

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА АЕРОКОСМІЧНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

_____ Мельник Ю.В.

“ ___ ” _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСНИКА ОСВІТНЬО-КВАЛІФІКАЦІЙНОГО СТУПЕНЯ
“БАКАЛАВР”

Тема: Система автоматичного керування доставкою вантажу БПЛА

Виконавець: Рудніцька Анна Сергіївна

Керівник: Безкоровайний Юрій Миколайович

Нормоконтролер: Дивнич Микола Полікарпович

Київ 2024

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра аерокосмічних систем управління

Спеціальність 151 «Комп'ютеризовані системи управління та автоматика»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Мельник Ю.В.

«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

_____ Рудніцьку Анну Сергіївну

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Система автоматичного керування доставкою вантажу БПЛА

Затверджена наказом ректора від 01.04.2024 р. № 511/ст

2. Термін виконання роботи: з 13.04.2024 до 16.06.2024

3. Вихідні дані до роботи: об'єкт що транспортується маса 200гр., обмеження дрона – 600 гр., маркери ArUco та UWB, висота $h = 45$ м., дуга кола з радіусом $r = 6$ м., $d=100.03$ м., датчики: GPS, 9DoF IMU та барометр

4. Зміст пояснювальної записки: Аналіз особливостей застосування вантажних дронів, розробка робочої схеми між обладнанням та безпілотником, експериментальна перевірка працездатності технічних рішень.

5. Перелік ілюстративного матеріалу презентації: БПЛА FlyCart 30 від компанії DJI, контрольний шлях БПЛА, модифікований маркер ArUco, Decawave DWM1001 Footnote 5 UWB, експериментальна установка посадки, результати завдання автономної доставки, результати приземлення БПЛА на платформу, оцінка позицій фільтра і GPS

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Затвердження теми кваліфікаційної роботи	29.03.2024	
2.	Вступ, опис актуальності теми	01.04.2024	
3.	Аналіз особливостей застосування вантажних дронів	12.04.2024	
4.	Розробка робочої схеми між обладнанням та безпілотником	28.04.2024	
5.	Експериментальна перевірка працездатності технічних рішень	13.05.2024	
6.	Оформлення роботи	20.05.2024	
7.	Підготовка доповіді та презентації	25.05.2024	
8.	Написання висновків	01.06.2024	

7. Дата видачі завдання: 29.03.2024 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Безкоровайний Ю.М.
(підпис керівника (П.І.Б))

Завдання прийняв до виконання _____ Рудніцька А.С.
(підпис керівника (П.І.Б))

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Система автоматичного керування доставкою вантажу БПЛА»: 59 ст., 31 рисунки, 14 використаних джерел.

Актуальність тем. Зростання ринку вантажних дронів зумовлене підвищенням попиту на більш швидку та ефективну доставку. Вантажні БПЛА дозволяють оминати жваві дороги, порти та інші перешкоди. Це скорочує час транспортування та фінансові витрати.

Об'єкт дослідження – спеціалізовані логістичні навігаційні системи для БПЛА.

Предмет дослідження – БПЛА для доставки вантажу.

Мета дослідження – розробити систему автоматичного керування доставкою вантажу для БПЛА в умовах міської забудови.

Наукова новизна – розроблені системотехнічні рішення можуть бути використані при побудові логістичних маршрутів комерційних компаній для застосування в умовах міської забудови.

Методи дослідження: методи аналізу, аналітичного та комп'ютерного моделювання, методи випробувань і експерименту.

Матеріали дипломної роботи можуть бути використані комерційними компаніями для освоєння логістичного ринку малих вантажів в умовах середньої да високої щільності забудови

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ ПЕРШИЙ.....	8
1.1. Огляд ринку вантажних безпілотників.....	8
1.2. Основні області застосування вантажних дронів.....	10
1.3. Плюси та мінуси використання вантажних дронів	11
1.4. Огляд світового досвіду комерційної доставки вантажів за допомогою безпілотників.....	13
1.5. Використання вантажних БПЛА в Україні.....	25
ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ.....	27
ДРУГИЙ РОЗДІЛ	28
Схемотехнічні і програмні рішення для вантажного дрона	28
2.1. Автономна доставка дроном.....	28
2.2. Обладнання і програмне забезпечення.....	29
2.3. Планування шляху	34
2.3.1. Локалізація	36
2.3.2. Сенсорний синтез	40
ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ.....	44
ТРЕТІЙ РОЗДІЛ	46
Експериментальна перевірка працездатності технічних рішень	46
Результати ефективності методики	46
3.1. Оцінка завдання доставки.....	47
3.2. Оцінка несправностей	51
3.3. Оцінка точності	53
ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ	55
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	58

ВСТУП

Ідея використання безпілотників для комерційної доставки вантажів уже давно витає у повітрі. Незважаючи на існуючі адміністративні бар'єри, ентузіасти та корпорації вкладають мільйони доларів у розвиток цього напрямку, і це дає свої плоди.

Якщо кілька років тому єдиним бонусом від розробки подібних проектів був PR в Інтернеті, де ролики з черговою «першою у світі доставкою безпілотником» набирали мільйони переглядів, то зараз почали з'являтися серйозні проекти з реальними роботами.

У міських умовах вантажні БПЛА не залежать від пробок та світлофорів. Доставляти товари можна практично прямо з точки А в точку В, що особливо привабливо в умовах зростання електронної комерції.

Це ще і економічно вигідно. Середня швидкість електровелосипеда 25-30 км/год. А кур'єра на звичайному велосипеді ще нижча. Середня швидкість комерційного дрону 70-100 км/год. Значить, піца, доставлена дроном, прилетить щонайменше вдвічі-втричі швидше.

Обсяг світового ринку вантажних дронів, за прогнозами, досягне \$16,9 млрд 2032 року за середньорічного приросту 38,1%. Найактивніше зростання використання вантажних дронів спостерігається у Північній Америці. Це найчастіше транспортування медичних зразків у лабораторії, доставка готової їжі, товарів повсякденного попиту тощо.

У Канаді, де багато населених пунктів, до яких важко дістатися, працюють навіть урядові програми. Наприклад, одна з компаній, що спеціалізується на логістиці дронами, отримала від уряду Канади контракт на надання послуг з доставки БПЛА Condor. Цей дрон здатний перевозити вантажі до 180 кг на відстань до 200 км.

Тепер, навіть якщо якийсь FedEx не доїде до віддаленого канадського Маунтінвілля, тому що зтягувати трикамерний холодильник високо в гору нерентабельно, з цією місією швидко і просто впорається БПЛА Condor.

Мексика – країна з багатьма важкодоступними місцями, особливо у сільських та гірських регіонах. Вантажні дрони можуть швидше доставляти товари та матеріали у віддалені місця, розширюючи доступ до життєво важливих ресурсів. Ці фактори стимулюють попит на вантажні БПЛА.

РОЗДІЛ ПЕРШИЙ

Аналіз особливостей застосування вантажних дронів

1.1. Огляд ринку вантажних безпілотників

Вантажні дрони призначені для перевезення товарів та різних корисних вантажів (рис.1.1). Їх використовують для транспортування їжі, води, одягу та навіть великої побутової техніки там, куди не можна дістатися автомобілем чи іншим транспортом. Наприклад, у населені пункти, які розташовані високо в горах.

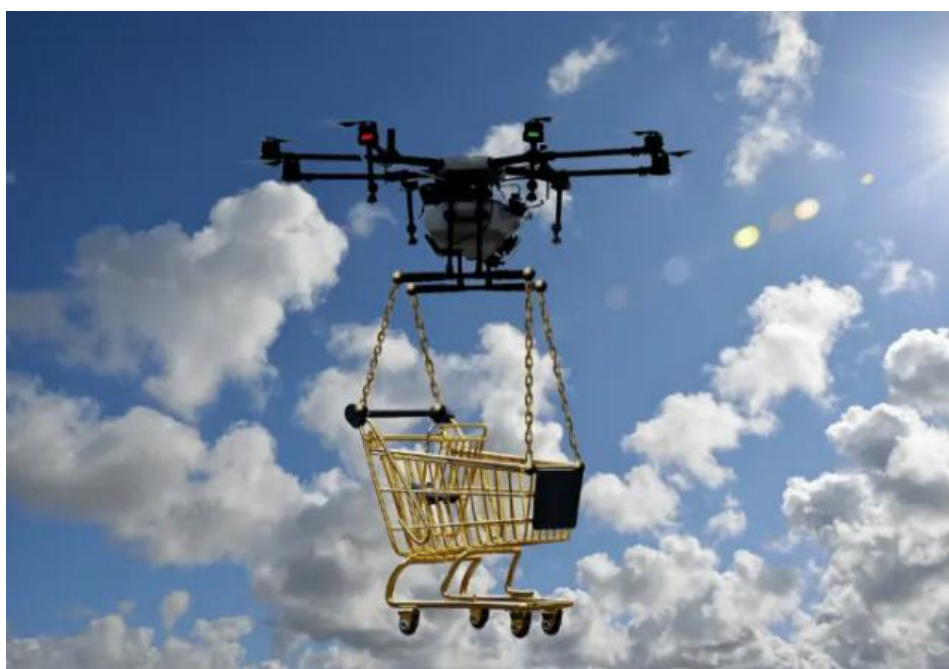


Рис. 1.1 – Вантажний БПЛА, доставка вантажів повітрям

Кафедра АКСУ				ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА			
Виконав	Рудніцька А.С			Аналіз особливостей застосування вантажних дронів			Аркушів
Керівник	Безкоровайний Ю.П						
Н-контр.	Дивнич М.П						
Зав.каф	Мельник Ю.В				№151-СУ-313 Б/стн		

Зростання ринку вантажних дронів зумовлене підвищенням попиту на більш швидку та ефективну доставку. Вантажні БПЛА дозволяють оминати жваві дороги, порти та інші перешкоди. Це скорочує час транспортування та фінансові витрати.

Використання дронів також дуже зручне для зворотного логістичного процесу. З розвитком e-commerce повернення та обмін товарів – важливий аспект. Компанії та клієнти хочуть швидкого повернення, щоб гарантувати оперативне відшкодування, обмін та обробку нових замовлень. При цьому зростанню ринку вантажних дронів можуть перешкоджати кілька факторів [1]:

- Висока первісна вартість. Це серйозна проблема для малого та середнього бізнесу з обмеженими бюджетами. Крім покупки дронів, необхідно вкладатися у засоби зарядки, запасні частини, персонал для експлуатації та обслуговування безпілотників.

- Відповідність нормативним вимогам. Дотримання правил, встановлених державою, вимагає від підприємств інвестицій у персонал, навчання та спецобладнання. Дрони повинні відповідати стандартам безпеки, що ще більше збільшує експлуатаційні витрати.

На ринку логістики значне зростання доходів припало на період пандемії COVID-19. Дрони виявилися відмінним способом обмеження фізичного контакту при доставці засобів для санітарної обробки приміщень.

Вантажні БПЛА використовувалися для перекидання ліків та інших предметів медичної групи до зон, що постраждали від будь-яких лих та епідемій. Також за допомогою дронів транспортували тестові зразки до лабораторії для подальшої діагностики.

З початку пандемії безпілотники почали відігравати важливу роль у різних областях, і ця тенденція продовжує швидко набирати обертів.

Сьогодні доставка в поштамат у під'їзді стала вже звичним явищем, швидше за все, ніхто не здивується, якщо завтра на якомусь маркетплейсі з'явиться пропозиція придбати товар з доставкою дроном-кур'єром зі знижкою 15%.

Вже зовсім скоро дрони будуть розвозити документи, відправляти та забирати посилки і навіть товари з супермаркету.

