

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-9>

УДК 004.942:519.876.5

КОВАЛЬ Олександр

Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<http://orcid.org/0000-0003-0991-6405>

avkovalgm@gmail.com

САРИБОГА Ганна

Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<http://orcid.org/0000-0003-0805-7899>

sarigana-eds@iit.kpi.ua

СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ 3D ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА БАЗІ KINECT ТА ML

Безпілотні транспортні засоби (розумні автомобілі, дрони, роботи) повинні розуміти навколишнє середовище та реагувати на нього, щоб виконувати свої завдання. Тому вони повинні мати можливості зору, щоб визначати об'єкти та їх координати. Для виявлення об'єктів і вимірювання їх відстані використано Kinect, альтернативу комп'ютерного зору. Результати показали, що датчик Kinect може разом із алгоритмами машинного навчання визначити присутність об'єктів у його полі зору та вимірювати відстань до них. Таким чином, обґрунтовано, що Kinect можна встановлювати на безпілотних транспортних засобах, як датчик зору, замість звичайної відеокамери, а також на пілотованих транспортних засобах для сповіщення водіїв, але переважно комп'ютерне бачення вирішальну роль у транспортних засобах без втручання людини. У статті представлена система технічного зору для дрона з використанням Kinect, замість звичайної камери для обробки потокового відео. Система дозволяє дрону виконувати різні завдання, такі як виявлення та відстеження об'єктів, побудова карти навколишнього середовища, планування траєкторії та ухилення від перешкод. Система складається з трьох основних модулів: модуль обробки зображень, модуль локалізації та модуль управління. Модуль обробки зображень відповідає за отримання та аналіз даних з кінетики, модуль локалізації відповідає за визначення положення та орієнтації дрона у просторі, а модуль управління відповідає за генерацію команд для двигунів дрону. Система була протестована в реальних умовах і показала добрі результати у виконанні поставлених завдань.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, дрон, система технічного зору, алгоритми машинного навчання, розпізнавання зображень, глибоке навчання

KOVAL Oleksandr, SARYBOHA Hanna

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

3D OBJECT RECOGNITION SYSTEM FOR UAVS BASED ON KINECT AND ML

Unmanned vehicles (smart cars, drones, robots) must understand and respond to their environment in order to perform their tasks. Therefore, they must have vision to determine objects and their coordinates. Kinect, an alternative to computer vision, was used to detect objects and measure their distance. The results showed that the Kinect sensor can, together with machine learning algorithms, determine the presence of objects in its field of view and measure the distance to them. Thus, it is justified that Kinect can be installed on unmanned vehicles as a vision sensor instead of a conventional video camera, as well as on manned vehicles to notify drivers, but mainly computer vision plays a crucial role in vehicles without human intervention. The article presents a technical vision system for a drone using Kinect, instead of a conventional camera to process streaming video. The system allows the drone to perform various tasks, such as detecting and tracking objects, building a map of the environment, planning a trajectory and avoiding obstacles. The system consists of three main modules: an image processing module, a localization module and a control module. The image processing module is responsible for acquiring and analyzing kinetic data, the localization module is responsible for determining the position and orientation of the drone in space, and the control module is responsible for generating commands for the drone's motors. The system was tested in real conditions and showed good results in performing the assigned tasks.

Key words: UAV, drone, technical vision system, machine learning algorithms, image recognition, deep learning.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) типу квадрокоптер (далі – дрон) мають широкий спектр застосування в різних галузях, таких як військова, цивільна, промислова, наукова та розважальна. Однак, для успішної роботи дронів необхідно забезпечити їм надійну систему технічного зору, яка дозволить їм сприймати та аналізувати довкілля, а також приймати адекватні рішення.

Існує безліч підходів до реалізації системи технічного зору для дронів, що використовують різні типи датчиків, такі як камери, лідари, радары, вимірювальні інерційні пристрої тощо. Однак більшість цих датчиків мають недоліки, такі як висока вартість, велика вага, високе енергоспоживання, обмежений діапазон вимірювань, низька роздільна здатність, чутливість до перешкод, рівня освітлення та інші. У зв'язку з цим пропонується використовувати кінетик – пристрій, здатний захоплювати глибину та колір сцени за допомогою інфрачервоного лазера та RGB-камери. Кінетик має ряд переваг, таких як низька вартість, мала вага, низьке енергоспоживання, висока роздільна здатність, стійкість до перешкод, тощо.

