

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій  
Кафедра авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів

**ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач випускової кафедри

\_\_\_\_\_ Віктор СИНЕГЛАЗОВ

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**  
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ  
“БАКАЛАВР”

**Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»**

**Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»**

**Тема:** Інтелектуальна система налаштування візуальної системи навігації  
БПЛА

**Виконавець:** студент групи ІК 303Б/СТН Сюрха Орест Олександрович

**Керівник:** Синеглазов В.М.

**Нормоконтролер:** \_\_\_\_\_ Філяшкін М. К.

**Київ-2023**

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Віктор СИНЄГЛАЗОВ

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

## ЗАВДАННЯ

### на виконання кваліфікаційної роботи студента

Сюрхи Ореста Олександровича

- 1. Тема роботи:** «Інтелектуальна система налаштування візуальної системи навігації БПЛА».
- 2. Термін виконання проекту (роботи):** з 1.04.2023р. до 20.06.2023р.
- 3. Вихідні дані до роботи:** Розробка структурної та функціональної схем магнітного коректору. Дослідження алгоритму функціонування магнітного коректор. Розробка методів усунення девіації для трикомпонентного магнітометра на аеродромі. Дослідження розроблених алгоритмів.
- 4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):**
  - 1.1 КЛАСИФІКАЦІЯ СУЧАСНИХ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ.
  - 1.2 Розробка структури інтегрованого навігаційного комплекс.
  - 1.3. Обґрунтування необхідності створення системи візуальної навігації, структура, принципи, рішення.
  - 1.4. Структура системи візуальної навігації.
  - 1.5. Типи систем візуальної

навігації. 1.6 Технічні засоби сучасних систем навігації. 2.1. Фізичні основи системи візуальної навігації. 2.2 Аналіз ефективності алгоритмів комп'ютерного зору для пошуку, опису та зіставлення наземних орієнтирів, а також підвищення точності системи візуальної навігації. 2.3. Фізичні основи реалізації СВН.

3.1 Постановлення завдання. 3.2. Розробка імітаційного стенду польоту БПЛА.

3.3 СТРУКТУРНА СХЕМА ВТОРИННОЇ РАМИ ІМІТАЦІЙНОГО СТЕНДУ.

3.4 РОЗРАХУНОК МАСШТАБУ КАРТИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО СТЕНДУ. 4.1. Постановка завдання налаштування системи візуальної навігації на стенді. 4.2. ОЦІНКА ЯКОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ВІЗУАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЇ

## **5.Перелік обов'язкового графічного матеріалу**

## 6. Календарний план-графік

<b>Етапи виконання дипломного проекту (роботи)</b>	<b>Термін виконання роботи</b>	<b>Примітка</b>
Підбір літератури	23.05.23 – 27.05.23	Вик.
Технічне завдання	27.05.23 – 28.05.23	Вик.
Вступ	27.05.23 – 28.05.23	Вик.
Аналіз класифікації сучасних БПЛА	28.05.23 – 29.05.23	Вик.
Розробка структури інтегрованого навігаційного комплексу.	29.05.23 – 31.05.23	Вик.
Аналіз технічних засобів сучасних систем навігації	01.06.23 – 05.06.23	Вик.
Розробка імітаційного стенду польоту БПЛА.	06.06.23 – 15.06.23	Вик.
<b>ОЦІНКА ЯКОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ВІЗУАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЇ</b>	15.06.23 – 19.06.23	Вик.
Висновки	19.06.23 - 19.06.23	Вик.
Оформлення пояснювальної записки	20.06.23 – 20.06.23	Вик.

## 7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Керівник:

Синегзавол В.М.

(підпис)

Завдання прийняв до виконання

Сюрха О.

(підпис)

## Реферат

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи :«Азимутальний магнітометричний коректор інерціальної навігаційної системи. Усунення магнітної девіації на аеродромі»

72 с., 17 рис., 1 табл, 7 джерел.

ПЛЮТАЖНО НАВІГАЦІЙНИЙ КОМПЛЕКС, ІНЕРЦІАЛЬНА НАВІГАЦІЙНА СИСТЕМА, ТРЬОХКОМПОНЕНТНИЙ МАГНІТОМЕТР, МАГНІТНИЙ КУРС, УСУНЕННЯ ДЕВІАЦІЇ НА АЕРОДРОМІ.

Об'єкт дослідження: трьохкомпонентний магнітометр.

Предмет дослідження: аналіз функціонування трикомпонентного магнітометра як частини азимутального каналу ІНС.

Мета роботи: розробити алгоритм функціонування магнітного коректора на основі трьохкомпонентного магнітометра, вивчити його характеристики та дослідити можливості усунення девіації.

Методи дослідження: аналіз літературних джерел, експериментальні вимірювання, обробка та аналіз даних.

Отримані результати та їх новизна: підтверджено ефективність використання трикомпонентного магнітометра для коригування азимутального каналу ІНС.

Виявлено можливості усунення девіації за допомогою розробленого алгоритму.

Отримані результати підтверджують високу точність та стабільність роботи магнітометра.

Рекомендації щодо використання результатів роботи: розроблений алгоритм та методи усунення девіації можуть бути використані при проектуванні та вдосконаленні систем автономної навігації, зокрема ІНС, з метою підвищення їх точності та надійності. Результати дослідження також можуть бути використані для покращення систем автоматичного керування повітряними та космічними апаратами.

## ЗМІСТ

Вступ.....	
Розділ 1. СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ	
1.1 КЛАСИФІКАЦІЯ СУЧАСНИХ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ.	
1.2 Розробка структури інтегрованого навігаційного комплекс.	
1.3. Обґрунтування необхідності створення системи візуальної навігації, структура, принципи, рішення.	
1.4. Структура системи візуальної навігації.	
1.5. Типи систем візуальної навігації	
1.6 Технічні засоби сучасних систем навігації	
Розділ 2. АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ВІЗУАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЇ	
2.1. Фізичні основи системи візуальної навігації.	
2.2 Аналіз ефективності алгоритмів комп'ютерного зору для пошуку, опису та зіставлення наземних орієнтирів, а також підвищення точності системи візуальної навігації.	
2.3. Фізичні основи реалізації СВН.	
Розділ 3. ІМІТАЦІЙНИЙ СТЕНД ПОЛЬОТУ БПЛА.	
3.1 Постановлення завдання.	
3.2. Розробка імітаційного стенду польоту БПЛА.	
3.3 СТРУКТУРНА СХЕМА ВТОРИННОЇ РАМИ ІМІТАЦІЙНОГО СТЕНДУ.	
3.4 РОЗРАХУНОК МАСШТАБУ КАРТИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО СТЕНДУ.	
Розділ 4. НАЛАШТУВАННЯ СИСТЕМИ ВІЗУАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЇ НА ІМІТАЦІЙНОМУ СТЕНДІ.	
4.1. Постановка завдання налаштування системи візуальної навігації на стенді.	
4.2. ОЦІНКА ЯКОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ВІЗУАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЇ	

Висновок.....

