітких даних.
3. Сформувати функції належності для лінгвістичних змінних з урахуванням характеристик квадрокоптера, погодних умов та умов польоту.
4. Інтегрувати моделі YOLO для обробки зображень у реальному часі та виявлення безпечних зон для посадки квадрокоптера.
5. Розробити програмне забезпечення системи на основі інтеграції технологій Python, OpenCV, YOLO, FuzzyLogic, Matlab та PyvJoy для ефективної обробки даних та забезпечення точності управління в реальному часі.
6. Здійснити моделювання та тестування системи в симуляторі LiftOff для оптимізації алгоритмів управління та перевірки працездатності системи у різних умовах.

Викладення основного матеріалу дослідження

Архітектура системи автономного управління квадрокоптером включає два основні компоненти: контролер квадрокоптера на основі нечіткої логіки та сенсорну модель для збору даних. Контролер аналізує вхідні дані та коригує траєкторію для забезпечення стабільності польоту. У разі втрати зв'язку з пультом, він автоматично переходить у режим автономного управління, забезпечуючи безпеку польоту. Для ідентифікації безпечних зон використовується модель YOLO (You Only Look Once) для аналізу відеопотоку у реальному часі, що дозволяє знаходити вільні ділянки для посадки. Узагальнений Алгоритм функціонування системи наведено на рисунку 1.

Як видно на рисунку 1, функціонування системи починається з запуску контролера та прийому команд від пульта. Якщо зв'язок з пультом перерваний, контролер активує автономне управління. Тоді камера фіксує зображення, яке передається на модель YOLO для аналізу. Після разі ідентифікації цілі відхилення траєкторії передаються до нечіткої моделі, яка аналізує відхилення на основі набору правил та визначають відповідні команди управління, які далі у вигляді сигналів на пропелери застосовуються для управління квадкоптером.

Нечітка модель є важливим елементом цієї системи, оскільки на ній ґрунтується робота контролера. Вона дозволяє зменшити вплив неповних або шумових даних, що часто надходять від сенсорів. Класичні алгоритми, які працюють з чіткими даними, не здатні адекватно реагувати на умови, коли точність інформації є низькою або коли середовище змінюється.

На вхід нечіткої моделі надаються відхилення від бажаної траєкторії чи інформація від сенсорів, які не обов'язково мають бути чіткими, й можуть бути представлені як нечіткі множини. На основі цих нечітких даних генеруються відповідні команди на виході, що призначені для управління пропелерами та іншими системами квадрокоптера. Щоб досягти потрібної точності моделі здійснюється формування термів лінгвістичних змінних для кожного дрона в залежності від його характеристик, погодних умов, куту нахилу. Розглянемо формування термів на прикладі лінгвістичної змінної Throttle (ручки обертів). Одним з основних завдань було обрати тип функцій належності термів. Було проведено порівняльний аналіз трапецієподібних та гаусових функцій належності, результати якого наведено в таблиці 1.

Відповідно до результатів аналізу, наведених в таблиці 1, для термів нечіткої моделі було обрано гаусову функцію належності. У якості прикладу на рисунку 2 наведено терми та їх функції належності для лінгвістичної змінної Throttle (ручки обертів).

Використання гаусових функцій належності дозволяє забезпечити плавність реакцій системи та стабільне управління квадрокоптером, що є особливо важливим під час складних маневрів чи змін умов польоту при управлінні приземленням.

Виявлення безпечних зон для приземлення здійснює підсистема комп'ютерного зору. Для цього використовується камера квадрокоптера, яка в поєднанні з моделями комп'ютерного зору дозволяє аналізувати навколишнє середовище в реальному часі та ідентифікувати оптимальні посадкові ділянки. Модель YOLO забезпечує високу