Аналіз досліджень та публікацій

Дослідження в напрямку системи технічного зору (СТЗ) та її інтегрування в контур керування безпілотного літального апарату спрямовані на вирішення декількох найважливіших задач – розпізнавання типу об'єкту та стеження БПЛА за визначеним об'єктом та виконання поставлених завдань щодо дій відносно даного об'єкту [1].

Система технічного зору в даний час є одним з основних засобів розвитку автоматичних систем управління рухом в умовах, коли обсяг апріорної інформації недостатній і для вирішення завдань управління необхідний аналіз зовнішньої обстановки в режимі реального часу. Прогрес у електроніці, оптиці, комп'ютерній техніці та програмуванні дає можливість використовувати оптичні прилади та системи у широкому спектрі приладів споживчого ринку. Проблеми дослідження використання СТЗ у авіації для навігації або наведення присвячено багато робіт [2 – 7], особливо з використанням Kinect [10].

Багато науково-практичних робіт із застосуванням пристрою Kinect, були зосереджені на інформації про глибину, яку надає Kinect, оскільки це є основною перевагою у Kinect порівняно зі звичайними камерами RGB. Завдяки цьому він є об'єктом дослідження в багатьох роботах: для розрахунку точності оцінки глибини об'єкта [11]; покращення якості і видалення шумів з зображення [12]; використання фільтра Калмана та двостороннього фільтра для зменшення та згладжування завад, зниження шуму [13].

Таким чином, розвитку системи технічного зору приділяється велика увага в сучасних дослідженнях як для безпілотних літальних апаратів так і для мобільних автономних роботів з використанням різноманітних пристроїв.

Формулювання цілей статті

Метою цієї статті є розробка та тестування системи технічного зору для дрона, що базується на використанні сучасного програмно-апаратного комплексу, а саме, алгоритмів глибокого машинного навчання та пристрою Kinect у якості камери з розширеними можливостями.

Важливим завданням використання СТЗ в процесі керуванні БПЛА є оптимізація зображення місцевості, оскільки на СТЗ суттєво впливає зміна стану навколишнього середовища (освітленість, яскравість, інтенсивність світлового потоку). Алгоритми ідентифікації об'єктів є чутливими до зазначених параметрів. Це впливає на можливість виникнення шумів на зображенні, якщо обробка зображення буде не оптимальною. Також проблемою є підбір необхідних фільтрів шумів, оскільки похибки фільтрації можуть призвести до втрати важливої інформації на зображенні місцевості, що, в свою чергу, може призвести до нездатності розпізнавання та пошуку на місцевості важливих об'єктів.

Разом із тим, важливою проблемою є забезпечення надійності зберігання даних та достовірності розпізнавання об'єктів. Використання одного методу ідентифікації об'єктів є не завжди надійним. Тому краще комплексувати різні методи, особливо, різні за їх природою розпізнавання.

Виклад основного матеріалу

Система технічного зору, зазвичай представляє собою програмно-апаратну платформу, що складається із камери та мікропроцесору, веб-камери та комп'ютеру з програмним забезпеченням мовою Python або C++, операційною системою Linux та бібліотеки алгоритмів комп'ютерного зору та обробки зображень OpenCV. Але така система добре працює для розпізнавання зображень, номерів авто, рукописів, фото, тобто виконання математичних алгоритмів або їх синергії обробки та аналізу статичних двовимірних зображень для визначення особливих характеристик зображення та використання цих даних для знаходження реальних об'єктів.

Для виконання поставленої мети і завдань та вирішення зазначених завдань пропонується використання таких методів та засобів: алгоритмів машинного навчання для розпізнавання 3D об'єктів та застосування пристрою Kinect для реалізації цих алгоритмів та вирішення визначеної проблематики розпізнавання зображень з подальшою інтеграцією в систему керування БПЛА.

Вибір алгоритму машинного навчання для розпізнавання рухомих об'єктів з дрону залежить від декількох факторів:

1. Точність: вибір алгоритму, який надає високу точність для конкретних умов. Це може вимагати експериментування з різними алгоритмами та налаштуваннями.
2. Швидкість: для реального часу, як у випадку з дронами, важливо, щоб алгоритм міг швидко обробляти дані.
3. Ресурси: деякі алгоритми вимагають більше обчислювальних ресурсів, ніж інші.
4. Складність даних: різні алгоритми можуть краще працювати з різними типами даних. Наприклад, глибокі нейронні мережі часто використовуються для розпізнавання зображень.
5. Навчальні дані: деякі алгоритми вимагають великої кількості навчальних даних, тоді як інші можуть працювати з меншими наборами даних.
6. Адаптація до змін: якщо об'єкти, які потрібно розпізнати, можуть змінюватися з часом, виберіть алгоритм, який може адаптуватися до цих змін.