Список використаних джерел.....

## Список скорочень

БПЛА- безпілотний літальний апарат

СНС- супутникова навігаційна система

ІНС- інерціальна навігаційна система

БІНС- безплатформні інерціальна навігаційна система

ЛА- літальний апарат

МРС- модель прогнозного керування

SMC- ковзний режим керування

ФК- фільтр Калмана

GPS- система глобального позиціонування

РЕБ- радіоелектронної боротьби

SLAM- Метод одночасної навігації та побудови карти



## Вступ

На сучасних БПЛА в якості основної навігаційної системи використовується ІНС, зокрема БІНС, що забезпечує обрахування координат місця знаходження.

Інерціальна навігаційна система дозволяє автономно визначати складові прискорення і швидкості польоту ЛА, кути крену і тангажу. У деяких ІНС здійснюється автономне обчислення координат місцезнаходження літака. Перевага інерціальних систем перед іншими системами навігації – це їх повна автономність, абсолютна завадозахищеність, а також висока інформативність.

Проте, БІНС мають властивість накопичувати похибки визначення координат місця знаходження, крім того визначення всіх навігаційних параметрів здійснюється з похибками, що носять коливальний характер. Ці властивості ІНС висувають жорсткі вимоги до точності датчиків первинної інформації, більшість з яких у даний час не можуть бути технічно реалізовані. Тому ІНС потребує корекції, для чого в парі використовується СНС.

Досить актуальною на даний час є задача створення комплексної навігаційної системи на базі супутникової та інерціальної систем навігації для визначення координат місця розташування рухливого об'єкта, у тому числі БПЛА. Використання інтегрованих інерціально-супутникових систем компенсує недоліки окремих систем, і забезпечує високу точність і надійність виміру параметрів польоту. З метою покращення визначення навігаційних параметрів польоту при перервах у роботі супутникової системи навігації, доцільно удосконалити навігаційну систему шляхом використання додаткової інформації від аеромагнітометричної системи.

Отже у роботі планується розробити інтегрований навігаційний комплекс БПЛА на основі безплатформного блоку інерціальних датчиків, приймача СНС ГЛОНАСС/GPS, трьохкомпонентного магнітометра та модуля аерометричних датчиків.

Основні навігаційні задачі, які буде вирішувати такий навігаційний комплекс це задачі інерціальної та супутникової навігації. Магнітометричні та аерометричні навігаційні системи є допоміжними засобами комплексу, вони запобігають розбіжності вертикального та курсового каналу інерціально-супутникової системи навігації, а також реалізують інерціально-курсо-повітряний метод числення координат на період радіомовчання СНС. В інтегрованому навігаційному комплексі також пропонується використовувати методи сумісної обробки інформації на основі схем калманівської фільтрації, а на етапах інерціально-супутникового числення координат оцінювати похибки курсо-повітряного числення, які можна буде враховувати на етапах роботи навігаційного комплексу без інформації від СНС.

Елементною базою навігаційних комплексів малих БПЛА є мікромеханічні датчики первинної інформації.

Тарірування, калібрування та налагодження таких датчиків та комплексу в цілому є окремою інженерною задачею, для вирішування якої зазвичай створюється спеціальна апаратура налагоджування. В роботі пропонуються розробити окремі елементи такої апаратури налагоджування.

## РОЗДІЛ 1 СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ

### 1.1 КЛАСИФІКАЦІЯ СУЧАСНИХ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ

Україна має повний цикл розвитку авіаційної техніки та посідає значне місце на світовому авіаційному ринку в секторі транспортної та регіональної пасажирської авіації, що дозволяє розробляти та виробляти авіаційну техніку. Одним із перспективних напрямків на сьогодні є створення БПЛА. БПЛА характеризуються такими перевагами перед пілотованими літаками, як: відсутність потреби в екіпажі та системах його життєзабезпечення, аеродромах; відносно низька собівартість і невеликі витрати на їх створення, виробництво та експлуатацію. БПЛА впроваджуються в усіх сферах інтересів людини, і відзначається поява сфер застосування, де БПЛА не мають пілотованої альтернативи. Яскравим прикладом такого технологічного розвитку є використання БПЛА під час ліквідації надзвичайних ситуацій.

Різноманітність сфер застосування визначається тим, наскільки технічно розвинені БПЛА, що характеризується класифікаційними ознаками, що визначають типи цих літаків, і є основою їх класифікації. В даний час існує ряд різних підходів до класифікації БПЛА, які враховують взаємозв'язок функцій і завдань БПЛА. Так, у правилах польотів на безпілотних авіаційних комплексах державної авіації України наведена класифікація безпілотних літальних апаратів безпілотних авіаційних комплексів, яка є загальною для державної безпілотної авіації України. Виходячи з аналізу класифікацій БПЛА, вони в основному відносяться до військової сфери. На сьогоднішній день немає жодного нормативно-правового документа, в якому була б дана класифікація безпілотних літальних апаратів безпілотних авіаційних комплексів, відповідних цивільній сфері.

Зважаючи на зазначене питання класифікації, визначення комплексу функцій і завдань безпілотної авіації в цивільній сфері є актуальним для дослідження з урахуванням досвіду провідних країн світу.

Немає єдиного стандарту, коли йдеться про класифікацію UAS. Міністерства оборони мають свій власний стандарт, а цивільні особи мають свої вільні категорії для UAS, що постійно розвиваються. Люди класифікують їх за розміром, дальністю та тривалістю польоту та використовують систему рівнів, яку використовують військові.

За стандартами НАТО БПЛА, а також літаки з пілотом на борту поділяються на 3 класи за загальною злітною вагою (табл. 1.1):

I – загальна злітна маса до 150 кг.

I клас поділяється на категорії:

- мікро – до 2 кг;
- міні – до 15 кг;
- малі – від 15 кг.

II – повна злітна маса до 600 кг.

III – загальна злітна маса понад 600 кг.

У класифікації НАТО БПЛА поділяються на класи за категорією БПЛА, рівнем бойових дій, висотою застосування, радіусом дії, рівнем використання.

Міністерство оборони США використовує п'ять груп для класифікації БПЛА, на які БПЛА поділяються за розміром, максимальною злітною вагою, робочою висотою та швидкістю (табл. II)

У класифікації НАТО та класифікації Міністерства оборони США БПЛА поділяються на класи за загальною злітною вагою, але різняться кількістю класів, на які вони діляться, а також вага, за якою вони діляться.

Тому через відсутність єдиної класифікації безпілотних літальних апаратів може виникнути проблема, коли БПЛА однієї моделі можна віднести до різних класів за різними класифікаціями.