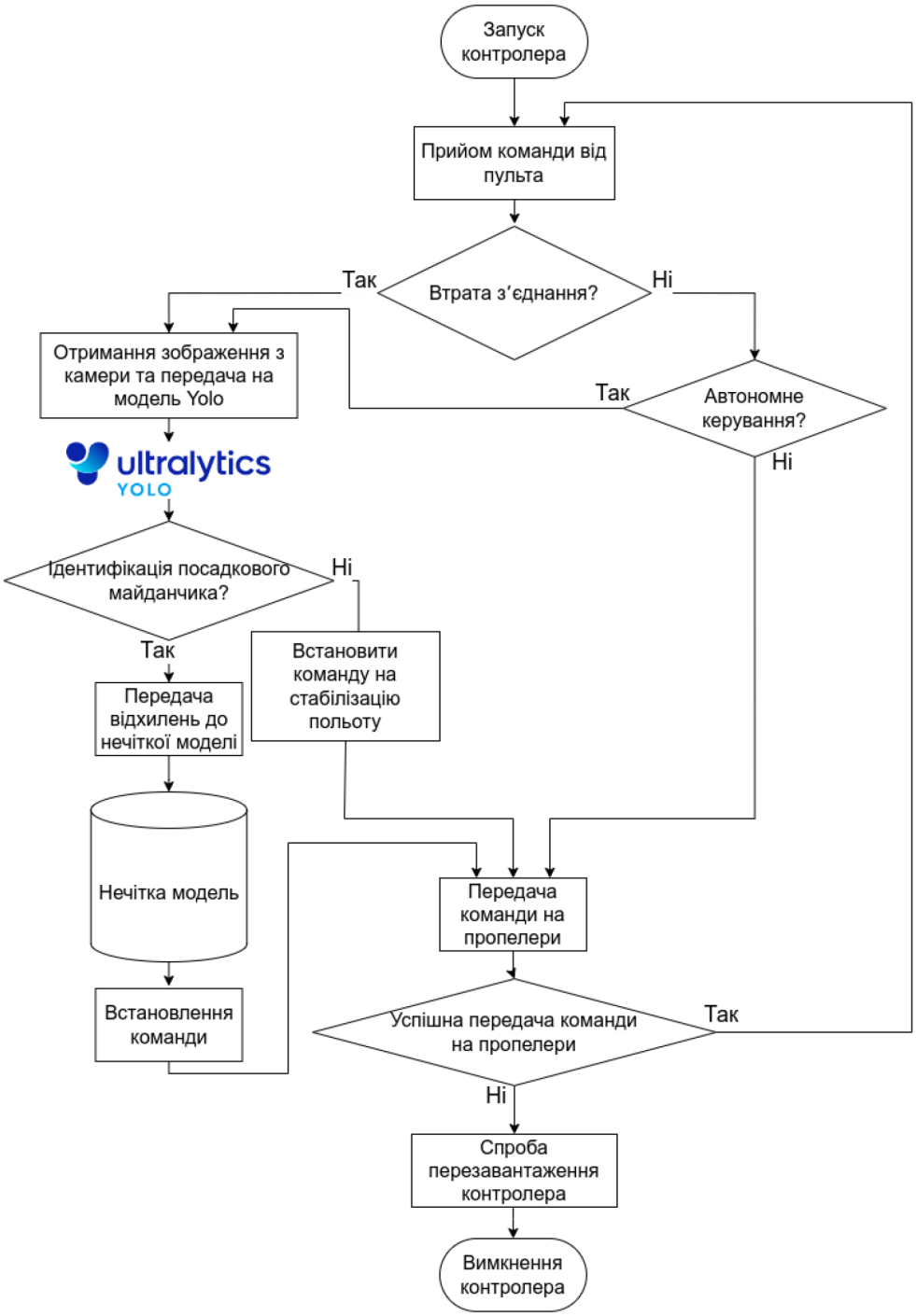

Рис. 1. Алгоритм роботи системи

Таблиця 1

Порівняння функцій належності термів

Критерій	Трапецієподібні функції	Гаусові функції
Простота реалізації	Легко задаються чотирма параметрами	Потребують складніших розрахунків
Обчислювальна швидкість	Висока	Нижча через експоненту
Плавність переходів	Різкі зміни на межах	Плавний перехід між термами
Гнучкість	Добре підходять для задач із чіткими межами	Обмежені для асиметричних або різких меж
Точність	Менша, ніж у гаусових функцій	Висока

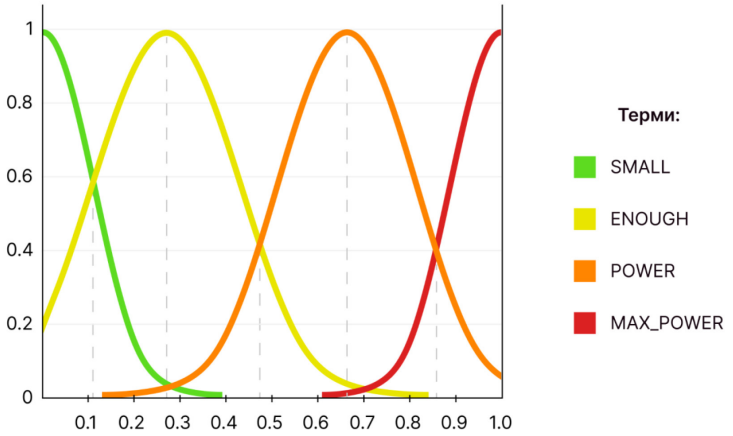

Рис. 2. Терми лінгвістичної змінної Throttle для дрону Borrum 180 X у стандартній комплектації без додаткового навантаження