Враховуючи ці фактори, проведемо дослідження та експерименти, щоб визначити, який алгоритм найкраще підходить для досягнення поставленої мети та виконання поставлених завдань.

Для цього розглянемо характеристики складових запропонованої системи (рис.1).

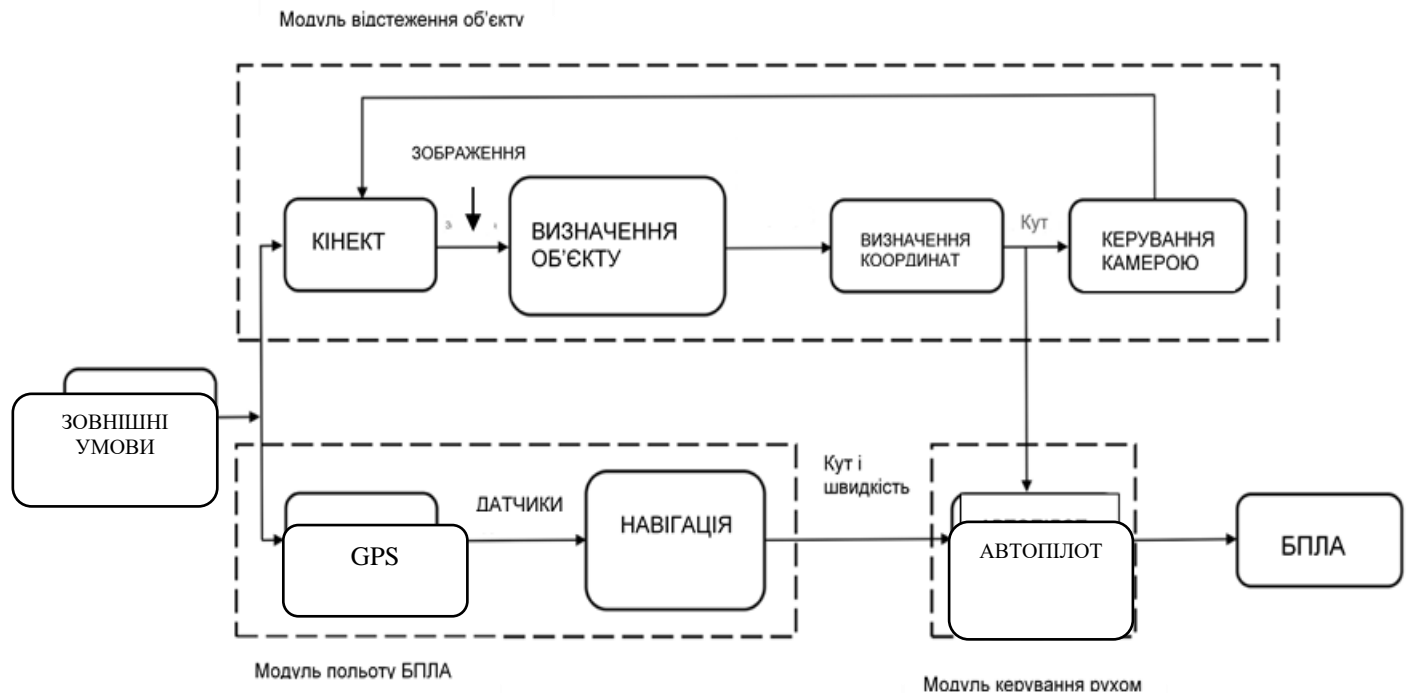


Рис. 1. Архітектура системи технічного зору на базі БПЛА та Kinect

Microsoft Kinect – це пристрій для визначення руху, винайдений Microsoft. Пристрій Kinect в основному використовується для ігор без джойстика за допомогою ігрової консолі Microsoft Xbox. Microsoft Kinect має дві версії, Kinect 360, яка була випущена в 2010 році, Kinect One, який був випущений у 2013 році.

Кожен із двох сенсорів Kinect має однакове апаратне забезпечення (рис. 2), де кожен Kinect складається з:

- 1) інфрачервоного (ІЧ) випромінювача і датчика глибини;
- 2) датчика кольору;
- 3) двигуна нахилу;
- 4) мікрофонного масиву.