<b>Class</b>	<b>Категорія</b>	<b>Нормальна зайнятість</b>	<b>Нормальна робоча висота</b>	<b>Нормальний радіус місії</b>	<b>Основний підтримуваний командир</b>	<b>Приклад платформи</b>
III клас (> 600 кг)	Strike/Combat	Стратегічний/Нац	До 20 000 м	Необмежений (BLOS)	Театр	Reaper
	HALE	Стратегічний/Нац	До 20 000 м	Необмежений (BLOS)	Театр	Global Hawk
	MALE	Оперативна/Театр	До 14 000 м	Необмежений (BLOS)	JTF	Heron
II клас (150–600 кг)	Tactical	Тактичний строй	До 5500 м	200 км	Бригада	Hermes 450
I клас (<150 кг)	Маленький (>15 кг)	Тактичний підрозділ	До 1500 м	50 км	Батальйон, Полк	Scan Eagle PD-2
	Міні (<15 кг)	Тактичний підрозділ	До 900 м	до 25 км	Компанія, взвод, Загін	Skylark

	Мікро (<66 Дж)	Тактичний підрозділ	До 60 м	до 5 km	взвод, Загін	Black Widow
--	----------------------	------------------------	---------	---------	-----------------	----------------

ТАБЛИЦЯ 1.1 СИСТЕМА КЛАСИФІКАЦІЇ БПЛА НАТО STANAG 4670

Група:	Група1	Група2	Група 3	Група4	Група5
Розмір	Малий	Середній	Великий	Більший	Найбільш ий
Максимальна злітна вага	< 20 фунтів (9,1 кг)	> 20 &< 55	> 55 &< 1320	>1,320 фунтів (600 кг)	>1,320 фунтів (600 кг)
Швидкість	< 100 вузлів (190 км/год)	< 250 вузлів (460/год)	< 250 вузлів (460км/го д)	Будь-яка швидкість	Будь-яка швидкість

ТАБЛИЦЯ 1.2. КЛАСИФІКАЦІЯ БПЛА ЗА МІНІСТЕРСТВОМ ОБОРОНИ США

Методи класифікації безпілотних літальних апаратів базуються на використанні різноманітних ознак БПЛА. Безпілотні літальні апарати можна класифікувати за такими характеристиками.

Класифікація БПЛА за типом літальних апаратів. За типом літальних апаратів основні типи БПЛА — авіаційні, вертолітні та багатогвинтові.

БПЛА авіаційного типу. БПЛА авіаційного типу також відомі як БПЛА з нерухомим крилом. У БПЛА цього типу підйомна сила створюється аеродинамічним методом за допомогою тиску повітря, що надходить на нерухоме крило. У конструкціях БПЛА цього типу використовуються практично всі компоновочні схеми літальних апаратів і типи фюзеляжів, які зустрічаються в пілотованій авіації. У більшості випадків БПЛА цього типу характеризуються великою тривалістю польоту, високою максимальною висотою польоту та високою швидкістю.

БПЛА вертолітного типу. БПЛА вертолітного типу також відомі як гвинтокрилі БПЛА (вертолітні БПЛА). Підйомна сила в БПЛА вертолітного типу

створюється аеродинамічно, за рахунок обертових лопатей гвинта, а не за рахунок крил. Крила або зовсім відсутні, або грають допоміжну роль. Очевидними перевагами БПЛА вертолітного типу є можливість зависання в точці і висока маневреність..

Багатороторні: БПЛА, які мають більше одного ротора. Найбільш часто використовуваними конструкціями є трикоптери, квадрокоптери, гексакоптери та октакоптери.

Гібридний VTOL з нерухомим крилом: гібридні БПЛА з більшим часом польоту. Вони мають стабільність БПЛА з нерухомим крилом, а також здатність зависати, злітати та приземлятися вертикально. VTOL відноситься до вертикального зльоту і посадки

Для класифікації за розміром можна використовувати наступні підкласи: Дуже малі БПЛА, Мікро або Нано БПЛА, Малі БПЛА, Міні БПЛА, Середні БПЛА, Великі БПЛА

Дуже малі БПЛА: клас дуже малих БПЛА відноситься до БПЛА, розмір яких коливається від розміру великої комахи до 30–50 см у довжину. Комахоподібні БПЛА з махаючими або обертовими крилами є популярним мікропроектном. Вони надзвичайно малі за розміром, дуже легкі. Більші використовують звичайну конфігурацію літака. Вибір між поворотними або маховими крилами залежить від бажаної маневреності. Конструкції на основі махових крил дозволяють приземлятися на невеликі поверхні. Прикладами дуже малих БПЛА є IAI Malat Mosquito, Aurora Flight Sciences Skate і Cyber Technology CyberQuad. Приклади наведено на рис. 1.1

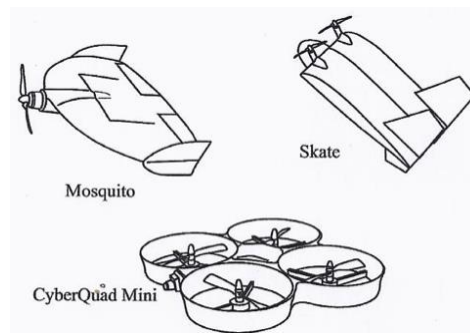


Рис. 1.1 Приклади дуже малих БПЛА



Малі БПЛА: клас малих БПЛА (також іноді їх називають міні-БПЛА) відноситься до БПЛА, принаймні один розмір яких перевищує 50 см і не більше 2 метрів. Багато конструкцій у цій категорії засновані на моделях з нерухомим крилом, і більшість запускаються вручну, підкидаючи їх у повітря. Деякі з БПЛА цього класу побудовані на базі гвинтокрила.

Середні БПЛА. Середні БПЛА – це БПЛА, які занадто важкі, щоб їх перевозила одна людина, але менші за легкі літаки. Зазвичай вони мають розмах крил близько 5-10 м і можуть нести корисне навантаження від 100 до 200 кг. Прикладами середніх БПЛА з фіксованим крилом є Hunter, Watchkeeper, BoeingEagleEye, RQ-2 Pioneer, BAESkyeyeR4E і RQ-5A. RS-20 компанії AmericanAerospace є ще одним прикладом перехресного БПЛА, який відповідає специфікаціям малих і середніх БПЛА. Приклади середніх БПЛА наведені на рис.1.2.

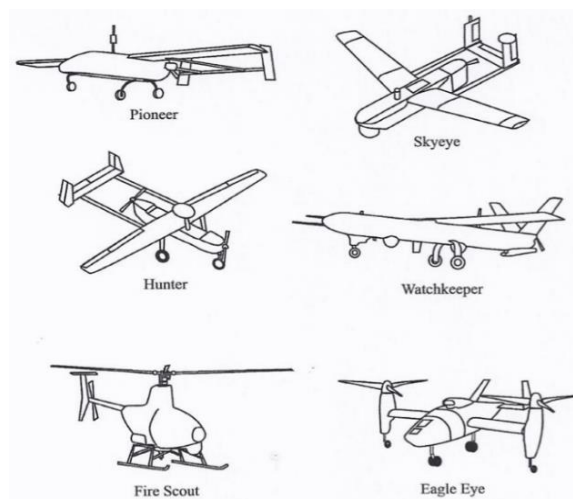


Рис.1.2 Приклади середніх БПЛА

Великі БПЛА: клас великих БПЛА відноситься до великих БПЛА, які використовуються переважно для військових операцій. Прикладами таких великих БПЛА є GeneralAtomicsPredatorA і B і NorthropGrummanGlobalHawk.