швидкість і точність обробки зображень, дозволяючи квадрокоптеру швидко реагувати на зміни в навколишньому середовищі. Вона має кілька переваг, серед яких можна виділити здатність обробляти зображення з високою швидкістю, можливість одночасно працювати з кількома об'єктами та точність ідентифікації в складних умовах.

На основі вказаних моделей розроблене програмне забезпечення системи з використанням Python, OpenCV, YOLO, FuzzyLogic, Matlab та PyvJoy для забезпечення ефективного управління квадрокоптером в реальному часі. Технології Python та OpenCV обробляють відеопотік з камери квадрокоптера, виявляють об'єкти та перешкоди, забезпечуючи навігацію на основі візуальних даних. Модель YOLO інтегровано для швидкої та точної детекції об'єктів на зображеннях, таких як перешкоди чи посадкові зони, що дає можливість швидко ухвалювати рішення щодо траєкторії польоту. Засоби FuzzyLogic використовується для адаптивного коригування траєкторії квадрокоптера, коли сенсорні дані є нечіткими чи неповними, дозволяючи системі ефективно реагувати на змінні умови. Система Matlab забезпечувала тестування лінгвістичних змінних для налаштування нечіткої логіки та моделювання різних сценаріїв, що дозволяє покращити алгоритми перед їх інтеграцією у реальний процес. Засоби PyvJoy дозволяють інтегрувати систему з віртуальними джойстиками, забезпечуючи можливість тестування та симуляції поведінки квадрокоптера в різних умовах, що дає змогу протестувати програмне забезпечення перед використанням реального апарата.

Тестування даної системи в реальних умовах є складним та дорогим процесом, тому для перевірки алгоритмів та програмного забезпечення використовувалися симулятори, які дозволяють моделювати різні сценарії польоту. Симулятори, такі як LiftOff, надають можливість віртуально випробовувати алгоритми автономного управління в різних умовах, від міських ландшафтів до складних природних середовищ [11]. Приклад обробки зображення з симулятору LiftOff наведено на рисунку 3.

Рис. 3. Приклад обробленого зображення кадру у симуляторі Liftoff

Результати моделювання та тестування системи в симуляторі LiftOff дозволили покращити алгоритми управління та підтвердили готовність розробленого програмного забезпечення системи до апробації в реальних умовах.

Висновки

В роботі розглянуто застосування новітніх технологій штучного інтелекту для розробки системи автономного приземлення квадрокоптера, яка включає адаптивні підходи до управління польотом у складних умовах. Така система не тільки забезпечує високу точність навігації, але й гарантує стабільність та безпеку операцій, навіть за умов втрати зв'язку з оператором або нестабільної роботи сенсорних систем. Важливим аспектом є здатність системи приймати обґрунтовані рішення на основі нечітких та неповних даних, що дозволяє ефективно працювати в умовах невизначеності. Завдяки цьому квадрокоптер може стабільно виконувати завдання навіть в екстремальних умовах, де оточення змінюється або є складним. Результати тестувань підтвердили високу точність та надійність роботи системи у різних умовах. Запропонований підхід демонструє ефективність поєднання сучасних методів комп'ютерного зору та адаптивної нечіткої логіки для вирішення задач автономного управління квадрокоптерами.

Практична цінність результатів роботи полягає у можливості застосування розробленої системи в різних сферах, таких як моніторинг навколишнього середовища, пошуково-рятувальні місії, доставка вантажів та інші операції, де критично важливими є точність, безпека та ефективність роботи у реальному часі.

Під час подальших досліджень доцільно розглянути застосування кількох моделей комп'ютерного зору для різних погодних умов, інтеграцію в системі мультисенсорних даних, взаємодію кількох дронів у складі рою та оптимізацію траекторій руху квадрокоптера з точки зору енергоефективності.