1.2. Основні області застосування вантажних дронів

Сучасні вантажні БПЛА оснащені потужними датчиками та програмним забезпеченням нового покоління. Технічно вони відрізняються розмірами, максимальним корисним навантаженням та дальністю дії. За цими параметрами дрони умовно можна розділити на чотири категорії [2]:

- Внутрішньофірмові складські поставки. Використовують для оптимізації внутрішніх процесів: сортування товарів за складами, центрами розподілу та доставки. Приклад використання – складські приміщення Amazon.
- Доставка останньої милі. Використовуються на короткі та середні відстані для доставки товарів та промислової продукції між компаніями та корпоративними партнерами, наприклад, у B2B-сегменті.
- Навантаження/розвантаження вантажівок та суден. Товари переміщуються дронами з терміналів на склади, пункти видачі і можуть бути доставлені найближчим споживачам.
- Міжміська доставка по місту. Ця категорія перебуває у стадії розвитку, якщо говорити про глобальні відстані. Проте вже зараз є компанії, які організують доставку у межах великих мегаполісів та між сусідніми містами.

Світовий ринок вантажних дронів сегментований за ключовими характеристиками:

1. Тип БПЛА
 - нерухоме крило;
 - роторне крило;
 - гібрид.
2. Дальність дії
 - мала - до 10 км;
 - середня - 10-50 км;
 - велика - від 50 км.
3. Корисне навантаження
 - до 10 кг;
 - від 10 до 50 кг;
 - від 50 кг.
4. Кінцеві споживачі
 - комерційні,
 - некомерційні,
 - муніципальні.
5. Географія споживачів
 - Північна Америка (США та Канада),
 - Європа та Росія,
 - Азіатсько-Тихоокеанський регіон,
 - Африка, Латинська Америка та Близький схід.

1.3. Плюси та мінуси використання вантажних дронів

Використання вантажних БПЛА відкриває нові можливості для транспортних компаній та інших бізнесів, пов'язаних із переміщенням товарів та продукції.

Плюси використання вантажних дронів:

- швидкість доставки – БПЛА не залежать від пробок на дорогах, аварій і не потребують додаткової допомоги навантажувачів;
- зниження експлуатаційних витрат – не потрібне використання палива;
- доступ до віддалених районів – безпілотники швидко доставлять вантажі повітрям у гори, на острови та інші важкодоступні області;
- екологічна чистота - дрони не викидають в атмосферу шкідливі речовини у великих обсягах, а також сприяють зниженню шумового забруднення.

Як і у будь-якої порівняно нової технології, у вантажних БПЛА поки ще багато недоліків.

Мінуси використання вантажних дронів:

- залежність від погодних умов створює проблеми із доставкою;
- дрони – дороге обладнання, тому послуги доставки також не коштуватимуть дешево;
- необхідний жорсткий контроль за технічним станом, інакше техніка може врізатись у будинки, банально падати на голови людям або ушкоджувати майно під час падіння;
- у більшості безпілотників обмежений час польоту через невеликий ресурс встановлених акумуляторів – це створює додаткові складності та робить доставку на великі відстані ще дорожчою;

- при великій кількості вантажних БПЛА в повітряному просторі, щоб уникнути аварійних ситуацій, потрібно координувати їх маршрути з курсами, прокладеними для літаків і гелікоптерів.

Звісно, кожен виробник БПЛА активно працює над удосконаленнями. Тому більшість із цих мінусів стане повністю або частково не актуальною в найближчій перспективі.

1.4. Огляд світового досвіду комерційної доставки вантажів за допомогою безпілотників

Google. Project Wings

У 2012 р. корпорація Alphabet (материнська компанія Google), а точніше її підрозділ «X», що займається інноваційними розробками, почала опрацьовувати питання доставки вантажів дронами, а через два роки у серпні 2014 року був анонсований проект Wings (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – БПЛА проекту Wings

Wings – це дослідницький проект, спрямований на розробку автоматизованого БПЛА та інфраструктури для його використання. На

відміну від Amazon, яка розробляє безпілотники для себе, Google прагнула створити сервіс з доставки, який буде затребуваний іншими компаніями [6].

У проекті було продемонстровано кілька типів безпілотників, причому побудованих за різними аеродинамічними схемами.

Перший тип БПЛА – побудований за схемою літаючого крила з вертикальним зльотом та посадкою (тейлсітер). При знаходженні на землі апарат знаходився у вертикальному положенні. Після зльоту апарат приймав горизонтальне положення та летів як звичайний літак.

Вивантаження відбувалося шляхом опускання вантажу на тросі, причому апарат зависав у повітрі. Як тільки вантаж виявлявся на землі, від нього відчіплявся трос і втягувався до БПЛА (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Доставка вантажу БПЛА проекту Wings

Через кілька місяців тестування цей дизайн був визнаний невдалим, і його замінили на новий, де використовувалися окремі двигуни, що працювали у горизонтальній та вертикальній площинах.



Рисунок 1.4 – Новий дизайн БПЛА Wings

Після першої публічної демонстрації у 2014 р. проект шукав собі реального застосування. Спочатку йшли переговори про доставку вантажів медичного спрямування, а потім про доставку їжі та напоїв, але жоден проект так і не вийшов у продуктивну фазу.

У листопаді 2016 р. надійшла інформація, що Project Wings переведено на стадію заморожки, а частині його співробітників запропоновано підшукати собі нову роботу.

Основною причиною невдач проекту на думку Bloomberg є адміністративні обмеження на комерційне перевезення вантажів безпілотниками [6].

DHL. Використання дронів для доставки посилок

DHL – одна з найбільших логістичних компаній світу – виявляє стійкий інтерес до використання БПЛА для доставки вантажів.

Перші льотні випробування компанія провела у 2013 році у місті Бонн, Німеччина. У ході експерименту БПЛА, який у компанії називають «Parcelcopter», протягом тижня перевозив посилки через річку Рейн, і

виглядало це так: на одному березі розташовувалося місце старту, де до дрону прикріплювався вантаж, і був оператор, управляючий польотом (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Оператор, управляючий польотом БПЛА
«Parcelcopter»

На іншому березі, поряд зі штаб-квартирою DHL, була точка скидання вантажу (рис. 1.6). Дрон злітав на одному березі, перелітав річку, скидав вантаж і повертався назад. Відстань між точками становила близько 1 кілометра.



Рисунок 1.6 – Місце скидання вантажу

Наступні льотні випробування проводилися через рік після перших восени 2014 р. Протягом 3 місяців дрони перевозили медикаменти та предмети першої необхідності з м. Нордайх, Німеччина, на острів Йюст, Німеччина. Маршрут польотів пролягав над Північним морем і мав довжину 12 км.

Для проведення польотів DHL отримала офіційний дозвіл від авіаційної влади, а сама зона польотів була закрита для цивільної авіації [2].

Загальна схема експерименту виглядала так: медики з острова Йюст робили замовлення на ліки. Після цього ліки доставлялися до точки запуску БПЛА на північному узбережжі м. Нордайх. Дрон із вантажем злітав і в автоматичному режимі летів на острів, де робив посадку. Ліки вивантажувалися з дрону та співробітник DHL доставляв їх замовнику.

З січня до березня 2016 р. DHL провела черговий етап випробувань дронів. Зона здійснення польотів були обрані Баварські Альпи, Німеччина. Доставка проводилася між комуною Райт-ім-Вінкль, розташованої в долині, та гірським поселенням, розташованим на плато Вінкльмозальм. Відстань між ними становила 8,3 км, а перепад висот був 500 метрів.

У ході випробувань у комуні та у гірському селищі встановили гібриди автоматизованої поштової станції та аеропорту для дронів – DHL Packstation with SkyPort (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Автоматизована поштова станція та аеропорт для дронів – DHL Packstation with SkyPort

Коли мешканець гірського селища замовляв в Інтернет-магазині якийсь товар, той спочатку доставлявся до Skyport, розташований у комуні, а потім дроном перевозився до Skyport, розташованого на гірському плато, звідки його вже забирав покупець. За час експерименту було доставлено близько 130 посилок.

Zipline. Доставка медикаментів та зразків крові.

У 2016 році каліфорнійська компанія Zipline за домовленістю з урядом Африканської держави Руанда розпочала доставку донорської крові та медикаментів за допомогою БПЛА.

Процес влаштований наступним чином: лікар клініки, яка потребує термінового постачання крові, відправляє заявку по SMS до спеціального логістичного центру. Після отримання заявки працівники центру

завантажують запаси в безпілотник і запускають його. У проекті використовують БПЛА літакового типу, а зліт здійснюється за допомогою катапульти (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Зліт БПЛА

Діставшись місця призначення, безпілотник скидає посилку з вантажем на парашуті і летить назад в логістичний центр. Співробітник клініки, що замовила постачання, підбирає посилку із землі.



Рисунок 1.9 – Доставка медикаментів та зразків крові

Після повернення дрон приземляється на спеціальний аерофінішер (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Посадка БПЛА

Один логістичний центр здатний обслуговувати клініки у радіусі 70 км. Використання катапульти та аерофінішера звільняє проект від необхідності облаштування злітно-посадкової смуги та використання коліс на БПЛА для посадки.

Domino Pizza. Проекти з доставки піци

Проекти міжнародної мережі піцерій Domino's Pizza у червні 2013 року компанія представила концептуальну модель з доставки піци за допомогою БПЛА DomiCopter (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Доставка піци за допомогою БПЛА DomiCopter
Мережа доставки Amazon Prime Air.

Компанія Amazon, найбільший Інтернет-ртейлер, в грудні 2013 року анонсувала свій найшвидший спосіб доставки покупок – Amazon Prime Air. За допомогою даного сервісу покупки, зроблені в Інтернет-магазині Amazon, пропонувалися доставлятися клієнтам протягом 30 хвилин, що в 4 рази швидше, ніж найшвидший спосіб доставки Amazon Prime Now.

Prime Air інтегрує доставку дронами в існуючу мережу доставки Amazon, розгортаючи сайти доставки в той же день.

Клієнти Amazon в Італії, Великій Британії та ще одному місті США невдовзі матимуть можливість доставляти свої пакунки за допомогою дрона, починаючи з кінця 2024 року. Система доставки дронами Prime Air розширюється на міжнародні локації та додає третє місто в Сполучені Штати до кінця наступного року – назви конкретних міст у США та за кордоном будуть названі найближчими місяцями. Нові локації доповнюють існуючі операції з доставки безпілотниками в США, де вже майже рік використовуються безпілотники для безпечної доставки пакунків вагою до п'яти фунтів за годину, а інколи і менше.

Окрім нових місць доставки, Prime Air представлятиме новий дизайн дрона MK30, який тихіший, менший і легший, ніж попередні моделі. Також оголошено [12], що доставку безпілотниками буде інтегровано в мережу доставки Amazon, тобто безпілотники будуть доставляти пакунки з деяких сайтів доставки в той же день. В Італії та Великобританії почнеться інтеграція в деякі з центрів виконання замовлення Amazon, що забезпечить клієнтам швидшу доставку ще більшого вибору товарів.

Вже розпочалися поставки безпілотників Amazon Prime Air до Італії, Великобританії та третього штату США. Щоб розробити цю програму відбувається співпраця з національними та міжнародними регуляторами, а також із спільнотами в ЄС, Італії, Великобританії та США, а також удосконалюється технологія, особливу увагу приділяється створенню правильної інфраструктури, щоб гарантувати максимальну зручність послуг для клієнтів.



Рисунок 1.12 – БПЛА Amazon Prime Air

Очікується, що до кінця 2024 року в усіх трьох нових місцях буде запущено доставку безпілотниками. Коли вона стане доступною, клієнти

Amazon, які відповідають вимогам, зможуть увімкнути доставку дроном і вибрати з тисяч товарів вагою п'ять фунтів або менше, включаючи товари для дому, предмети першої необхідності, предмети краси та офісне/технічне приладдя.

Новий дрон MK30 буде швидшим, тихішим і легшим [12]. Найновіший дрон, MK30, не схожий ні на один інший. Нова конструкція може літати вдвічі далі, ніж попередні моделі дронів Prime Air, що дозволить доставляти покупки клієнтам, які живуть далі від мереж доставки. MK30 тихіший і зможе літати за різноманітних погодних умов, а це означає, що клієнти можуть отримати надзвичайно швидку доставку навіть за таких ситуацій, як невеликий дощ, високі та низькі температури. Дрони мають унікальну систему доставки пакетів, коли пакунки зберігаються всередині дронів під час транспортування, щоб захистити їх вміст.