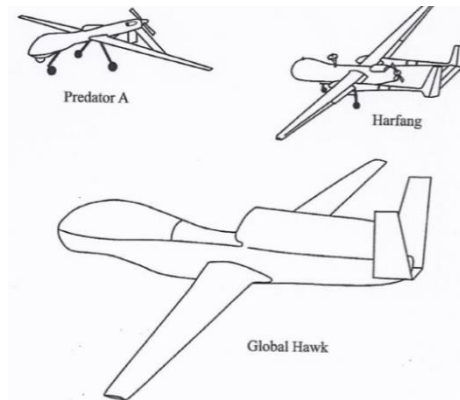


Рис. 1.3 Приклади великих БПЛА

#### Класифікація за дальністю та тривалістю польоту

БПЛА дуже близького радіусу дії: цей клас включає БПЛА з радіусом дії 5 км, часом роботи від 20 до 45 хвилин. БПЛА цього класу дуже близькі до моделей літаків.

БПЛА ближнього радіусу дії: БПЛА цього класу мають радіус дії 50 км і час роботи від 1 до 6 годин.

БПЛА малої дальності: включає БПЛА цього класу, які мають радіус дії 150 км або більше та час роботи від 8 до 12 годин.

БПЛА середньої дальності: цей клас включає БПЛА з надвисокою швидкістю та радіусом дії 650 км.

Витривалі БПЛА: цей клас включає БПЛА з часом роботи 36 годин і радіусом дії 300 км. Цей клас БПЛА може працювати на висоті 30 000 футів.

Класифікація за ступенем автономності: БПЛА також можна класифікувати за ступенем автономності в польоті

Рівень 0: Без автоматизації. Пілот повністю контролює кожен рух. БПЛА постійно управляються вручну.

Рівень 1 – допомога пілоту. Пілот продовжує контролювати загальну роботу та безпеку БПЛА. Однак дрон може виконувати принаймні одну життєво важливу функцію протягом обмеженого періоду часу. Він не має постійного контролю над БПЛА і ніколи не контролює швидкість і напрямок одночасно, але

він може забезпечити навігаційну підтримку та/або підтримувати висоту та положення.

Рівень 2 – часткова автоматизація. Пілот, як і раніше, відповідає за безпечну роботу БПЛА і повинен бути готовий взяти під контроль дрон, якщо щось трапиться. Однак за певних умов дрон здатний контролювати курс, висоту та швидкість. Пілот все ще повністю контролює повітряний простір, умови польоту та реагування на надзвичайні ситуації. Більшість виробників зараз створюють дрони на цьому рівні, де платформа може допомогти з функціями навігації та дозволити пілоту відмовитися від деяких завдань.

Рівень 3 – умовна автоматизація. Як і на рівні 2, безпілотник може літати сам, але пілот-людина все одно має бути наготові та готовим взяти на себе контроль у будь-який момент. БПЛА сповіщає пілота про необхідність втручання, тому пілот діє як резервна система. Цей рівень означає, що дрон може виконувати всі функції «за певних умов».

Рівень 3+ – автоматизоване розгортання безпілотника. Автономність дрона можна виміряти іншим способом, враховуючи його робоче середовище. Деякі виробники досягли прогресу в автоматизації розгортання дронів, створивши «повністю автоматизовані коробки для дронів». Це означає, що немає потреби в особі, яка б спостерігала за польотом.

Рівень 4 – висока автоматизація. Дроном може керувати людина, але це не завжди потрібно. За відповідних обставин він може літати самостійно. Очікується, що дрон використовуватиме резервні системи, щоб у разі збою однієї системи він залишався працездатним. Його поведінка залежить від фіксованого набору правил або фіксованої вбудованої функціональності, яка визначає поведінку системи.

Рівень 5 – повна автоматизація. Дрон сам керує за будь-яких умов, не чекаючи втручання людини. Це включає повну автоматизацію всіх польотних завдань за будь-яких умов. Примірників БПЛА такого типу на даний момент немає. Проте очікується, що вони зможуть використовувати інструменти

штучного інтелекту для планування своїх польотів, іншими словами, автономні системи навчання зі здатністю змінювати нормальну поведінку.

#### Класифікація за висотою

Маловисотний БПЛА літає на висоті до 1000м. Ці БПЛА належать до категорії мікро-БПЛА.

Середньовисотний БПЛА має максимальну висоту від 1000 м до 10000 м. До цієї категорії відноситься великий БПЛА.

Висотні БПЛА — це всі БПЛА, які можуть літати на висоті понад 10 000 м. Існує занепокоєння, що робота цих БПЛА може створювати перешкоди комерційним і військовим пілотованим літакам, і існує потреба в розробці та інтеграції в ці БПЛА високотехнологічних систем запобігання зіткненням для польотів у населеному повітряному просторі.

#### Класифікація БПЛА за типом двигуна

Поршневі двигуни. Переваги двотактного двигуна: Двотактні двигуни широко використовуються в БПЛА через меншу масу; мають високе співвідношення потужності до ваги (P/W); вони мають кращі значення SPED (щільність рушійної енергії). Недоліки: Високий рівень шуму в порівнянні з чотиритактними двигунами і двигуном Ванкеля.

Двигун чотиритактний. Переваги: Краща економія палива, ніж двигун Ванкеля. Недоліки: досить шумний, мало використовується через велику вагу; дуже низьке співвідношення потужності до ваги порівняно з двотактним двигуном.

Двигун Ванкеля Переваги: високе співвідношення потужності до ваги; проста конструкція; витривалість і надійність роботи, тому можлива робота на високих оборотах; безклапанна система; центр маси поршня перекриває вісь ексцентрика, забезпечуючи повне динамічне балансування; можливість використання низькооктанового палива, ніж у традиційному поршневому двигуні; легкий запуск двигуна при низьких температурах. Недоліки: високий викид вуглекислого газу; більш висока вартість виробництва порівняно з

поршневыми двигунами; велика витрата палива; відносно низький крутний момент.

Переваги реактивного двигуна: дуже високе співвідношення потужності до ваги (мала вага), дуже мала вага порівняно з іншими двигунами. Недоліки: дуже висока витрата палива, не використовується в малих БПЛА через низьку економію палива на низьких обертах.