Рис. 2. Апаратне забезпечення пристрою Kinect

В сучасних дослідженнях мало приділяється уваги одній з основних функцій та важливої переваги Kinect – визначення та розпізнавання об'єкту незалежно від рівня освітлення або навіть за його відсутності без зниження якості розпізнавання об'єкту (рис. 3). Завдяки вимірюванню глибини об'єкту він може бути виявлений та розпізнаний пристроєм Kinect у нічний час. Також є можливість визначення типу цього об'єкту, що є необхідною умовою для виконання завдань щодо виявлення та знищення ворожих БПЛА з метою відбиття атак у нічний час.

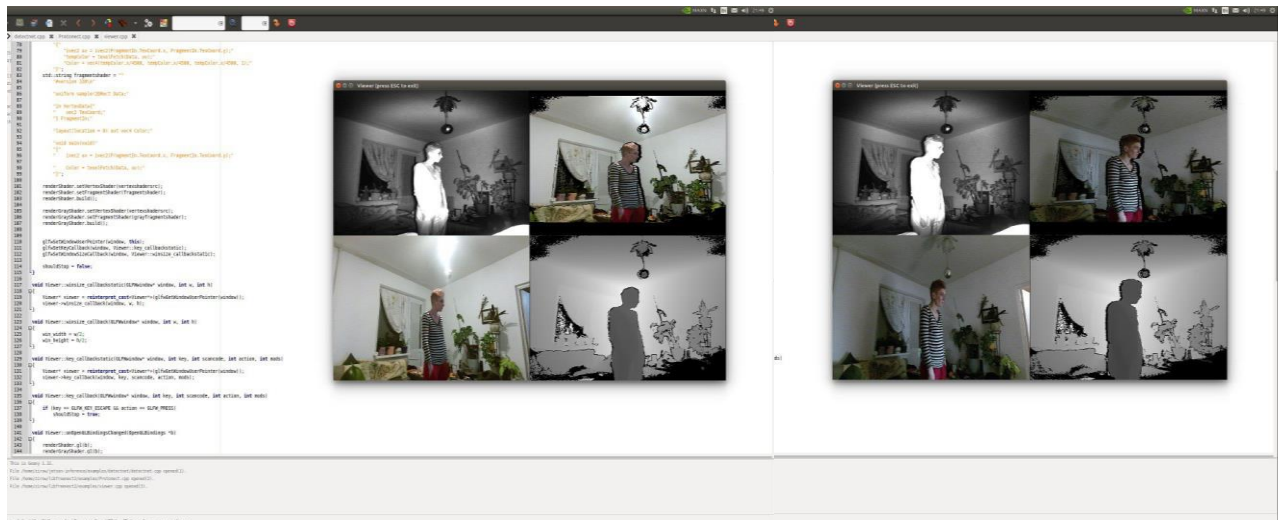


Рис. 3. Виявлення об'єкту за присутності та відсутності освітлення

На основі проведених експериментів можна зробити висновки, що рівень освітленості ніяк не впливає на якість і точність виявлення та визначення 3D об'єктів. Перевагою ще є те, що даний пристрій може замінити навіть коштовний тепловізор і вартісну камеру для певних умов використання згідно вимогам системи.

В даній роботі протестовано алгоритми глибокого машинного навчання CNN (Convolutional Neural Network – згортова нейромережа) для розпізнавання зображень та класифікації об'єктів [14].

Усі тести в цій роботі проводилися на Dell 5510 (Intel Ноутбук i7, 2 ГГц x 4 з відеокартою Nvidia). Фактично було виміряно відстань, яка використовується для розрахунку точності за допомогою ручної вимірювальної стрічки та представлені у математичному вигляді:

$$R = \frac{D_{fact}}{D_{kinect}}, \quad (1)$$

де R – різниця між значеннями D_{fact} та D_{kinect} , mm;

D_{fact} – фактична відстань до об'єкту;

D_{kinect} – розрахункова відстань від пристрою Кінест.

Середнє значення похибки у відсотках обчислюється:

$$\Delta R = \frac{|R|}{D_{fact}} \times 100\%. \quad (2)$$

Точність P обчислюється таким чином:

$$P = \Delta R - 100\%. \quad (3)$$

Запропоновано наступну систему розпізнавання 3D зображень для аналізу можливостей Kinect і перевірки запропонованого алгоритму глибокого навчання (рис. 4). Усі компоненти системи розроблені мовою програмування C++ з використанням платформи Robotics Operating System (ROS) [15]. Ця система дозволяє тестувати алгоритми машинного навчання для оцінки глибини на різних типах об'єктів на зображенні в реальному часі з високою точністю.