Рисунок 1.13 – БПЛА Amazon Prime Air

Як і попередні моделі, МК30 працюватиме безпечно та автономно, а також оснащено технологією Sensual, яка дозволяє дрону ідентифікувати та уникати перешкод у зоні доставки. Принадність цієї системи полягає в тому, що вона може відчувати й уникати об'єктів, яких не було напередодні, наприклад, щойно посаженого дерева або мобільного крана, який перемістився на його шляху.

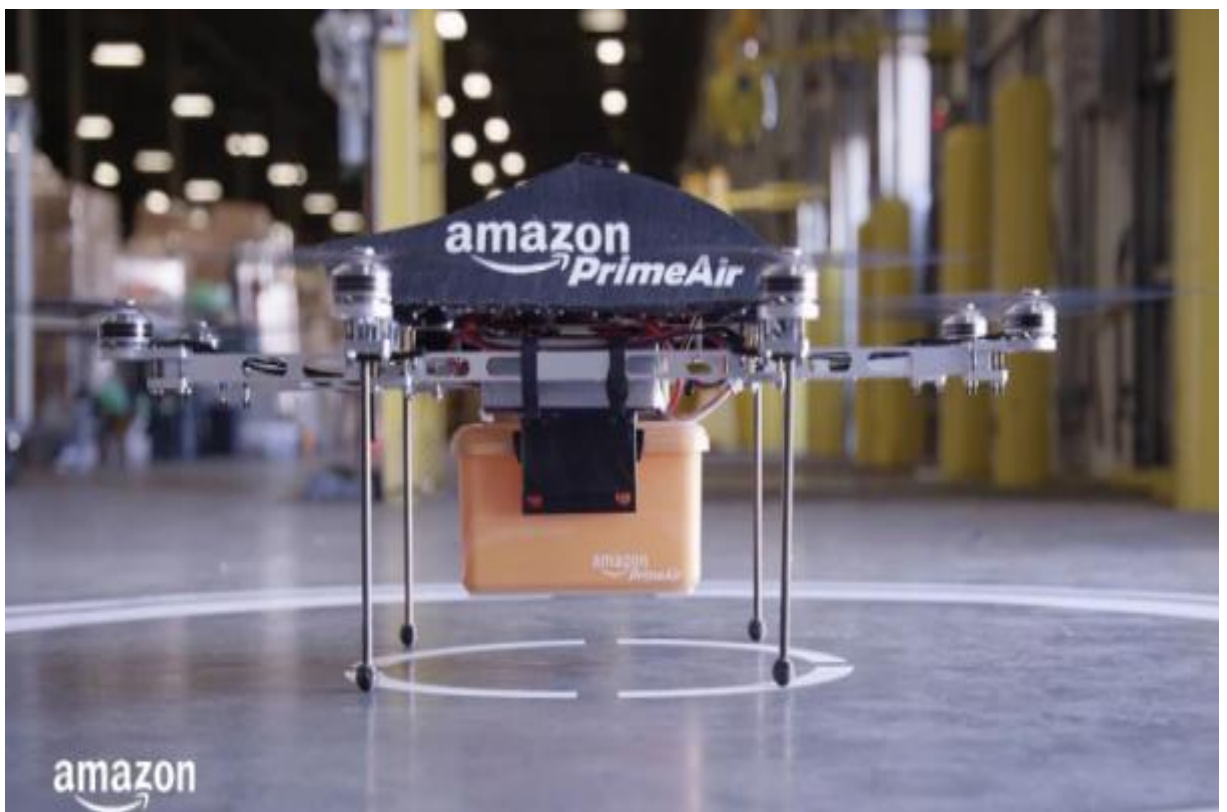


Рисунок 1.14 – Amazon Prime Air

Доставка безпілотниками більше не здійснюватиметься лише з автономних центрів доставки Prime Air, як-от у Локфорді, Каліфорнія, та Коледж-Стейшн, Техас. У майбутньому відбудеться інтегрування дронів в мережу доставки Amazon, тож клієнти матимуть традиційні фургони для доставки, транспортні засоби доставки Flex і дрони Prime Air, які відправлятимуться з однієї будівлі.

Інтеграція спрямована на те, щоб допомогти Amazon оптимізувати роздрібну торгівлю, створити безпечнішу та стійкішу модель доставки та швидше доставляти продукти.

1.5. Використання вантажних БПЛА в Україні

Збройні сили України використовують на фронті наддешеві одноразові вантажні дрони Precision Payload Delivery System (PPDS) [4]. Ці БПЛА вироблені австралійською компанією SYRAC для забезпечення логістичних завдань у важкодоступних місцях.

Щомісяця доставляється близько 100 одиниць австралійських картонних дронів (рис. 1.15). Вони допомагають нашим бійцям у доставці боєприпасів, їжі та медикаментів безпосередньо на передову, також можуть здійснювати розвідувальні польоти й скидання вибухових пристроїв.



Рисунок 1.15 – Австралійський картонний БПЛА

Незабаром в Україні з'явиться можливість спробувати новий безпілотник великого радіусу дії FlyCart 30 від компанії DJI [13], який здатний переносити великі вантажі й призначений для професійного використання (рис. 1.16).



Рисунок 1.16 – БПЛА FlyCart 30 від компанії DJI

Дрон використовує багатороторну 4-осьову конструкцію та 8-лопатову систему пропелерів. Він розвиває швидкість до 20 м/с на висоті до 3 км за вітру до 12 м/с [13].

При роботі від двох батарей FlyCart 30 може піднімати вантаж до 30 кг. Проте передбачено й екстрений режим, в якому дрон працює від однієї батареї і завдяки зменшенню ваги здатний перевозити до 40 кг.

Максимальна дальність польоту залежить, зокрема, від кількості акумуляторів та навантаження. DJI вказує, що з двома батареями та вантажем у 30 кг апарат здатний пролетіти 16 км. Максимальний час польоту у такому випадку становитиме 18 хвилин.

ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ

З'ясовано що є стійке зростання ринку вантажних дронів зумовлене підвищенням попиту на більш швидку та ефективну доставку що скорочує час транспортування та фінансові витрати. Використання дронів також дуже зручне для зворотного логістичного процесу.

Встановлено переваги і недоліки застосування вантажних комерційних дронів.

Проаналізовано використання вантажних повітряних платформ різної компоновки провідних компаній для здійснення комерційних логістичних операцій.

ДРУГИЙ РОЗДІЛ

Схемотехнічні і програмні рішення для вантажного дрона

2.1. Автономна доставка дроном

Доставка безпілотниками є сферою, де необхідно враховувати численні проблеми, які необхідно подолати для успішного виконання місії у міських умовах, таких як планування траєкторії, локалізація, наведення та контроль, уникнення перешкод і безпечне приземлення, особливо при глобальній локалізації.

Традиційні протоколи та методи посадки дронів покладаються на дороге обладнання, таке як DGPS або RTK GPS, не задовольняють точність і надійність, необхідні для посадки дронів у міських районах [3]. Методи візуальної локалізації можуть допомогти точно визначити місце посадки навіть у частково захаращених сценаріях, використовуючи обладнання, яке вже розгорнуто на платформі, наприклад, камери RGB. Планарні маркери, такі як ArUco, можуть генерувати надійну оцінку пози від висоти і є здійсненним рішенням для посадки безпілотників. Багато рішень для посадки з використанням плоских маркерів змінюють поведінку польоту, щоб використовувати лише локалізацію ArUco, коли вони знаходяться в діапазоні, замість комбінування інформації з різних джерел. Незважаючи на низьку вартість і низьке енергоспоживання візуальної локалізації за допомогою плоских маркерів, вони більш схильні до втручання навколишнього середовища, такого як умови слабого освітлення, сніг, пил, дощ і туман. Тому візуальні планарні маркери вимагають постійного обслуговування, щоб підтримувати їх повну функціональність.

Інший візуальний підхід для надійної посадки в умовах поганого зору використовує активні інфрачервоні (ІЧ) маяки, розташовані на посадковій платформі, і спеціальну ІЧ-камеру для виявлення їх здалеку. Ці методи можуть працювати без зовнішнього освітлення, але можуть бути неточними під прямими сонячними променями чи іншими джерелами ІЧ-випромінювання.

Описано проблему автономної доставки за допомогою дронів і визначено апаратне та програмне забезпечення, що використовується для розробки.

Вирішена проблема полягає в транспортуванні невеликих посилок між двома визначними точками за допомогою дрона в автономному режимі без отримання команд від людини-пілота. Припускаючи, що посадкові станції визначені в безпечних місцях, а маршрут планується на висоті над будівлями та деревами, розглянуто середовище без перешкод та відстані, сумісні з витривалістю дрона (максимальний час польоту). Крім того, оскільки безпілотникам-доставникам важливо перевозити крихкі об'єкти без різких рухів, застосовано механізм транспортування, що здійснює захоплення, тим самим зменшує ризики вібрації або несподіваного падіння вантажу [5].

Житлові райони будуть основним місцем посадки для завдань доставки; отже, дрон повинен мати здатність приземлитися з точністю в обмежених і вузьких зонах, щоб запобігти несподіваним нещасним випадкам або травмам. Випробування проводилися з урахуванням посадкової платформи 1x1м.

2.2. Обладнання і програмне забезпечення

DJI Matrice 100Footnote1 (рис. 2.1), дозволяє розробникам реалізувати свої коди для керування дроном. Використовуються всі

датчики, які поставляються з дроном за замовчуванням, включаючи GPS, 9DoF IMU та барометр [9]. Вони відповідають за допомогу в оцінці положення дрона в глобальних координатах (широті та довготі), орієнтації та висоті. Бортова панель дрона відповідає за передачу інформації від датчиків на інший пристрій, окрім прийому команд управління та надсилання їх до безщіткових двигунів. На додаток до плати контролера польоту, яка вже є на дроні, Jetson NanoFootnote2 відповідає за обробку даних, планування траєкторії та контроль високого рівня квадрантора.



Рисунок 2.1 – Компоненти використовуваного БПЛА

Розроблено 3D модель коробки, яка використовується для доставки, з розмірами 110x105x90 мм (рис. 2.2). Її з'єднувальний механізм використовує серводвигун (рис. 2.3). Arduino Nano підключено до плати Jetson для керування цим серводвигуном, розміщуючи його в положенні з'єднання або роз'єднання коробки на дроні. Схема на рис. 2.4 ілюструє

з'єднання між обладнанням і безпілотником, які використовувалися під час експериментів. Безпілотник має загальну масу приблизно 3 кг з усіма підключеними пристроями та порожньою коробкою. Тому маса вантажу повинна бути обмежена до 600 гр. відповідно до технічних характеристик DJI Matrice 100 для зльоту.