Турбореактивний двигун: переваги: дуже високе співвідношення потужності до ваги (мала вага), відносно легкий порівняно з іншими. Недоліки: дуже висока витрата палива.

Турбогвинтовий двигун Переваги: споживає дешевше паливо (авіаційний гас), ефективний на малих крейсерських швидкостях, мала вага, його поточне обслуговування менш складне, ніж в інших двигунах..

Електричний двигун. Переваги: більш ефективний, ніж інші технології, мала вага, хороше співвідношення потужності до ваги. Недоліки: низьке значення SPED (щільність рушійної енергії), не підходить для великих відстаней через низькі значення енергії в батареях.

Класифікація за принципом зльоту і посадки: горизонтальний зліт і посадка (HTOL), вертикальний зліт і посадка (VTOL), з використанням засобів старту і посадки.

горизонтальний зліт і посадка розглядається як продовження літака з нерухомим крилом. Мають високу крейсерську швидкість і плавну посадку. Безпілотники VTOL мають можливість вертикально зависати в польоті та вертикально приземлятися, але їх крейсерська швидкість обмежена через уповільнення відступаючих гвинтів.

класифікація за методами керування: лінійні контролери польоту: керування БПЛА за допомогою лінійних методів — це звичайні алгоритми керування польотом, такі як пропорційна інтегральна похідна (PID), контролер  $H_\infty$ , планування посилення та лінійно-квадратичний регулятор (LQR)

ПД-регулювання. ПД-регулятор широко використовується в управлінні системою з простим алгоритмом. Цей метод визначає похибки між встановленим

значенням і реальним значенням відповідно до рівняння (1.1). Регулятор включає три коефіцієнти: пропорційний (КР), інтегральний (КІ) і похідний (КД). Стратегія зменшує помилки до нуля за допомогою рівняння ПД, наведеного у рівнянні (1.2)

$$\text{Error} = \text{Setpoint} - \text{Feedback}, \quad (1.1)$$

де «Error» — це різниця значення між заданим значенням і зворотним зв'язком. «Setpoint» і «Feedback» — це бажане та фактичне значення.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.2)$$

де  $u(t)$  — коефіцієнт керування БПЛА,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_D$  — відповідно пропорційний, інтегральний і похідний коефіцієнти посилення, а  $e(t)$  — відхилення між заданим значенням і зворотним зв'язком.

Класичне ПД-регулювання є простим методом, який можна використовувати для керування БПЛА. Основними завданнями управління є стабілізація та зависання, надійність та хороші характеристики БПЛА.

Нові ПД-регулятори оптимізовані шляхом додавання інтелектуальних алгоритмів, таких як нечітка логіка, оптимізація рою частинок (PSO) і нейронних мереж для покращення динамічних характеристик

Контролер LQR. Алгоритм LQR є оптимальним лінійним контролером для керування динамічною системою з мінімальними витратами, показаними в рівнянні (1.3). LQR зазвичай використовує умови шуму та відсутню інформацію для виконання польоту БПЛА. Керуючий вхід мінімізує наступну функцію витрат

$$J_{LQR} = \int_0^{\infty} y_i^T(t) Q_y(t) + u_i^T(t) R u_i(t) dt, \quad (1.3)$$

де  $J_{LQR}$  — квадратична функція вартості,  $u_i$  та  $y_i$  — контрольний вхід і контрольний вихід,  $Q$  і  $R$  — вагові матриці розмірів .

$H_{\infty}$  контролер. Алгоритм  $H_{\infty}$  є ефективним методом для вирішення питань невизначених параметрів і зовнішніх завад, що стикаються з процесом польоту БПЛА.

Нелінійні контролери польоту: щоб подолати деякі недоліки лінійного контролера, були розроблені різні нелінійні контролери, які застосовано на БПЛА. Ці нелінійні контролери польоту є похідними від оригінальної динамічної моделі БПЛА. Таким чином, процеси проектування нелінійних контролерів є більш складними, ніж процеси лінійних контролерів, але мають кращу продуктивність керування. До нелінійних контролерів польоту відносяться: лінеаризація зворотного зв'язку, інверсний крок, керування ковзним режимом, адаптивне керування та керування прогнозною моделлю.

Лінеаризація зворотного зв'язку. Лінеаризація зворотного зв'язку є потужним алгоритмом керування для проектування нелінійних систем. Основна ідея цього підходу полягає в алгебраїчному перетворенні динаміки нелінійної системи в частково або повністю лінеаризовану систему, щоб можна було застосувати техніку керування за допомогою зворотного зв'язку. Динамічна інверсія моделі є окремим випадком лінеаризації зворотного зв'язку, який було ефективно досліджено для застосувань до пілотованих і безпілотних літальних апаратів.

Однак динамічна інверсія моделі може бути вразливою до помилок і невизначеностей моделювання. Тому такий підхід вимагає точного моделювання. Крім того, він не витримує зовнішніх перешкод.

Задній крок. Зворотне керування — добре відомий рекурсивний алгоритм для загальних нелінійних систем керування. Основна ідея цього методу полягає в тому, щоб розкласти контролер на кілька етапів. Його перевага полягає у високій швидкості конвергенції, і він може добре справлятися із зовнішніми перешкодами, тоді як його обмеженням є низька надійність.

SMC — це простий у реалізації нелінійний алгоритм керування, який реалізує переривчастий керуючий сигнал системі, щоб наказати їй коззати по заданій траєкторії. Його головні переваги — низька чутливість до зовнішніх перешкод, хороша здатність стеження та швидка реакція.

Адаптивний контроль. Адаптивне управління є ефективним і надійним методом керування для систем з немодельованою динамікою та параметричною

невизначеністю. Цей алгоритм керування автоматично компенсує зміни параметрів у динаміці системи, регулюючи характеристики контролера таким чином, щоб загальна продуктивність системи залишалася незмінною або підтримувалася на оптимальному рівні.

MPC — ще один нелінійний метод, який також використовувався для керування БПЛА. MPC використовує динамічну модель системи для прогнозування майбутніх станів системи з мінімізованою помилкою шляхом вирішення проблеми оптимального керування.

Складні алгоритми керування. Можна побачити, що один нелінійний контролер має деякі обмеження в процесі керування БПЛА. Щоб подолати цю проблему, існують дослідження, які поєднують переваги двох або більше алгоритмів разом для покращення продуктивності контролера [13].

#### Класифікація за застосуванням

Особисті: використовується для таких завдань, як відеозйомка та розваги.  
Комерційний: використовується для таких завдань, як доставка продуктів, моніторинг інфраструктури та аерофотозйомка. Уряд і правоохоронні органи: використовується для таких завдань, як гасіння пожеж і патрулювання.

Військові: використовується для таких завдань, як спостереження та бойові атаки [8].

Отже, враховуючи всі розглянуті характеристики, можна віднести БПЛА до таблиці 1.3.