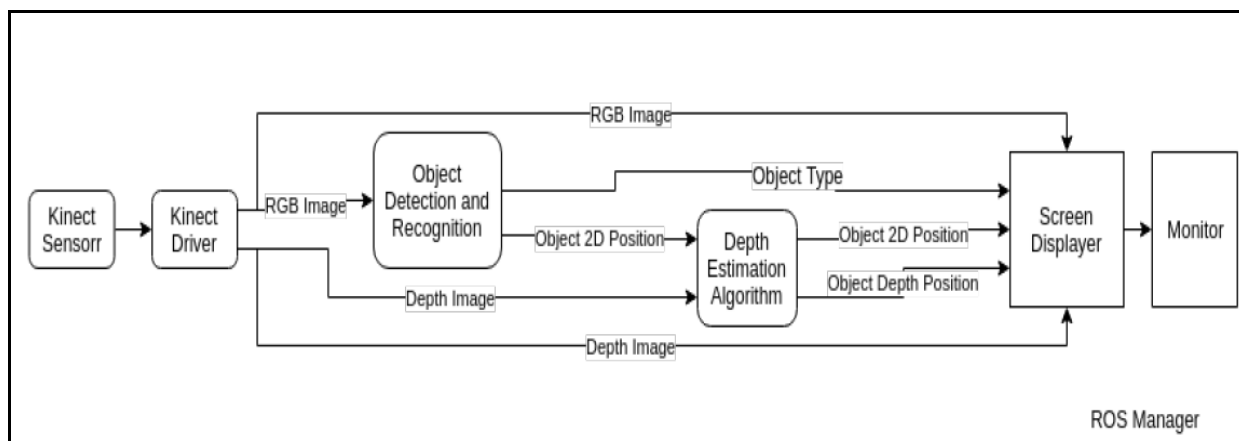


Рис. 4. Система виявлення та розпізнавання 3D об'єктів

Система складається з таких компонентів:

1) ROS Manager: цей компонент відповідає за керування всією системою. Він керує передачею даних між усіма іншими компонентами та синхронізацією обмежувальних рамок між зображеннями RGB і глибиною.

2) Kinect Driver: цей компонент відповідає за зв'язок із датчиком Kinect, отримання зображень RGB і глибини та надсилання їх до наступних складових системи.

3) Object detection and recognition: Виявлення та розпізнавання об'єктів: цей компонент відповідає за виявлення об'єктів із RGB-зображення та розпізнавання їх типу (тобто: людина, собака, кішка, книги, стілець тощо). Цей компонент використовує сучасні CNN, які використовуються для виявлення та розпізнавання об'єктів(рис. 5а, 5б)

4) Depth estimation algorithm: Алгоритм оцінки глибини: цей компонент відповідає за оцінку глибини кожного об'єкта, виявленого за допомогою зображення глибини.

5) Screen Displayer: цей компонент відповідає за відображення остаточного результату на екрані з усіма обмежувальними рамками об'єктів, типом об'єктів і глибиною об'єктів(рис. 6) .

Результати тестових випробувань алгоритму глибокого навчання:

1805	1809	1800	25000
1590	1615	1607	1602
1593	0.1236	1803	1612
1813	1808	1808	1598

Рис. 5 а. Значення дефектних пікселів (червоні пікселі) за глибинним зображенням Kinect

1374	1506	1468	1530
1418	1405	1500	1420
1512	1300	1450	1380
1340	1415	1498	1442

Рис. 5 б. Значення пікселів після застосування алгоритму глибокого машинного навчання