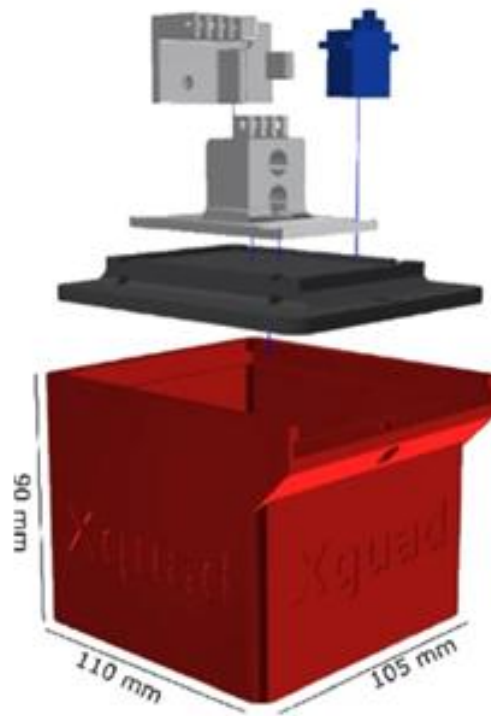


Рисунок 2.2 – Механізм зчеплення за допомогою серводвигуна з пакетом, що використовується для доставки вантажу



Рисунок 2.3 – Механізм сервозчеплення

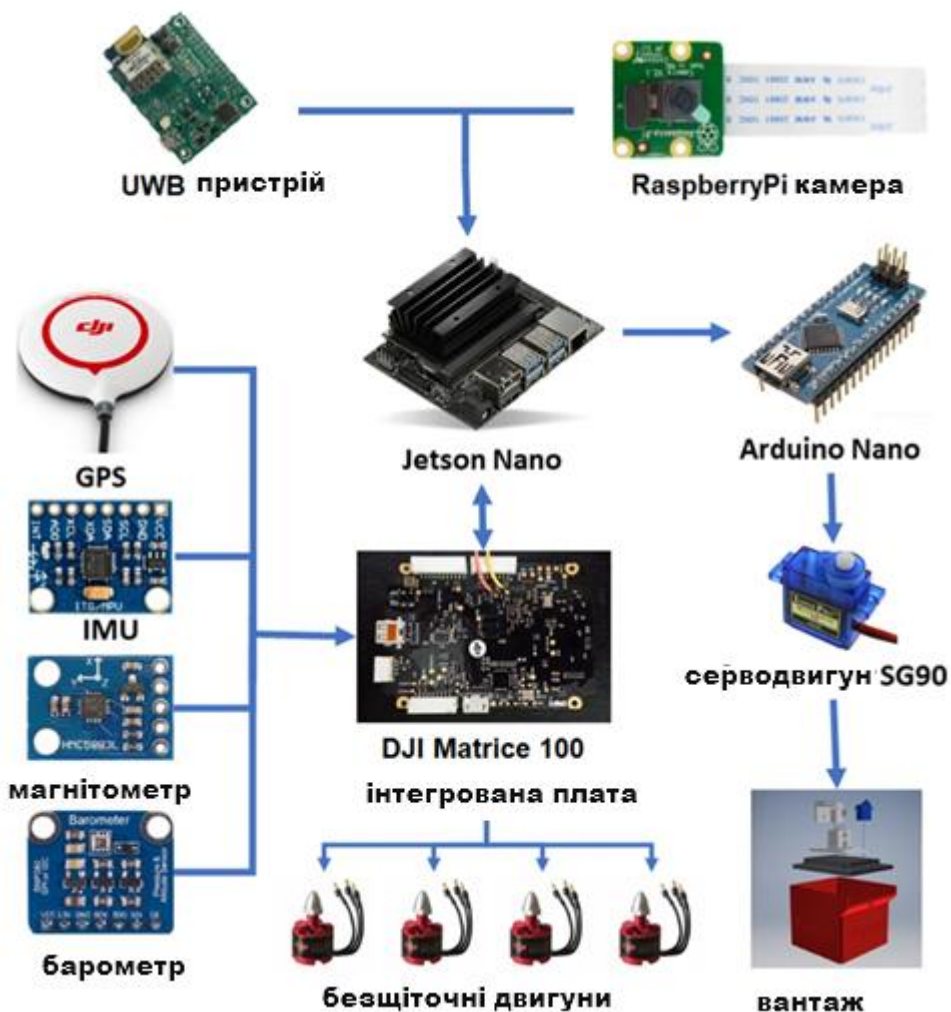


Рисунок 2.4 – З'єднання між вбудованим обладнанням дрона

Враховуючи, що місце посадки, яке використовувалося в експериментах, має розміри 1x1 м і точність визначення місцезнаходження дрона за допомогою GPS по горизонталі становить приблизно 2 м, необхідно використовувати додаткові датчики, щоб допомогти дрону здійснити більш безпечну та точну посадку. Для цього перевірено застосування наступних датчиків в експериментах із використанням справжнього дрона: камеру RaspberryPi Camera v2.0, спрямовану вниз, разом із комбінацією маркерів ArUco на посадковій платформі та закріплені надширокосмугові (UWB) пристрої на місці приземлення, а

також пристрій такого ж типу, закріплений на дроні. В обох випадках можна отримати додаткову інформацію про положення дрона щодо платформи під час посадки та покращити локалізацію, об'єднавши всі ці дані.

Використовувана операційна система Ubuntu 18.04 разом із ROS 1 (операційна система робота). Пакет ROS, наданий DJI під назвою Onboard-SDK-ROS^{Footnote3}, встановлює зв'язок між дроном і Jetson Nano. Пакет дозволяє надсилати команди до вбудованої системи керування та надає дані від датчиків, наявних на дроні, таких як GPS, 9DoF IMU та барометр, на додаток до оцінки положення та орієнтації дрона в режимі онлайн. Для ідентифікації та оцінки пози ArUco використовуються спеціальні алгоритми з OpenCV^{Footnote4}. У випадку пристроїв UWB алгоритм використовує різницю між часом прибуття (TDoA) сигналу для кожного пристрою, щоб обчислити положення дрона щодо місця посадки [8].

Щоб вирішити такі проблеми як скорочення часу доставки, уникнення різких рухів і безпечне приземлення, запропоновано рішення, розділене на три завдання:

- планування шляху,
- локалізація,
- контроль .

Рис. 2.5 ілюструє потік інформації під час роботи системи.

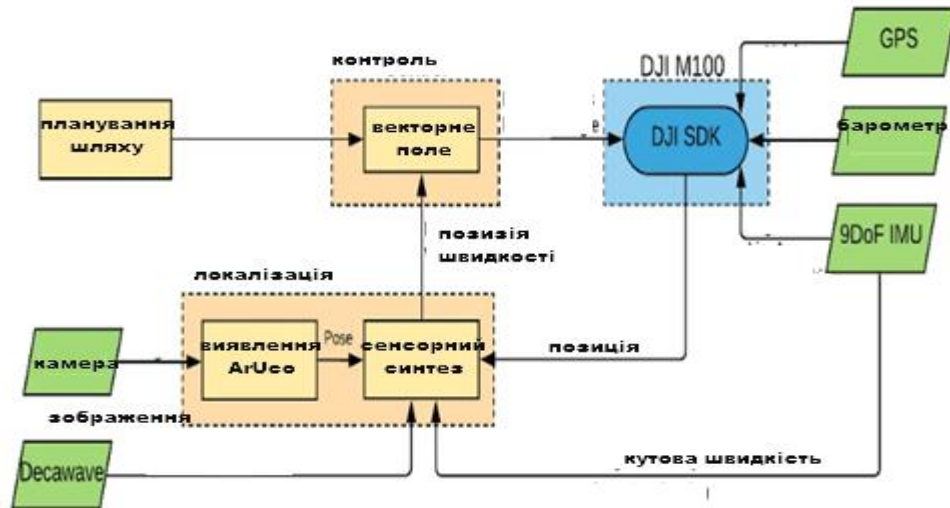


Рис. 2.5 – Огляд системи з потоком інформації між модулями.

2.3. Планування шляху

Запропонована стратегія планування шляху спрощує автономну доставку дроном. По-перше, метод враховує дані про висоту, широту та довготу, щоб визначити географічне розташування дрона. Для цілей тестування пройдені відстані є короткими, тому можна розглядати модель плоскої Землі. Таким чином, перетворено кути широти та довготи на вимірювання відстані. Потім відображається положення дрона відносно системи відліку Землі F_E

Відправною точкою дрона є $p_s \in R^3$ і точка доставки вантажу є $p_f \in R^3$. Без втрати загальності можна вважати інерціальну систему координат F_I що дотримується двох умов:

1. Кінцевою точкою шляху є початок, тобто $p_f = 0$
2. X – вісь системи координат F_I знаходиться в горизонтальній площині, вказуючи в напрямку кінцевої точки, тобто $\hat{x} \parallel \Pi_{xy}(p_f - p_s)$, де $\Pi_{xy}(\cdot)$ представляє проекцію в xy польоті.

Інерціальна система відліку F_I можна отримати за допомогою двох операцій: переклад відносно F_E , щоб задовольнити умову 1; і обертання в z вісь для задоволення умови 2.

Запропонований метод планування шляху обчислює плавний контрольний шлях, що з'єднує дві точки p_s і p_f . Стратегія складається зі створення 5 ділянок шляху:

- вертикальна висхідна лінія;
- дуга кола;
- горизонтальна лінія до платформи;
- дуга кола;
- вертикальна низхідна лінія.

Для плавного переходу між секціями простір поділено на 5 секторів $S_i, i = 1, 2, 3, 4, 5$. Кожна ділянка шляху пов'язана з одним сектором. Визначення секторів представлено нижче:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \{(x, y, z) \in R^3: z \leq h - r, x \leq -d/2\} \\
 S_2 &= \{(x, y, z) \in R^3: z > h - r, x < -d + r\} \\
 S_3 &= \{(x, y, z) \in R^3: z > h - r, -d + r \leq x \leq -r\} \\
 S_4 &= \{(x, y, z) \in R^3: z > h - r, x > -r\} \\
 S_5 &= \{(x, y, z) \in R^3: z \leq h - r, x > -d/2\}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

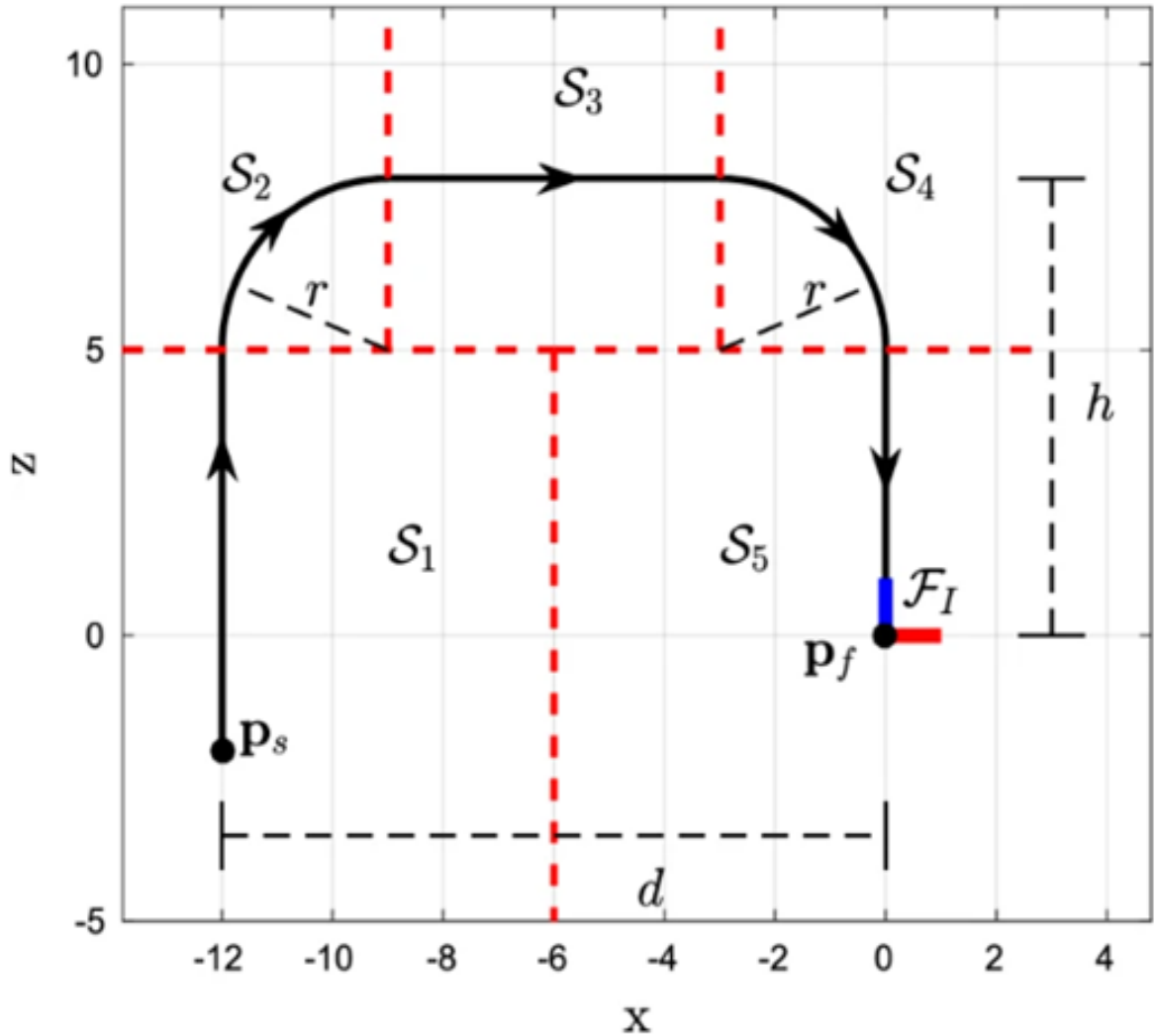


Рис. 2.6 – Контрольний шлях БПЛА

2.3.1. Локалізація

Пакет Onboard-SDK-ROS забезпечує геоприв'язану оцінку глобальної орієнтації та положення дрона (DJI-SDK Pose). Ця інформація надходить із сенсорного злиття доступних GPS, 9DoF IMU та барометра, що забезпечує точність приблизно 2 м.