Характеристика	Типи
Тип літака	<p>БПЛА авіаційного типу (БПЛА з нерухомих крилом), наприклад: Global Hawk</p> <p>БПЛА вертолітного типу, приклад: FireScout</p> <p>Мультиротор, приклад: CyberQuad</p> <p>Міні-гібридний VTOL з нерухомих крилом, приклад: EagleEye</p>
Size	<p>Приклади дуже малих БПЛА: IAI Malat Mosquito, Cyber Technology CyberQuad</p> <p>Малі БПЛА Приклади БПЛА: RQ-11 Raven RQ-7 Shadow</p> <p>Приклади середніх БПЛА: Boeing Eagle Eye, RQ-2 Pioneer</p> <p>Приклади великих БПЛА: General Atomics Predator, Northrop Grumman Global Hawk</p>
Range and duration of flight	<p>БПЛА дуже близької дії (дальність 5 км, тривалість польоту від 20 до 45 хвилин)</p> <p>БПЛА ближнього радіусу дії (дальність – 50 км, тривалість польоту від 1 до 6 годин)</p> <p>БПЛА малої дальності (дальність – 150 км і більше, тривалість польоту 8-12 годин)</p> <p>БПЛА середньої дальності (радіус 650 км)</p> <p>БПЛА Endurance (радіус 300 км, тривалість польоту 36 годин)</p>
Ступінь автономності	<p>Рівень 0: Без автоматизації</p> <p>Рівень 1 – Допомога пілоту</p> <p>Рівень 2 – часткова автоматизація</p> <p>Рівень 3 – Умовна автоматизація</p>

	<p>Рівень 3+ – автоматизоване розгортання дронів</p> <p>Рівень 4 – висока автоматизація</p> <p>Рівень 5 – Повна автоматизація</p>
Висота	<p>Приклади на низькій висоті (до 1000 м) (FPASS, Pointer і Dragon Eye)</p> <p>Середня висота (1000 м і 10000 м)</p> <p>Приклади на великій висоті (понад 10000 м) (X-45, predatorB, Darkstar і GlobalHawk)</p>
Тип двигуна	<p>Поршневий двигун (двотактний двигун, чотиритактний двигун, двигун Ванкеля)</p> <p>Реактивний рух (турбореактивний двигун, турбогвинтовий двигун)</p> <p>Електричний двигун</p>
Принцип зльоту і посадки	<p>Горизонтальний зліт і посадка (HTOL)</p> <p>вертикальний зліт і посадка (VTOL)</p> <p>За допомогою засобів запуску і посадки</p>
Застосування	<p>Особистий</p> <p>Комерційний</p> <p>Уряд і правоохоронні органи</p> <p>Військовий</p>
Методи контролю	<p>Лінійні контролери польоту (PID-контроль, LQR контролер, <math>H_{\infty}</math>)</p> <p>Нелінійні контролери польоту (лінеаризація зворотного зв'язку, зворотний крок, керування ковзним режимом (SMC), адаптивне керування)</p>

ТАБЛИЦЯ 1.3. КЛАСИФІКАЦІЯ БПЛА

Для СРНС. Основна навігаційна інформація виробляється в СРНС, у той час як ІНС інтерполює значення навігаційних параметрів у період між двома сусідніми тактами надходження інформації від СРНС, а також забезпечує

навігаційною інформацією системи керування польотом при короткочасній втраті сигналів від супутників.

ІНС у жорстко-зв'язаних системах (рис.1.5) забезпечує “сірі виміри”. Блок датчиків видає вектори кутових і лінійних координат.

Компенсація похибок датчиків відповідно до моделей цих похибок виконується в блоці компенсатора похибок від розширеного фільтра Калмана.

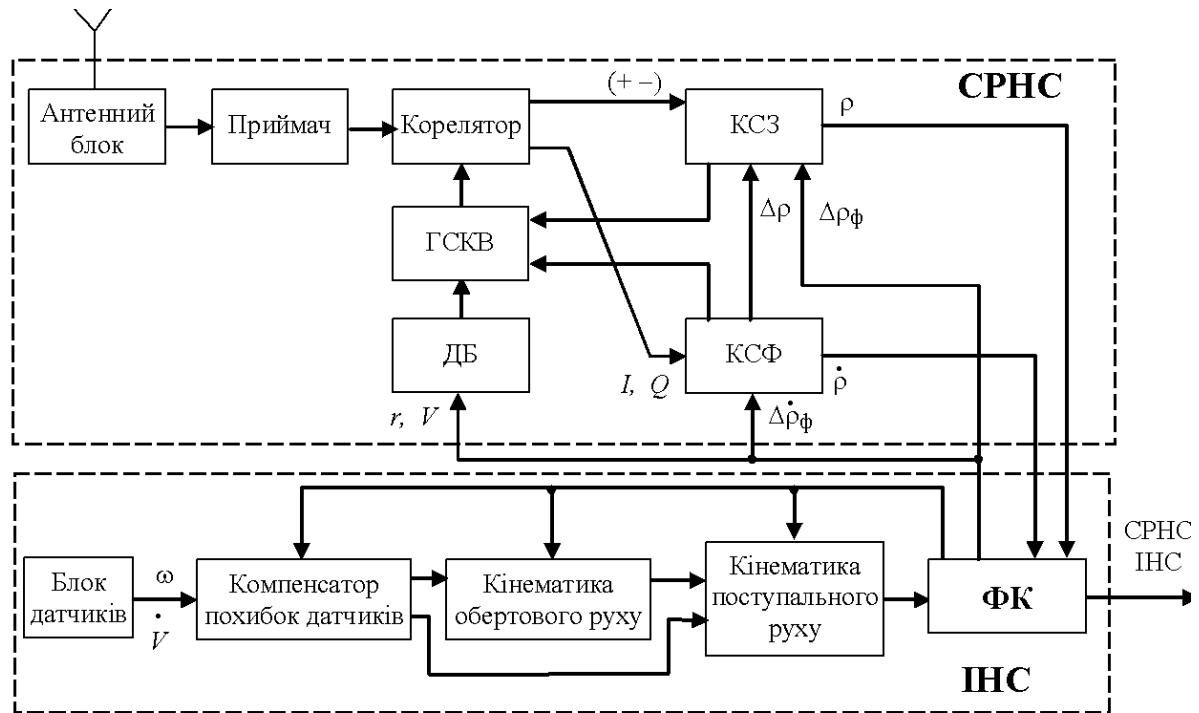


Рис.2.3.2. Жорстко-зв'язана інерціально-супутникова

Інтегрування кінематичних рівнянь обертального та поступального руху виконується з урахуванням скоректованих координат. Тобто в у жорстко-зв'язаних системах виконуються одночасно процедури оцінювання (фільтрації) і коректування ІНС.

Фільтр Калмана, на відміну від попереднього випадку, є дуже швидкодіючим. Це пов'язане з тим, що зв'язок блоку фільтра Калмана з контурами приймача СРНС-навігації значно більш жорсткий, ніж у попередньому випадку.