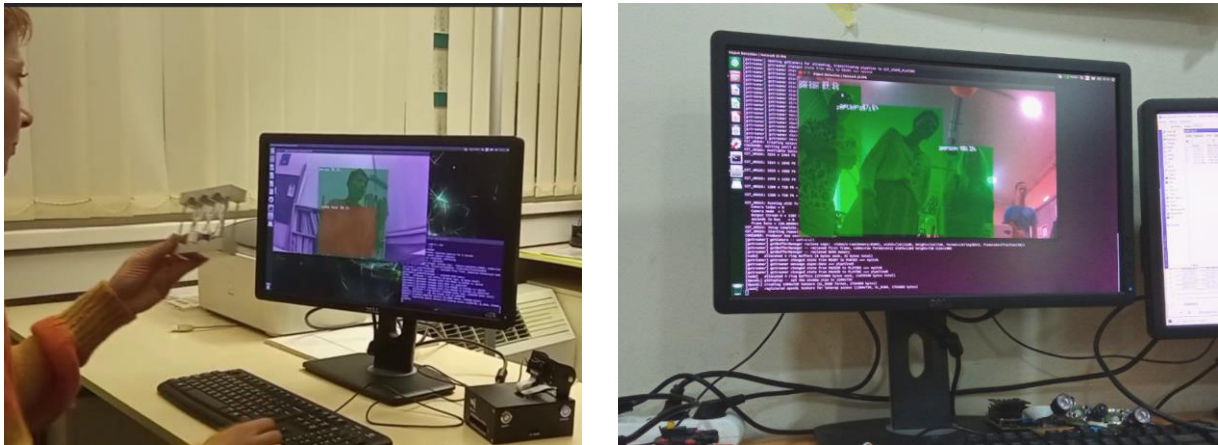


Рис. 6. Класифікація виявлених об'єктів за їх типами

Зазвичай, для проведення напівнатурного експерименту тестування системи керування дроном з використанням системи технічного зору виконується на основі результатів роботи алгоритмів машинного навчання та згідно параметрів системи керування дроном в середовищі математичного моделювання та симуляції Matlab Simulink (рис.7), з використанням спеціалізованого програмного пакету “Моделювання польоту Квадрокоптеру”.

Бібліотека UAV Toolbox від MathWorks надає інструменти та функції для проектування, моделювання, тестування та розгортання безпілотних літальних апаратів (UAV). Разом із тим, надається можливість протестувати розроблені алгоритми для автономного польоту під час виконання завдання БПЛА [16, 17]. Тестові випробування підтвердили працездатність алгоритму розпізнавання об'єктів та виконання завдання безпілотними літальними апаратами.

Щодо симуляції сценарію польоту БПЛА, то це є одним із важливих кроків для тестування розроблених алгоритмів. Тож це може бути як 2D, так і 3D модель. Необхідно визначити початкові дані БПЛА та візуалізувати траєкторію польоту і протестувати різні сценарії польоту БПЛА та розроблені алгоритми для застосування корисного навантаження. В нашому випадку змодельовано політ за допомогою моделей датчиків GPS, INS і LIDAR. Таким чином, цей сценарій можна використовувати для створення тестів, а також для перевірки алгоритмів машинного навчання для уникнення перешкод та розпізнавання об'єктів.

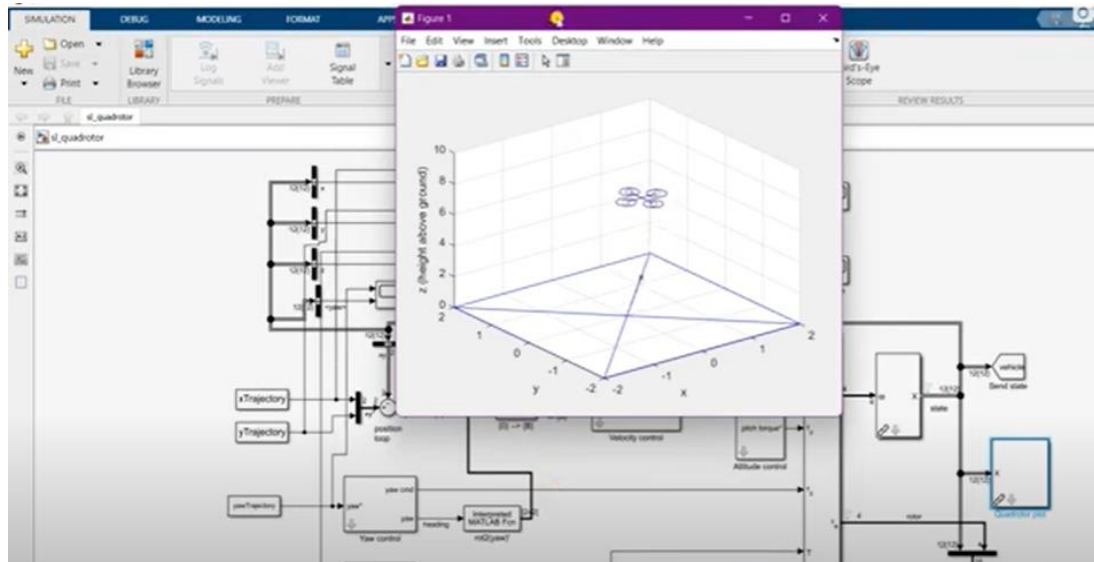


Рис. 7. Моделювання польоту дрону в пакеті Matlab Simulink

Проте, в даній роботі цей підхід оптимізовано шляхом застосування бібліотеки Matplotlib Python безпосередньо в самому програмному коді алгоритму глибокого машинного навчання для розпізнавання 3D об'єктів. Matplotlib хоч і бере свій початок в емуляції графічних команд MATLAB, але не залежить від MATLAB і може використовуватися в об'єктно-орієнтованому способі, щоб забезпечити значну продуктивність аналізу даних навіть для великих масивів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