Список використаної літератури

1. Drone-YOLO: An Efficient Neural Network Method for Target Detection in Drone Images. Drones 2023, 7(8), 526. URL: https://doi.org/10.1007/s00521-022-06960-9
2. Vision-Based Navigation Techniques for Unmanned Aerial Vehicles: Review and Challenges. Drones 2023, 7(2), 89. URL: https://doi.org/10.3390/drones7020089
3. Enhancing LiDAR Mapping with YOLO-Based Potential Dynamic Object Removal in Autonomous Driving. Sensors 2024, 24(23), 7578. URL: https://doi.org/10.3390/s24237578
4. Improved YOLOv7 Algorithm for Small Object Detection in Unmanned Aerial Vehicle Image Scenarios. Appl. Sci. 2024, 14(4), 1664. URL: https://doi.org/10.3390/app14041664
5. An Evaluation of Image Slicing and YOLO Architectures for Object Detection in UAV Images. Appl. Sci. 2024, 14(23), 11293. URL: https://doi.org/10.3390/app142311293
6. Training-Based Methods for Comparison of Object Detection Methods for Visual Object Tracking. Sensors 2018, 18(11), 3994. URL: https://doi.org/10.3390/s18113994
7. A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. Mach. Learn. Knowl. Extr. 2023, 5(4), 1680-1716. URL: https://doi.org/10.3390/make5040083
8. Control Of UAV Based On Fuzzy Logic In A Controlled Environment. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019, 14(24).
9. Design of Combined Neural Network and Fuzzy Logic Controller for Marine Rescue Drone Trajectory-Tracking. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10(11), 1716. URL: https://doi.org/10.3390/jmse10111716
10. Applications of Artificial Intelligence in Transport: An Overview. Sustainability 2019, 11(1), 189. URL: https://doi.org/10.3390/su11010189
11. Liftoff: FPV Drone Racing | LuGus. URL: https://www.lugus-studios.be/portfolio/liftoff-fpv-drone-racing

References

1. Zhang, Z. (2023). Drone-YOLO: An Efficient Neural Network Method for Target Detection in Drone Images. Drones, 7(8), 526. https://doi.org/10.3390/drones7080526
2. Arafat, M. Y., Alam, M. M., & Moh, S. (2023). Vision-Based Navigation Techniques for Unmanned Aerial Vehicles: Review and Challenges. Drones, 7(2), 89. https://doi.org/10.3390/drones7020089
3. Jeong, S., Shin, H., Kim, M. -J., Kang, D., Lee, S., & Oh, S. (2024). Enhancing LiDAR Mapping with YOLO-Based Potential Dynamic Object Removal in Autonomous Driving. Sensors, 24(23), 7578. https://doi.org/10.3390/s24237578
4. Li, X., Wei, Y., Li, J., Duan, W., Zhang, X., & Huang, Y. (2024). Improved YOLOv7 Algorithm for Small Object Detection in Unmanned Aerial Vehicle Image Scenarios. Applied Sciences, 14(4), 1664. https://doi.org/10.3390/app14041664
5. Telçeken, M., Akgun, D., & Kacar, S. (2024). An Evaluation of Image Slicing and YOLO Architectures for Object Detection in UAV Images. Applied Sciences, 14(23), 11293. https://doi.org/10.3390/app142311293

6. Delforouzi, A., Pamarthi, B., & Grzegorzek, M. (2018). Training-Based Methods for Comparison of Object Detection Methods for Visual Object Tracking. Sensors, 18(11), 3994. https://doi.org/10.3390/s18113994

7. Terven, J., Córdova-Esparza, D.-M., & Romero-González, J.-A. (2023). A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. Machine Learning and Knowledge Extraction, 5(4), 1680–1716. https://doi.org/10.3390/make5040083

8. Control of UAV based on fuzzy logic in a controlled environment. (2019). ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 14(24).

9. Pham, D.-A., & Han, S.-H. (2022). Design of Combined Neural Network and Fuzzy Logic Controller for Marine Rescue Drone Trajectory-Tracking. Journal of Marine Science and Engineering, 10(11), 1716. https://doi.org/10.3390/jmse10111716

10. Abduljabbar, R., Dia, H., Liyanage, S., & Bagloee, S. A. (2019). Applications of Artificial Intelligence in Transport: An Overview. Sustainability, 11(1), 189. https://doi.org/10.3390/su11010189

11. LuGus. (n.d.). Liftoff: FPV drone racing. LuGus Studios. Retrieved December 17, 2024, from https://www.lugus-studios.be/portfolio/liftoff-fpv-drone-racing