Підсистема інтеграції інерціальної і супутникової систем реалізується в блоці ФК і оцінює положення й швидкість БПЛА (разом з деякими похибками датчиків і зсувами годинників), причому, ці дані надходять не тільки споживачам, але й контурам спостереження за затримкою (КСЗ) та за фазою (КСФ) приймачів

СРНС. Необхідно, щоб ці дані надходили з високою швидкістю так, щоб період часу між вимірами в підсистемі СРНС був розбитий на велику кількість підінтервалів для цілей корекції контурів спостереження. Це потрібно для того, щоб постачати контуру спостереження інформацію навіть тоді, коли вхідний сигнал приймача відсутній або подавлений завадами.

Жорстко зв'язані системи мають більшу точність при тих самих інерціальних датчиках у порівнянні зі слабо зв'язаними системами. У цих системах за рахунок додаткових сигналів корекції від ІНС смуга пропускання контурів спостереження СРНС може бути значно зменшена. При цьому зростає завадостійкість цих систем і зменшується імовірність втрати сигналів, що відслідковуються. До того ж застосування фільтра Калмана, що відновлює повний вектор стану, включаючи псевдодальність  $\rho$  і швидкість її зміни  $\dot{\rho}$ , навіть при неповних вимірах, дозволяє СРНС працювати навіть при кількості видимих супутників менше 4-х. Якщо кількість цих супутників більше 4-х, то фільтр Калмана здійснює комплексування інформації, що надходить від видимих супутників.

Як і у слабо-зв'язаних системах, тут передбачено коректування СРНС від коректованої ІНС на етапах “холодного” та “гарячого” стартів, а відновлені значення псевдодальності  $\Delta\rho_f$  і швидкості її зміни  $\Delta\dot{\rho}_f$ , знаходячись в контурі спостереження за затримкою КСЗ та за фазою КСФ сигналу СРНС, забезпечують процедуру інтерполяції.

Одним із серйозних недоліків систем із жорсткою інтеграцією, у порівнянні із системами зі слабкою, є відсутність надмірності, що ускладнює рішення задач діагностики та контролю.

Тому доцільно розглянути ще один варіант інтегрування СРНС та ІНС - інерціально-супутникові системи середньої інтеграції.

Цей варіант (див. рис.1.6.) являє собою проміжне рішення між жорсткою та слабкою інтеграціями.

Система, яка представлена на рис.1.6, виробляє два навігаційних рішення: одне виходить на виході блоку СРНС, інше – на виході ІНС. Блоки, що

представлені на схемі рис.1.6, мають той же зміст, що і на попередніх схемах. ІНС забезпечує рішення навігаційної задачі у відсутності сигналів від СРНС.

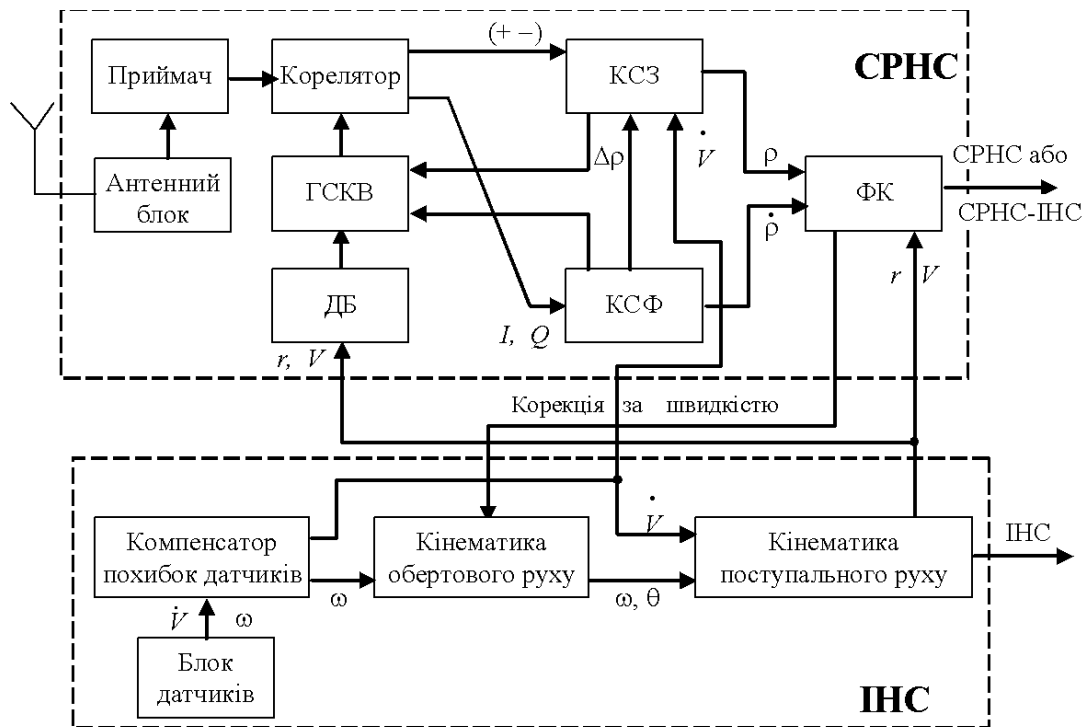


Рис.2.3.3. Інерціально-супутникова система середньої

Крім того, передбачений режим часткової корекції СРНС від ІНС, що виконує такі функції.

Блок КЗФ – блок спостереження за фазою несучої частоти, зазвичай, більш уразливий для природних або штучних перешкод. Тому, якщо цей блок спостереження “втратив захоплення” фази, а працює тільки блок КСЗ – блок спостереження за затримкою, то ІНС заміняє відсутній сигнал  $\Delta\rho$  на сигнал  $\dot{V}$ , підтримуючи, таким чином, роботу супутникової системи без збоїв.

ІНС у цьому випадку, як і у всіх інших, використовується також і для екстраполяції сигналів положення  $r$  і швидкості  $V$  між двома вимірами СРНС.

Оскільки у фільтрі Калмана відновлюється цілком весь вектор стану ЛА, то кутові змінні використовуються для корекції алгоритмів інтегрування кінематичних рівнянь кутового руху, тобто здійснюється корекція за швидкістю.

Крім розглянутих трьох варіантів структур комплексної системи існують ще й інші варіанти, що побудовані як за принципом слабкої, так і жорсткої інтеграції. Але при цьому слід мати на увазі, що ці варіанти вимагають більш

складного та дорожчого математичного забезпечення у порівнянні з уже розглянутими варіантами структур.

За результатами аналізу слабо і жорстко зв'язаних інерціально-супутникових систем можна зробити наступні висновки. Для застосування в задачах безпілотних ЛА, призначених для роботи протягом короткого періоду часу, слабо-зв'язані системи є неприйнятними через складність і дорожнечу, тому що вони вимагають застосування високоточних дорогих датчиків для інерціальних вимірів, а також складних алгоритмів інерціальної навігації та калмановської фільтрації.