Така оцінка є достатньою для круїзного рейсу, тому використовувалася протягом усього польоту. Однак цього може бути недостатньо при посадці на платформу розміром 1x1 м, як запропоновано в моїй роботі, розміри якої менші за точність оцінки позиції. Крім того, якщо

положення посадкової площадки зміниться або географічна прив'язка буде недостатньо точною, безпілотник може не зуміти приземлитися в потрібному місці, використовуючи лише локалізацію GPS [7,10].

З цих причин виникає необхідність отримання додаткової інформації, яка дозволить покращити розрахункове положення дрона щодо місця посадки.

Представлено стратегію об'єднання датчиків для покращення локалізації шляхом об'єднання оцінки пози DJI-SDK з інформацією з:

- методу виявлення маркерів ArUco,
- мультилатерації з використанням ультраширококутних (UWB) пристроїв зв'язку.

ArUco. Для використання техніки виявлення маркерів для локалізації маркери ArUco були надруковані та розміщені на верхній частині посадкової платформи. Прикріплена до дрона камера, спрямована вниз, забезпечує зображення маркера під час посадки. Маркери ArUco мають функції, які полегшують їх ідентифікацію на зображенні, такі як чіткі рамки та високий колірний контраст. Крім того, маркери не представляють неоднозначності у своїй орієнтації.

Спеціальні алгоритми OpenCV ідентифікують ArUco, а також оцінюють відносну позицію маркера відносно камери. Цей крок виконується шляхом розв'язання проблеми PnP (Perspective-n-Point), яка пропонує оцінити тривимірну позицію відкаліброваної камери з урахуванням набору 3D-точок і їхніх відповідних 2D-проекцій на площину камери.

Можна знайти позицію, яка мінімізує похибки проекції точок на площину камери, знаючи фактичний розмір маркера та внутрішні параметри калібрування камери [9]. Ці точки мають відрізнятися одна від одної, і в цьому випадку кути ArUco та його орієнтація дозволяють

відрізнити кожен із чотирьох кутів перед надсиланням до алгоритму розв'язувача PnP.

Великі маркери ArUco можна виявити з великої висоти. Однак, коли дрон наближається до платформи, цей ArUco швидко втрачається камерою [14]. З іншого боку, менший ArUco має перевагу в тому, що його можна виявити, коли дрон знаходиться близько до платформи (якщо немає великої горизонтальної похибки), навіть якщо його важко виявити на великій висоті. Щоб покращити дальність виявлення маркера на великих і малих висотах, розглянуто модифікований маркер ArUco, який має менший маркер (0,09x0,09м) всередині більшого (0,8x0,8м). На рис.2.7 показано модифікований ArUco. Включення меншого маркера може зашкодити виявленню більшого, але це не обов'язково.



Рис. 2.7 – Модифікований маркер ArUco. Менший маркер ставиться у більший.

Надширокосмугові (UWB) пристрої. Хоча виявлення маркера ArUco забезпечує хорошу оцінку пози, метод не є надійним для виявлення в умовах слабкого освітлення або в умовах оклюзії зору. З цієї причини розглянуто можливість використання іншої локалізації на основі

надширокосмугових пристроїв, яка працює в цих умовах і підвищує надійність стратегії посадки.

Пристрої на основі ультраширокосмугової безпроводової технології зазвичай використовуються для зв'язку або локалізації з низьким енергоспоживанням Інтернету речей. Ця технологія використовує радіохвилі із смугою пропускання більше ніж 500 МГц, що зменшує втрати через перешкоди та відображення навколишнього середовища, відповідно підвищуючи безпеку передачі.

За даними деяких виробників [3] системи локалізації на основі UWB можна використовувати всередині та на вулиці з точністю до 20 см. У цьому методі алгоритми мультилатерації оцінюють позицію $x_T y_T z_T$, і мобільного пристрою (званого тегом) відносно фіксованого посилання, де розташовані інші пристрої (звані якорями).

В роботі використано пристрої Decawave DWM1001 Footnote 5 UWB для більш точної оцінки положення дрона під час наближення до посадкової платформи рис. 2.8. Щоб алгоритм працював, потрібно щонайменше п'ять пристроїв, один тег, вбудований у дрон, і чотири прив'язки у відомих позиціях; одне з цих пристроїв встановлюється як базовий анкер.

Положення розраховується на основі відстані мітки відносно прив'язок, яка виходить із різниці в часі надходження (TDoA) переданого сигналу, помноженої на швидкість поширення сигналу (швидкість світла).



Рисунок 2.8 – Decawave DWM1001 Footnote 5 UWB

Для використання пристроїв Decawave максимальна відстань 10 m повинні зберігатися між якорями та тегом. Ця методологія не оцінює орієнтацію, тоді як оцінка ArUco робить.

2.3.2. Сенсорний синтез

Одним із способів покращити локалізацію та точніше оцінити положення, орієнтацію та стани швидкості дрона є використання інформації з кількох датчиків. Методи сенсорного злиття використовують дані з різних пристроїв для отримання більш точної інформації про стани, що цікавлять. Наприклад, програмне забезпечення на DJI Matrice 100 використовує дані GPS, 9DoF IMU та барометра, щоб визначити позицію та швидкість дрона (поза DJI-SDK).

Одним із методів синтезу є розширений фільтр Калмана (EKF) [11]. У цьому сенсі оцінка PnP розташування маркера ArUco та локалізація UWB об'єднуються з даними пози DJI-SDK, щоб забезпечити точнішу

посадку. Оскільки датчики надають дані, що стосуються збігаючих станів, зсув розглядається в положенні, оціненому GPS. Метод розширеного синтезу та фільтрації Калмана можна розділити на два етапи: прогнозування та корекція. Для простоти рівняння подано з позначеннями вказуючи, що $b \leftarrow a$ оновлюється значенням a .

Крок передбачення в дискретній ЕКФ включає вектор стану \bar{x} та коваріаційну матрицю P :

$$\bar{x} \leftarrow f(\bar{x}, u, \Delta t), \quad 2.2$$

$$P \leftarrow FPF^T + GQ_uG^T + Q_f \quad 2.3$$

де f представляє модель поширення стану, яка включає поточну оцінку \bar{x} , вхідний вектор u і часовий крок Δt . Матриця $F \equiv F(\bar{x}, u, \Delta t)$ є частковою похідною від f відносно \bar{x} , а матриця G є частковою похідною від f відносно u . Матриця Q_u це коваріаційна матриця, пов'язана з вхідним вектором u , і Q_f це коваріаційна матриця, пов'язана з моделлю.

Крок корекції визначається таким чином:

$$\bar{x} \leftarrow \bar{x} + K(w - h(\bar{x})), \quad 2.4$$

$$P \leftarrow (I - KH)P, \quad 2.5$$

Де w є вектор вимірювання і $h(\bar{x})$ це модель вимірювання, яка представляє очікуване значення w , враховуючи поточний розрахунковий стан \bar{x} . Матриця H є якобіаном

$h(\bar{x})$, а I — одинична матриця. І, нарешті, K являє собою коефіцієнт підсилення Калмана, отриманий за формулою:

$$K = PH^T(HPH^T + R)^{-1} \quad 2.6$$

де R - коваріація вимірювання даних w .

Стратегія визначає вхідний вектор як $u = [u_v^T u_\omega^T]^T = [v_x v_y v_z \omega_x \omega_y \omega_z]^T$, де $v_x, v_y, i v_z$ – лінійні швидкості дрона відносно світової системи і $\omega_x, \omega_y, i \omega_z$ – кутові швидкості в системі тіла. У кроках корекції вимірювання w може приймати три різні значення:

- положення та кути Ейлера з пози DJI-SDK;
- положення та кути Ейлера від ArUco-PnP;
- положення від UWB системи.

Загалом дані, зібрані DJI-SDK позиції (GPS), порівняно з ArUco та UWB, мають невідому ненульову середню похибку. Таким чином, пряме використання цих вимірювань на етапі корекції викликає коливання в оцінці. Незважаючи на наявність зміщення, дані з DJI-SDK є єдиними доступними протягом усього експерименту, і їх не можна відкинути. Щоб належним чином об'єднати дані з цих двох датчиків, розглянуто додаткові стани, що представляють зміщення, пов'язане з вимірюваннями позиції DJI-SDK (GPS) щодо розташування посадкової платформи (ArUco або Decawave). Запропонований фільтр включає наступні 12 станів:

$$\bar{x} \left[\underbrace{\bar{x}\bar{y}\bar{z}} \underbrace{\bar{\varphi} \bar{\theta}\bar{\psi}} \underbrace{\bar{b}_x \bar{b}_y \bar{b}_z} \underbrace{\bar{b}_{\omega x} \bar{b}_{\omega y} \bar{b}_{\omega z}} \right]^T \quad 2.7$$

Де $\bar{p} \equiv [\bar{x}\bar{y}\bar{z}]^T$ це положення дрона, $\bar{r} \equiv [\bar{\varphi} \bar{\theta}\bar{\psi}]^T$ орієнтація дрона в кутах Ейлера, $\bar{b}_p \equiv [\bar{b}_x \bar{b}_y \bar{b}_z]^T$ є зміщенням GPS, і $\bar{b}_\omega \equiv [\bar{b}_{\omega x} \bar{b}_{\omega y} \bar{b}_{\omega z}]^T$ це зміщення гіроскопа дрона. Точніше, \bar{b}_p це зміщення GPS відносно (попередньо визначеного) розташування посадкової платформи. Фільтр не має станів зміщення, пов'язаних з орієнтацією ArUco. З цієї причини географічну орієнтацію маркера необхідно знати з відносною точністю.

Модель розповсюдження $f(\bar{x}, u, \Delta t)$:

$$f(\bar{x}, u, \Delta t) = \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{r} \\ \bar{b}_p \\ \bar{b}_\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_v \\ J_\tau(u_\omega - \bar{b}_\omega) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta t \quad 2.8$$

Де J_τ це матриця Якобі, яка перетворює кутові швидкості u_ω у похідних кутів Ейлера \bar{r} . Модель передбачення передбачає постійні стани зміщення.