На основі огляду існуючих систем технічного зору проведено аналіз програмно-апаратних рішень подібних систем, визначено проблемні сторони і запропоновано у якості рішення використання пристрою Kinect, як апаратне рішення та застосування алгоритмів машинного навчання, як програмне рішення. Запропоноване рішення було протестовано й отримані результати, які підтвердили доцільність такого вибору. Таким чином, завдяки проведеним дослідженням можна підтвердити необхідність інтеграції запропонованої системи технічного зору в систему керування безпілотним літальним апаратом, а також доцільність проведення подальших натурних досліджень та тренування нейромережі.

Література

1. Котвицький Р.С., Сарибога Г.В. Система технічного зору в задачах стабілізації безпілотного літального апарату. *Молодий вчений*, 2016. № 5 (32). С. 234 – 239.
2. Умба А., Сарибога Г.В., Збруцький О.В. Синтез алгоритму підвищення надійності розпізнавання орієнтира системою технічного зору. *Інформаційні системи, механіка та керування*, 2018. № 18. С. 11 – 19.
3. Dakhno N., Barabash O., Shevchenko H., Leshchenko O., Dudnik A. Integro-differential Models with a K-symmetric Operator for Controlling Unmanned Aerial Vehicles Using an Improved Gradient Method. 2021 IEEE 6th International Conference “Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD). Proceedings. October 19 – 21, 2021, Kyiv, Ukraine. P. 61 – 65.
4. Barabash O., Dakhno N., Shevchenko H., Sobchuk V. Unmanned Aerial Vehicles Flight Trajectory Optimisation on the Basis of Variational Inequality Algorithm and Projection Method. Proceeding. 2019 IEEE 5th International Conference “Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments” (APUAVD). 22-24 October, National Aviation University, 2019. Kyiv, Ukraine. P. 136 – 139.
5. Koval O., Barabash O., Havrylko Y., Makarchuk A., Musienko A., Salanda I. Comparison of Two Methods of Signal Smoothing in the Development of navigation Systems. 2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). October 24 – 27, 2023, Kyiv, National Aviation University, Ukraine. P. 42 – 46.
6. Barabash O., Kyrianov A. Development of control laws of unmanned aerial vehicles for performing group flight at the straight-line horizontal flight stage. *Advanced Information Systems*, 2023. Volume 7, No. 4. P. 13 – 20.
7. Барабаш О.В., Кир'янов А.Ю. Математична модель групового управління безпілотними літальними апаратами на основі методу простору відносних станів. *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: «Технічні науки». 2023. № 5, Том 2. С. 7 – 13.
8. Bondarev D.I., Kucherov D.P., Shmelova T.F. Models of group flights of unmanned aerial vehicles using graph theory. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 2014. No. 3 (20). P. 68 – 75.
9. Kucherov D., Shmelova T., Poshyvailo O., Tkachenko V., Miroshnichenko I., Ogirko I. Mathematical Model of Damping of UAV Oscillations in the Cargo Delivery Problem. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2023, Kharkiv, Ukraine. P. 1 – 6.
10. Kinect Sensor. <https://en.wikipedia.org/wiki/Kinect>, 2012. [Online; accessed 28-August-2018].
11. R. A. El-laithy, J. Huang, and M. Yeh. Study on the use of microsoft kinect for robotics applications. In *Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, April, 2012. P. 1280 – 1288.
12. H. I. Osman, F. H. Hashim, W. M. Diyana Wan Zaki, and A. B.Huddin. Entryway detection algorithm using kinect's depth camera for uav application. In *2017 IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, August, 2017. P. 77 – 80.
13. J. Smisek, M. Jancosek, and T. Pajdla. 3d with kinect. In *2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, November, 2011. P. 1154 – 1160.
14. <https://medium.com/@ageitgey/machine-learning-is-fun-part-3-deep-learning-and-convolutional-neural-networks-f40359318721>
15. ROS. <https://www.ros.org/>, 2018. [Online; accessed 29-August-2018].
16. J. Boiko, O. Svachii, I. Parkhomey and O. Horskyi, "Software Simulation of a MEMS Accelerometer for Cargo Unmanned Aerial Vehicle," 2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kyiv, Ukraine, 2023, pp. 120-125, doi: 10.1109/MSNMC61017.2023.10329094.
17. O. Polikarovskiyh, J. Boiko, V. Tkachuk, H. Yehoshyna and Y. Daus, "Neural Network Method of Directing Finder Signals Processing in Perimeter Protection Systems," 2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland, 2023, pp. 488-491, doi: 10.1109/ACIT58437.2023.10275525.