Фільтр враховує три моделі вимірювання. Перший представляє очікуване вимірювання позиції та даних орієнтації, наданих DJI SDK. На цьому етапі корекції є бінарна змінна, яка визначає, чи збираються локальні дані посадкової платформи чи ні. Ця змінна визначає включення зміщення в модель вимірювання GPS і дорівнює 1, якщо локальні дані вже спостерігалися, і 0, якщо ні. Отже:

$$h_{SDK}(\bar{x}) = \begin{bmatrix} \bar{p} + \xi \bar{b}_p \\ \bar{r} \end{bmatrix} \quad 2.9$$

Нехай $H_c^d \in SE(3)$ буде постійною однорідною матрицею, яка представляє позицію камери відносно дрона та $H_a^w \in SE(3)$ буде постійною однорідною матрицею, яка представляє позицію ArUco у світі. Матриця $\bar{H}_a^w \equiv \bar{H}_d^w(\bar{p}, \bar{r})$ представляє позицію дрона у світовій рамці. Тоді очікувану позицію ArUco щодо камери (дані, надані алгоритмом PnP) можна записати так:

$$\bar{H}_a^c = (H_c^d)^{-1}(\bar{H}_d^w)^{-1} - H_a^w \quad 2.10$$

Матриці H_c^d і H_a^w відомі апріорі, тоді як матриця \bar{H}_d^w отримано зі станів фільтра \bar{p} і \bar{r} . Оскільки фільтр працює з кутами Ейлера, модель вимірювання інформації ArUco визначається так:

$$h_{ArUco}(\bar{x}) = \begin{bmatrix} get_pos(\bar{H}_a^c) \\ get_euler(\bar{H}_a^c) \end{bmatrix} \quad 2.11$$

де $get_pos()$ і $get_euler()$ є функціями, які повертають позицію та кути Ейлера, пов'язані з заданою однорідною матрицею перетворення.

В роботі надано фільтру оригінальну позицію ArUco (прямо з PnP, без трансформації) відносно камери. Інша стратегія розглядала б послідовність однорідних перетворень, щоб отримати позицію дрона

відносно світу та подати фільтр цими перетвореними даними. В даному випадку модель $h_{ArUco}(\bar{x})$ відповідала би функції тотожності. Обґрунтування вибору стратегії ґрунтується на рівнях шуму вимірювання ArUco. Положення та кут повороту маркера щодо камери оцінюються з хорошою точністю, тоді як крен і кут мають значно вищу невизначеність. В цьому підході можна забезпечити ці рівні точності в діагональній коваріаційній матриці R . Використовуючи послідовність однорідних перетворень, високий шум у крені та тангажі відображається на обчисленій позиції дрона, і, отже, погіршить відповідь фільтра. Розгляд вихідного вимірювання пози дозволяє фільтру належним чином обробляти сигнали відповідно до їх правильних коваріацій.

Оскільки система UWB забезпечує лише вимірювання положення, її модель вимірювання задається:

$$h_{UWB}(\bar{x}) = p \quad 2.12$$

Таким чином, оцінка пози дрона покращується, підвищуючи безпеку та точність під час приземлення.

ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ

Встановлено що традиційні протоколи та методи посадки дронів покладаються на дороге обладнання, таке як DGPS або RTK GPS, не задовольняють вимогам точності і надійності, необхідними для посадки дронів у міських районах.

Розроблено 3D модель коробки, яка використовується для доставки. Розроблена робоча схема з'єднання між обладнанням і безпілотником. Цілком прийнятною для використання є операційна система Ubuntu 18.04 разом із ROS 1.

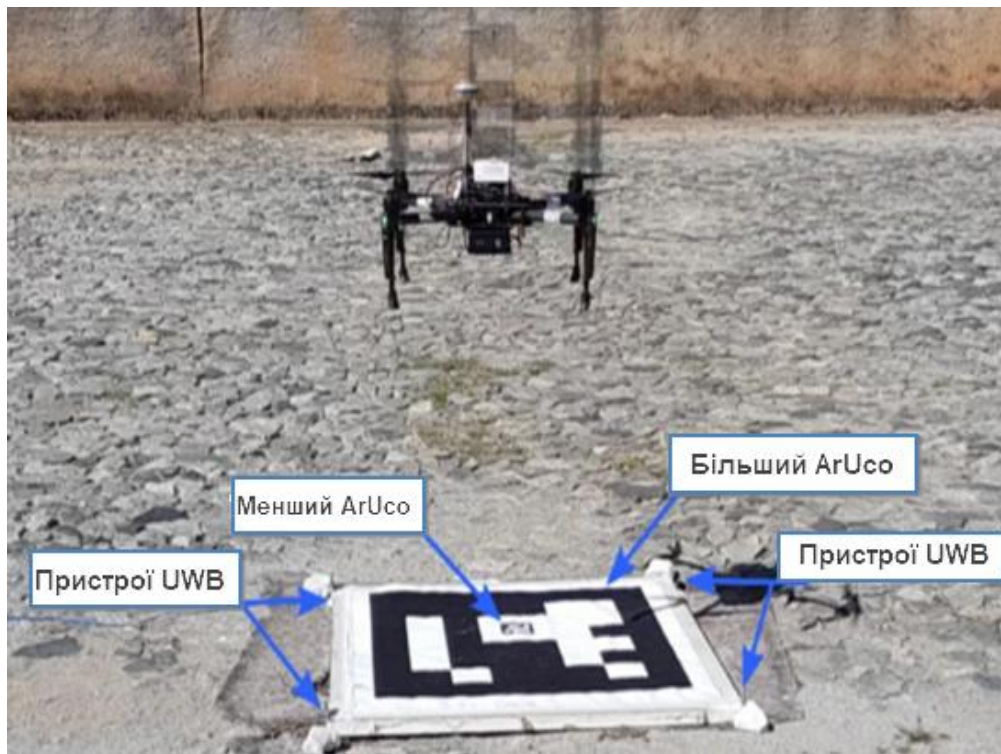
Доцільним є використання пакету Onboard-SDK-ROS для забезпечення геоприв'язаної оцінки глобальної орієнтації та положення дрона (DJI-SDK Pose) що разом з додатковими сенсорами і обладнанням забезпечує точність локалізації положення приблизно 2 м.

ТРЕТІЙ РОЗДІЛ

Експериментальна перевірка працездатності технічних рішень

Результати ефективності методики

Представлено результати експериментів, що розглядають задачу доставки посилок за допомогою дрона в автономному режимі. Проведені експерименти спрямовані на оцінку повністю автономного методу доставки, а також стратегії локалізації на етапі посадки. Центр платформи розглянуто як орієнтир посадки $[x, y] = [0, 0]$, а відстань до точки приземлення дрона вимірювалася вручну за допомогою вимірювальної стрічки, спираючись на центр дрона. Розглянута експериментальна установка зображена на рис. 3.1.



Рисю 3.1 – Експериментальна установка посадки

3.1. Оцінка завдання доставки

Запропонована стратегія була підтверджена в завданні доставки, коли дрон автономно слідував запланованим шляхом від початкової точки до кінцевої точки на посадковій платформі. Об'єкт, що транспортується, має масу 200 гр., обмеження дрона - 600 гр.

На рис. 3.2 показано порівняння між маршрутом, пройденим безпілотником, і запланованим, використовуючи запропонований алгоритм EKF з даними DJI-SDK, включаючи маркери ArUco та UWB при посадці. Експеримент враховує висоту $h = 45$ м і дуги кола з радіусом $r = 6$ м. Параметр d обчислюється як відстань дрона в початковому положенні та очікуване положення платформи, а в експерименті $d=100.03$ м. На рис. 3.3 зображено функцію Ляпунова керування векторним полем, яка вказує відстань між дроном і запланованим шляхом згідно з оцінкою EKF. Ця відстань збільшується після 150 с. через виправлення, які починаються після виявлення платформи. Ці зміни показують системі, що вона не на тому шляху, який очікувався раніше. Послідовно ця відстань знову зменшується з діями контролера. Як показано на рис. 3.2, ці корекції відбулися в секторі S_5 на висоті приблизно 30 м. Хоча камера виявила маркер з 45 м висоти, враховуючи високу невизначеність на великих висотах, фільтр розглядає лише вимірювання з висотою нижче 30 м.

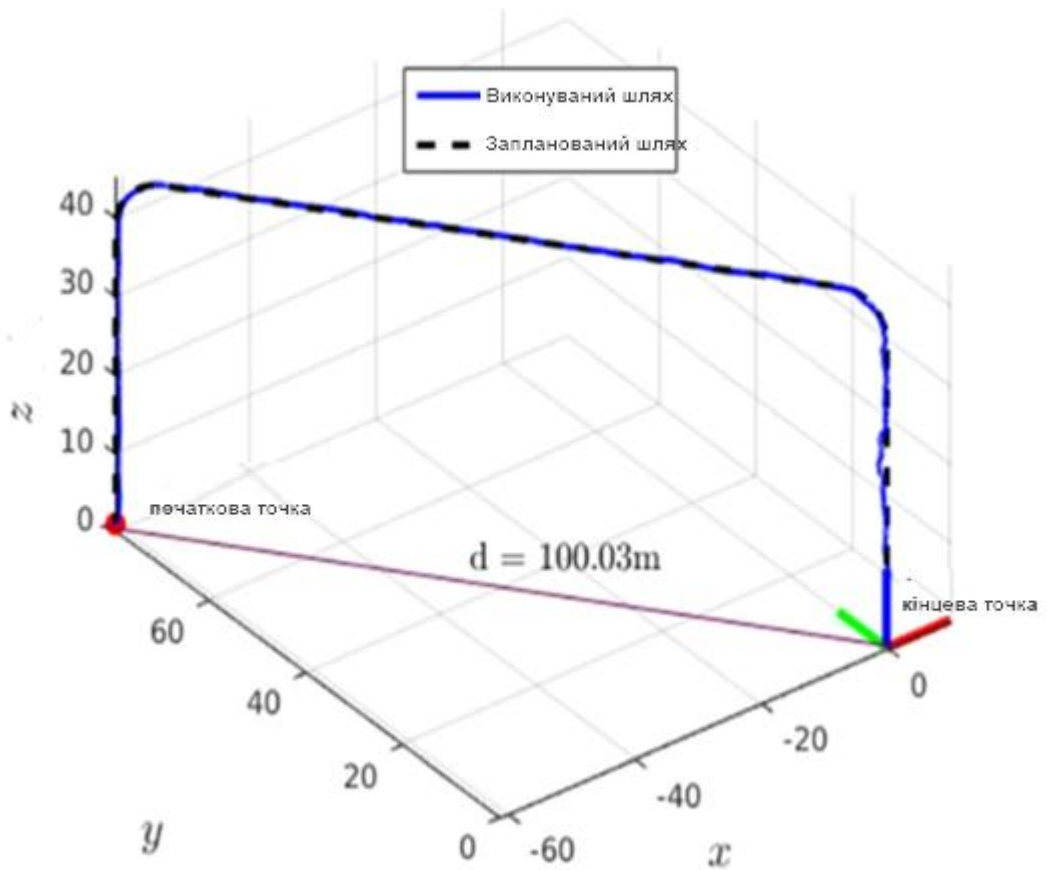


Рис. 3.2 – Результати завдання автономної доставки. Виконуваний шлях позначено суцільною зеленою лінією, а запланований - чорним пунктиром.

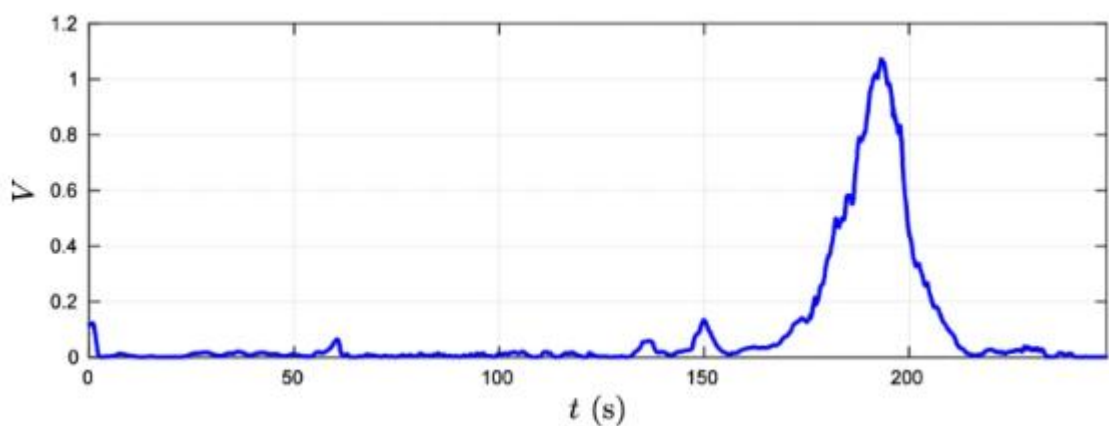


Рис. 3.3 – Функція Ляпунова стратегії векторного поля, вказує відстань від дрона до кривої.

На рис. 3.4 показано результати оцінки положення дрона в іншому експерименті. Він показує дані, отримані від кожного датчика окремо та від запропонованого алгоритму синтезу ЕКФ під час фази посадки. Це був локальний експеримент с $r=2$ м і $h=30$ м зосереджено на етапі посадки. Щоб побудувати положення ArUco, розглянуто пряме обчислення положення дрона відносно кадру F_I (рис. 2.5). Ці перетворені дані не надійшли до фільтра й існує значний шум, пов'язаний з оцінками ArUco та UWB. Ці шуми прямо пропорційні відстані між дроном і платформою (рис. 3.5). Інформація датчиків UWB починає обчислюватися лише 10 м відстані від посадкової бази. Система змогла змусити дрон приземлитися майже в центрі платформи, положення $[-0.072 - 0.103]^T$ м в оцінці фільтра і $[-0.03 - 0.11]^T$ м. Таким чином, похибка відстані від оцінки фільтра до посадкової бази становить 0.043 м, а базова відстань до центру платформи становить 0.114 м.

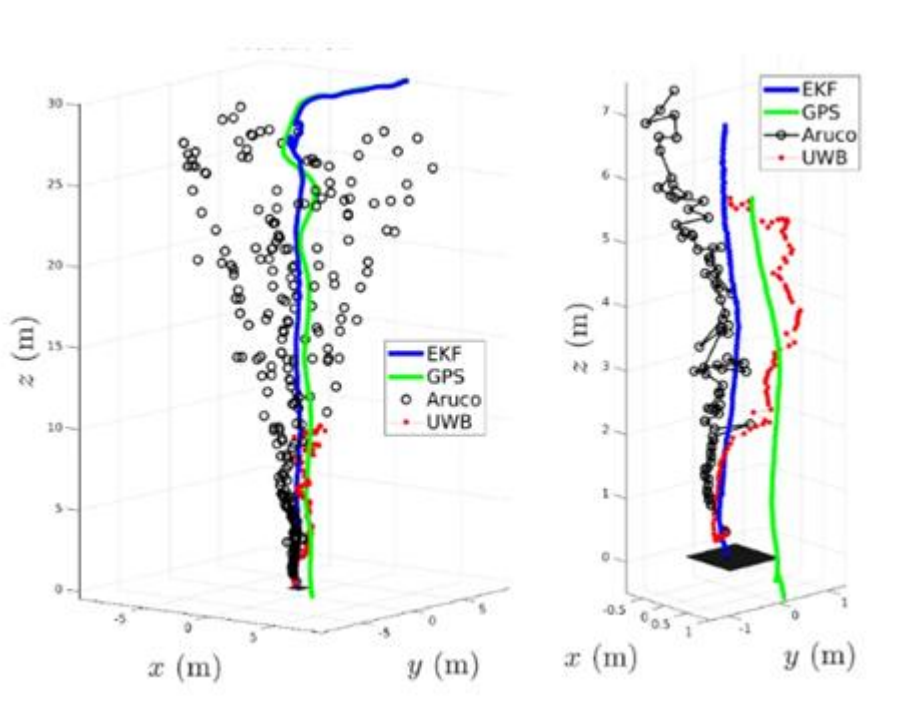


Рис. 3.2 – Результати 3Д оцінки положення при посадці

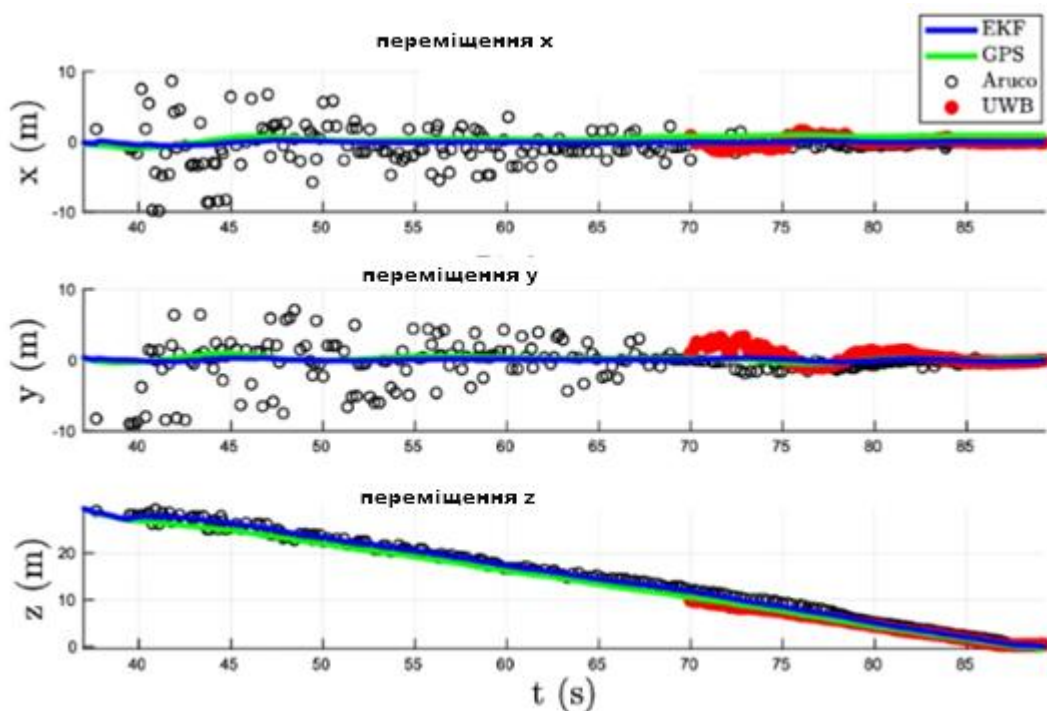


Рис. 3.3 – Результати оцінки положення при посадці для кожної осі.

На рис. 3.3 видно, що незважаючи на шумні дані від ArUco та UWB, фільтр зміг визначити чітку траєкторію для дрона. Крім того, сигнал GPS (від DJI-SDK) має зсув. Відповідно до цього вимірювання, безпілотною неправильно приземлився на платформу. Зсув фільтра відповідає за коригування зсуву GPS, нехтуючи шумом у вимірюваннях ArUco та UWB. Зсув, оцінений фільтром, зображений на рис. 3.4.

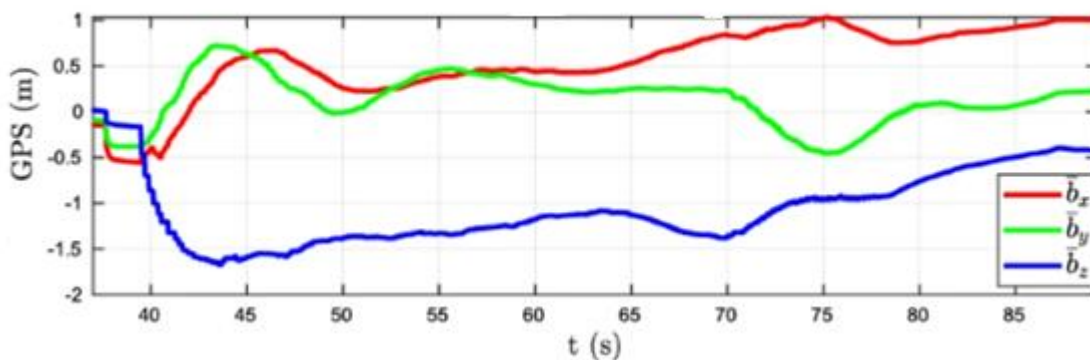


Рис. 3.4 – Оцінка зсуву для позиції GPS

Шум вимірювання ArUco (кадр ArUco відносно кадру камери) є значно більшим у розрахункових кутах крену та тангажу. Коли однорідні перетворення застосовуються до цих даних для оцінки положення дрона, високий шум крену та тангажу проявляється в положенні дрона x та y , як показано на рис. 3.2 і 3.3. На рисунку 3.5 представлено порівняння початкової оцінки положення ArUco відносно камери (W_{ArUco}) з очікуваним вимірюванням ($h_{ArUco}(\bar{x})$). Цей сигнал має набагато менший шум, ніж сигнал, який спостерігається на рис. 3.2.

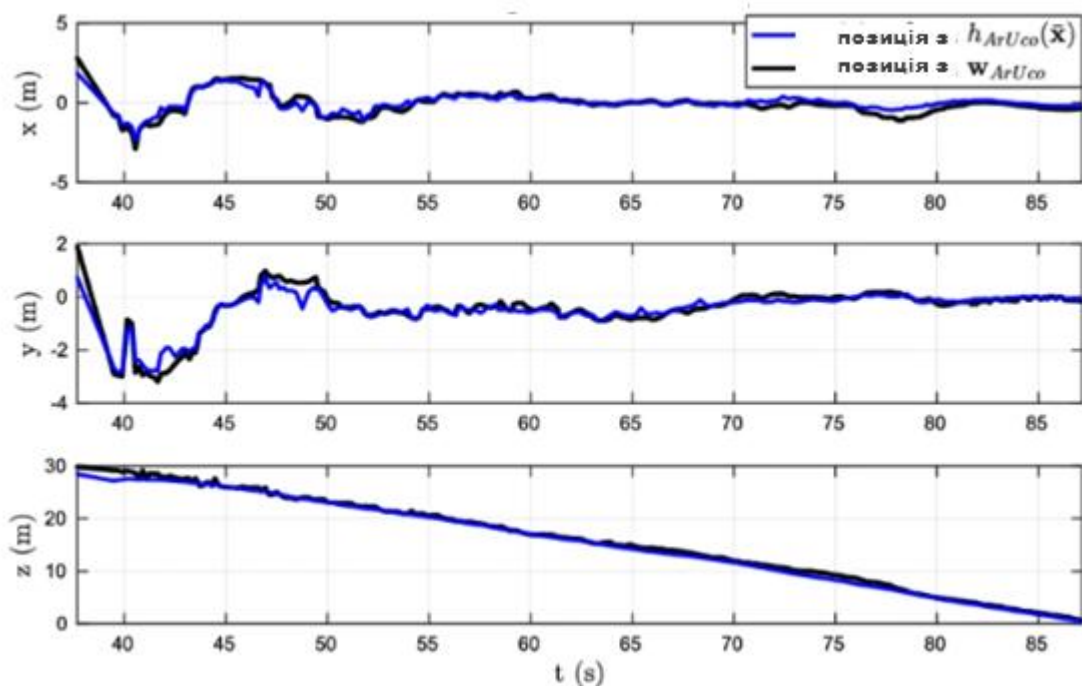


Рис. 3.5 – Порівняння початкової оцінки положення ArUco відносно камери з очікуваним вимірюванням

3.2. Оцінка несправностей

ЕКФ тестувано з різними комбінаціями методів локалізації. Показано, що підхід надійний, у випадку, якщо один із методів виявиться невдалим, дрон все одно приземлиться на платформу. Цей експеримент моделює реальні ситуації, включаючи візуальну оклюзію маркера ArUco,

на додаток до збоїв під час використання пристроїв UWB. На рис. 3.6 наведено результати дослідів. Хрестики представляють основні позиції ствердження, тоді як кола представляють оцінку EKF. Помилки в положеннях ствердження на землі виникають через неточність як локалізації, так і контролера. Отримано, що єдиним методом, не здатним посадити дрон на платформу, був GPS. Інші стратегії склалися з комбінацій із використанням UWB, великого маркера (ArUco1) і малого маркера (ArUco2).