References

1. Kotvytskyi R.S., Saryboha H.V. Systema tekhnichnoho zoru v zadachakh stabilizatsii bezpilotnoho litalnoho apparatu. *Molodyi vchenyi*, 2016. № 5 (32). S. 234 – 239.
2. Umba A., Saryboha H.V., Zbrutskyi O.V. Syntez alhorytmu pidvyshchennia nadiinosti rozpoznavannia oriyentira systemoiu tekhnichnoho zoru. *Informatsiini systemy, mekhanika ta keruvannia*, 2018. № 18. S. 11 – 19.

3. Dakhno N., Barabash O., Shevchenko H., Leshchenko O., Dudnik A. Integro-differential Models with a K-symmetric Operator for Controlling Unmanned Aerial Vehicles Using an Improved Gradient Method. 2021 IEEE 6th International Conference "Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD). Proceedings. October 19 – 21, 2021, Kyiv, Ukraine. P. 61 – 65.
4. Barabash O., Dakhno N., Shevchenko H., Sobchuk V. Unmanned Aerial Vehicles Flight Trajectory Optimisation on the Basis of Variational Inequality Algorithm and Projection Method. Proceeding. 2019 IEEE 5th International Conference "Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments" (APUAVD). 22-24 October, National Aviation University, 2019. Kyiv, Ukraine. P. 136 – 139.
5. Koval O., Barabash O., Havrylo Y., Makarchuk A., Musienko A., Salanda I. Comparison of Two Methods of Signal Smoothing in the Development of navigation Systems. 2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). October 24 – 27, 2023, Kyiv, National Aviation University, Ukraine. P. 42 – 46.
6. Barabash O., Kyrianov A. Development of control laws of unmanned aerial vehicles for performing group flight at the straight-line horizontal flight stage. *Advanced Information Systems*, 2023. Volume 7, No. 4. P. 13 – 20.
7. Barabash O.V., Kyrianov A.Iu. Matematychna model hrupovoho upravlinnia bezpilotnymy litalnymy aparatamy na osnovi metodu prostoru vidnosnykh staniv. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: «Tekhnichni nauky»*. 2023. № 5, Tom 2. S. 7 – 13.
8. Bondarev D.I., Kucherov D.P., Shmelova T.F. Models of group flights of unmanned aerial vehicles using graph theory. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 2014. No. 3 (20). P. 68 – 75.
9. Kucherov D., Shmelova T., Poshyvailo O., Tkachenko V., Miroshnichenko I., Ogirko I. Mathematical Model of Damping of UAV Oscillations in the Cargo Delivery Problem. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2023, Kharkiv, Ukraine. P. 1 – 6.
10. Kinect Sensor. <https://en.wikipedia.org/wiki/Kinect>, 2012. [Online; accessed 28-August-2018].
11. R. A. El-Iaithy, J. Huang, and M. Yeh. Study on the use of microsoft kinect for robotics applications. In *Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, April, 2012. P. 1280 – 1288.
12. H. I. Osman, F. H. Hashim, W. M. Diyana Wan Zaki, and A. B. Huddin. Entryway detection algorithm using kinects depth camera for uav application. In *2017 IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, August, 2017. P. 77 – 80.
13. J. Smisek, M. Jancosek, and T. Pajdla. 3d with kinect. In *2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, November, 2011. P. 1154 – 1160.
14. <https://medium.com/@ageitgey/machine-learning-is-fun-part-3-deep-learning-and-convolutional-neural-networks-f40359318721>
15. ROS. <https://www.ros.org/>, 2018. [Online; accessed 29-August-2018].
16. J. Boiko, O. Svachii, I. Parkhomey and O. Horskyi, "Software Simulation of a MEMS Accelerometer for Cargo Unmanned Aerial Vehicle," 2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kyiv, Ukraine, 2023, pp. 120-125, doi: 10.1109/MSNMC61017.2023.10329094.
17. O. Polikarovskyykh, J. Boiko, V. Tkachuk, H. Yehoshyna and Y. Daus, "Neural Network Method of Directing Finder Signals Processing in Perimeter Protection Systems," 2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland, 2023, pp. 488-491, doi: 10.1109/ACIT58437.2023.10275525.