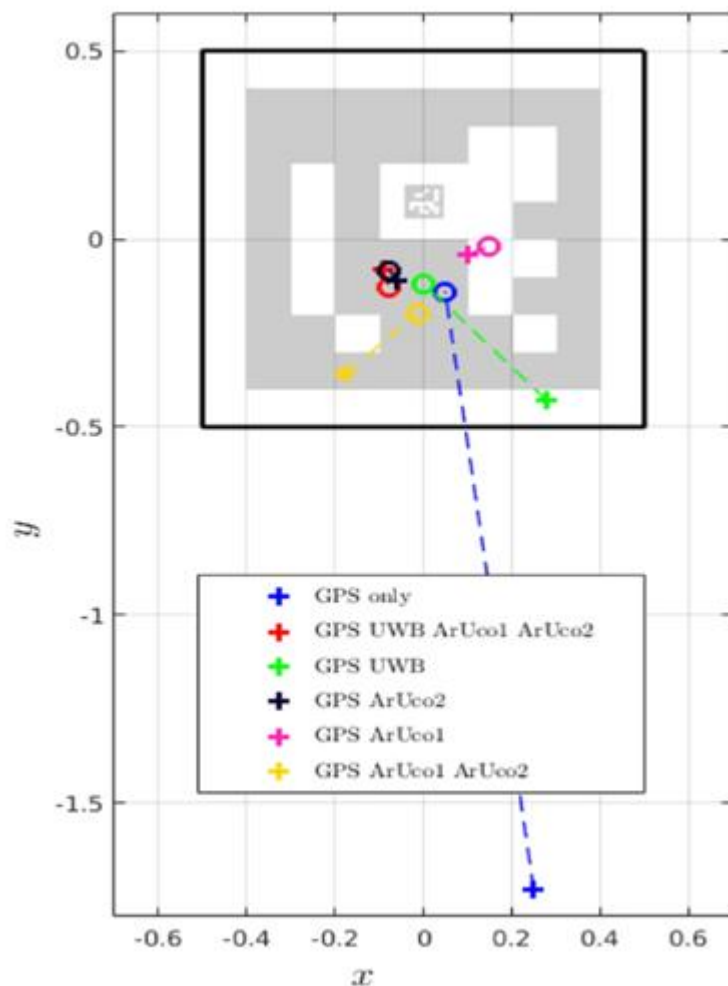


Рис. 3.6 – Результати приземлення БПЛА на платформу

Продовжуючи оцінювати надійність, проведено ще один експеримент – вставляючи шум у положення посадкової платформи з

визначеної точки посадки. Використовуючи лише дані DJI-SDK як вхідні дані для EKF, дрон не досягає платформи, а зміщення платформи збільшує похибку відстані, яка спостерігалася в попередньому експерименті. Враховуючи включення виявлення AgUso та оцінку UWB, дрон приземляється на платформу. У цьому випадку алгоритм EKF розглядає переміщення на платформі як помилку в даних GPS і включає її в оцінку зсуву.

3.3. Оцінка точності

Представлено порівняння точності приземлення запропонованої системи. Інформація про злиття EKF з усіх систем локалізації розглядалася в 6 експериментах з посадки. Під час інших 6 посадок EKF не використовує дані AgUso та UWB, таким чином покладаючись лише на GPS для оцінки положення.

На рис. 3.7 показано результати експериментів. Справжні посадкові позиції відповідають хрестикам, тоді як кола відповідають оцінці позиції фільтра після посадки. Червоним позначено дані, отримані, коли фільтр враховує всю інформацію, а синім – лише дані GPS. Два еліпси відповідають коваріації результатів посадки на землю і припускають 2 стандартних відхилення.

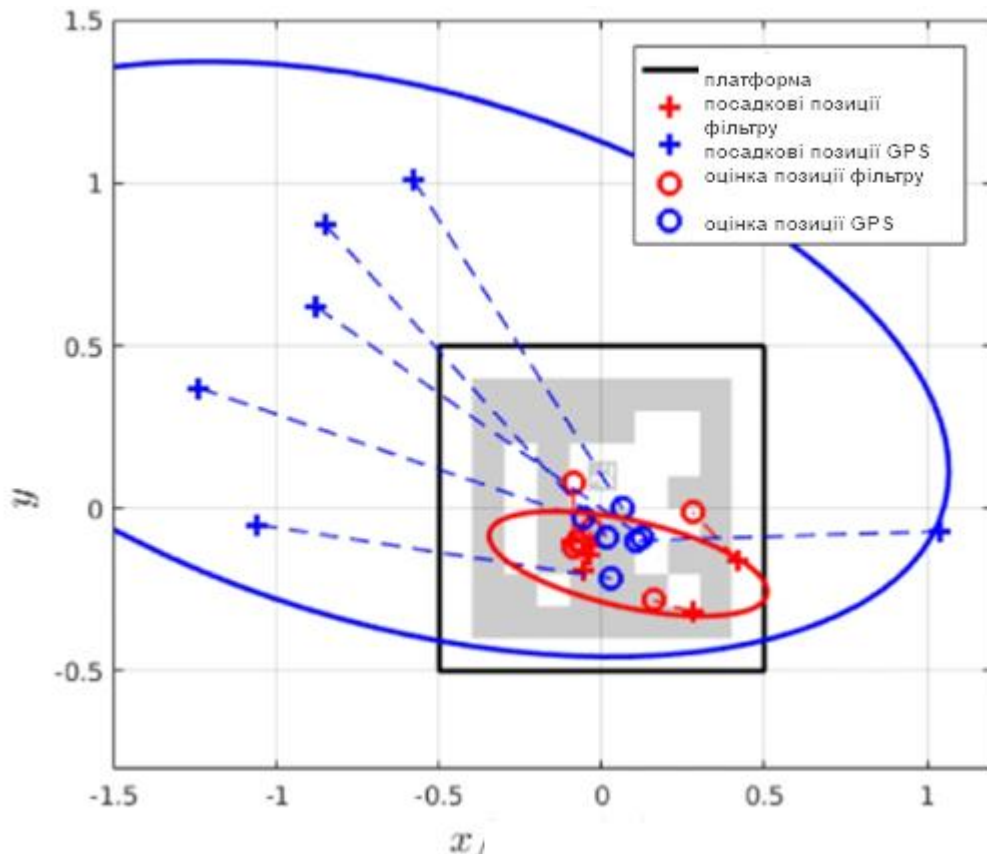


Рис. 3.7 – Оцінка позицій фільтра і GPS

В жодному з експериментів, довіряючи лише GPS, дрон не приземлився на платформу (сині хрестики), незважаючи на те, що за оцінками фільтра дрон був близько до центру платформи (сині кола). Цю помилку не було виправлено, оскільки локальна інформація (ArUco або UWB) була недоступна. У цих експериментах було досягнуто відстань від центру платформи 1.29 м. Коли фільтр підраховував дані ArUco та UWB, безпілотник приземлився на платформу під час усіх 6 експериментів, і результат мав середню відстань 0.19 м від центру платформи.

У таблиці 3.1 у першому стовпчику наведено середнє значення норми похибки (відстані) між ствердженням на землі та розрахунковою позицією. Здійснено порівняння стратегії з усіма розглянутими датчиками та лише з датчиками DJI. У другому стовпці показано відповідне стандартне відхилення значень.

Таблиця 3.1 – Помилка між розрахунковим розташуванням і наземним

Датчики	Значення похибки (м)	Стандартне відхилення (м)
Всі (фільтри)	0,121	0,0641
DL	1,166	0,130

ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ

Представлено стратегію навігації з методами планування шляху, локалізації та контролю для завдань автономної доставки за допомогою дронів.

Доведено працездатність автономного методу доставки та стратегії локалізації на етапі посадки.

Виконано оцінку точності доставки вантажу що є прийнятною для застосування в міських умовах.

ВИСНОВКИ

Експериментальні результати підтверджують запропонований метод у повній задачі автономної доставки.

В експериментах із посадкою безпілотників можна відзначити перевагу запропонованого методу локалізації лише оцінкою пози DJI-SDK. Аналіз надійності показує, що система працює в разі збою в одному з методів локалізації, який може статися в умовах слабкого освітлення, оклюзії камери та збою живлення пристроїв UWB.

Виявлено, що оцінка точності порівнює точність етапу посадки з використанням лише GPS для оцінки позиції та використання запропонованого EKF з усіма методами локалізації, показуючи переваги прийнятої стратегії. Більшість операцій доставки відбуваються в міських і густонаселених районах, і всі ці результати показують ефективність прийнятого методу та підвищують впевненість у безпечній посадці.

Окрім переваг, виявлено деякі обмеження. Запропонована стратегія працює лише за наявності GPS і в середовищі без перешкод. Крім того, маса вантажу повинна бути відомою і незмінною до приземлення.

Під час механічного проектування системи утримання вантажу важливо уникати розміщення коробки так, щоб вона блокувала гвинти. Це має значний негативний вплив на генеровану загальну тягу, а також створює небажану асиметрію.

Важливо налаштувати параметри контролера, щоб дрон мав плавний політ. Агресивні повороти відобразатимуться тремтінням на зображенні камери та шкодитимуть локалізації на основі ArUco. Крім того, трясоти вантаж може бути недоцільно.

Ще одна важлива деталь, яка суттєво впливає на продуктивність системи, це діафрагма камери. Вона має бути достатньо широкою, щоб

ідентифікувати ArUco. Більш широка діафрагма дозволяє ідентифікувати маркер з більшої відстані, покращуючи точність приземлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Грузовые беспилотники: как БПЛА работают в доставке, и насколько жизнеспособна эта идея. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vc.ru/tech/965776-gruzovye-bespilotniki-kak-bpla-rabotayut-v-dostavke-i-naskolko-zhiznesposobna-eta-ideya>
2. Дрони: сфери застосування зараз і в майбутньому. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://brain.com.ua/ukr/brain_guide/Droni-sferi-zastosuvannya-zaraz-i-v-maybutnomu/
3. Єфремов О. В. Методика вибору раціонального типу і варіанта обладнання безпілотних літальних апаратів для виконання завдань / О. В. Єфремов, О. А. Коршець // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2018. – № 5. – С. 3–7.
4. ЗСУ використовують на фронті одноразові австралійські дрони з картону: наддешеві та надійні. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://war.obozrevatel.com/ukr/zsu-vikoristovuyut-na-fronti-odnorazovi-avstralijski-droni-z-kartonu-naddeshevi-i-nadijni-foto.htm>
5. Кутовий, О.П. Тенденції розвитку безпілотних літальних апаратів / О.П. Кутовий // Наука і озброєння – 2014. – № 4. – С. 39 – 47.
6. Обзор мирового опыта коммерческой доставки грузов с помощью беспилотников. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/402475/>
7. Создание протокола сотовой связи для грузовых дронов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:SUCOM_\(протокол_сотовой_связи_для_грузовых_дронов\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:SUCOM_(протокол_сотовой_связи_для_грузовых_дронов))

8. Ростопчин В.В. Безпілотні авіаційні системи: основні поняття / В.В. Ростопчин, І.Е. Бурдун / ЕЛЕКТРОНІКА: Наука, Технологія, Бізнес. – 2016. – №7. – С. 82-88.
9. Харченко В. П. Авіоніка : навч. посіб. Київ : НАУ, 2013. 272 с
10. Харченко В. П. Аналіз застосування безпілотних авіаційних систем у цивільній сфері / В. П. Харченко, Д. Е. Прусов // Вісник Національного авіаційного університету. – 2012. - № 4. – С. 118-130.
11. Фильтр Калмана: простыми словами о сложной математике [Електронний ресурс]. – Режим доступа: https://mp-lab.ru/filtr_kalmana_dlya_nachinayushchih/
12. Amazon is launching ultra-fast drone deliveries in Italy, the UK, and a third location in the U.S. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aboutamazon.com/news/operations/amazon-prime-air-drone-delivery-updates>
13. DJI представила вантажний дрон, який піднімає до 40 кг. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <https://delo.ua/gadgets/dji-predstavila-vantaznii-dron-yakii-pidnimaje-do-40-kg-video-428105/> .
14. Knysh B. The classification of the certain types of the unmanned aerial vehicles / Knysh B., Brovko P., Popil D. // International periodic scientific journal. Modern engineering and innovative technologies. Heutiges ingenieurwesen und innovative technologien. – 2017. – №2. – С. 34 – 39.