Остання обставина вимагає застосування більш складних і дорогих бортових обчислювачів, що потребують великого енергоспоживання і мають великий обсяг і масу. Системи з жорсткою інтеграцією у цьому сенсі є більш прийнятними, тому за основу в даній роботі обираємо варіант інерціально-супутникової системи з жорсткою інтеграцією. Але оскільки такий варіант передбачає корекцію не тільки інерціальної, але й супутникової системи навігації, необхідно, щоб розробники СНС передбачили можливість її коректування від ИНС.

## 1.2 Розробка структури інтегрованого навігаційного комплексу

Зазвичай ИНС розглядають як основне джерело навігаційних даних, а інформацію, що надходить від приймача СНС, використовують для корекції ИНС.

При оцінюванні параметрів просторового руху ЛА слід враховувати, що вертикальний канал ИНС на відміну від горизонтальних каналів є структурно нестійким, оскільки він немає контуру інтегральної корекції, настроєного на період Шулера. Тому, зазвичай, передбачається мати додаткове джерело інформації – висотомір (радіовисотомір або барометричний), що забезпечує, по-перше, прив'язку вимірювань до певного рівня відліку (до рельєфу земної поверхні або до середньостатистичного рівня моря), по-друге, корекцію цього каналу з метою відновлення стійкості системи.

Також слід враховувати те, що в СНС відсутня інформація про кутову орієнтацію, а в ИНС похибка визначення курсу, на відміну від похибок зчислення

крену й тангажа швидко збільшується. В такому разі зазвичай до складу ІНС включають магнітометр, який коректуючи азимутальний канал БІНС, зменшує похибку визначення курсу БПЛА.

Отже на борту БПЛА крім класичних датчиків БІНС знаходяться додаткові: магнітометр і датчик-приймач статичного тиску, що забезпечує роботу барометричного вимірника висоти польоту. В роботі пропонується використати ці датчики для побудови додаткової інформаційної системи для покращення надійності навігаційного забезпечення польоту БПЛА.

Завдяки різній фізичній природі та різним принципам формування навігаційного алгоритмічного забезпечення ІНС та СНС добре доповнюють одна одну. Їхнє спільне використання дозволяє, з одного боку, обмежити зростання похибок ІНС, а, з іншого боку, знизити шумову складову похибок СНС, підвищити темп видачі інформації бортовим споживачам, істотно підняти рівень завадозахищеності. Але реальні умови застосування апаратури навігаційних споживачів свідчать про те, що багато вимірників, і, насамперед, радіотехнічні супутникові системи навігації, далеко не завжди знаходяться у працездатному стані.

У реальних умовах нерідко спостерігається зрив супроводу сигналів супутників, зокрема, через багатопромєнєвість і дію інших завад, а також захоплення похибкових сигналів і т.п.

Таким чином, доцільно ввести в інтегрований навігаційний комплекс систему, яка буде підтримувати точність інерціальної системи навігації в період радіомовчання супутникової навігаційної системи.

Так як ІСНС має в своєму складі барометричний висотомір та магнітометр, логічно ввести в ІНК аеромагнітометричну систему.

Маючи у своєму складі тріади мікромеханічних інерціальних датчиків, а також барометричний висотомір і тривісний магнітометр, АМНС є допоміжна система комплексу, вона запобігає розбіжності вертикального та курсового каналу інерціально-супутникової системи навігації, а також реалізує інерціальнокурсо-повітряний метод числення координат на період радіомовчання

СНС.

Таким чином, запропонований глибоко інтегрований навігаційний комплекс БПЛА (рис. 1.7) планується будувати на основі БІНС, приймача супутникової навігаційної системи (СНС) ГЛОНАСС/GPS та аеромагнітометричної навігаційної системи (АМНС), яка складається з трьохкомпонентного магнітометра та модуля аерометричних датчиків.

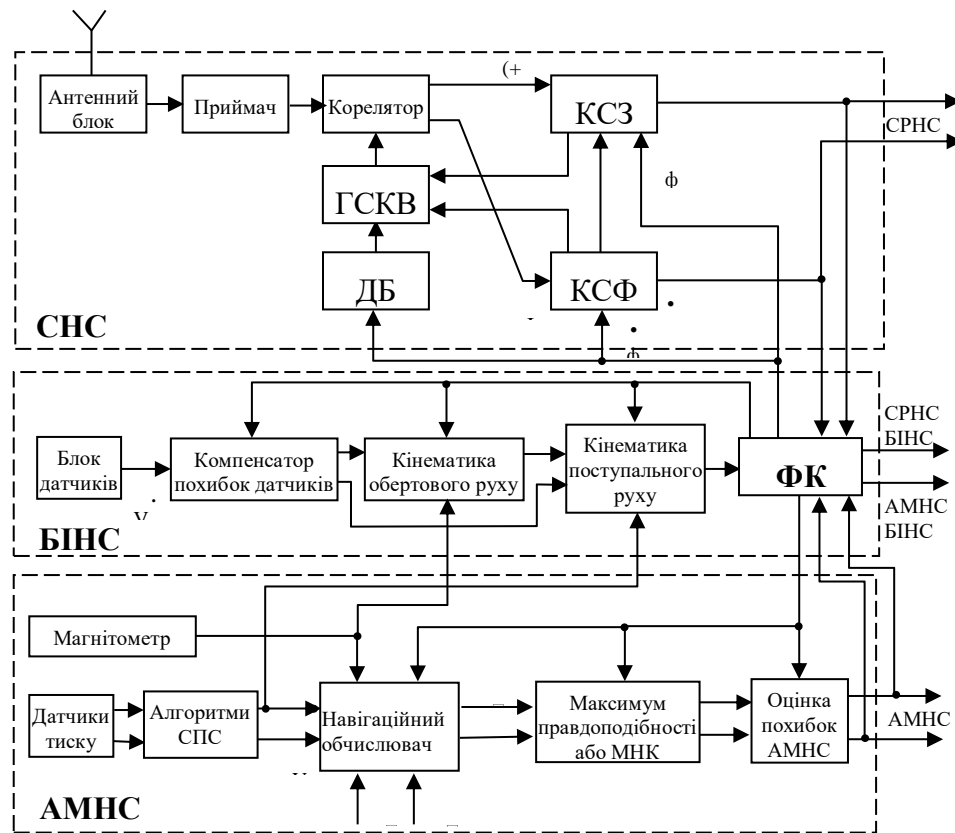


Рис. 1.7. Глибоко інтегрований навігаційний комплекс БПЛА

Основний режим роботи запропонованого комплексу – режим інерціально-супутникової навігації. Обробка навігаційної інформації інерціально-супутникової навігаційної системи здійснюється в блоці ФК за алгоритмом калманівської фільтрації.

На період радіомовчання СНС, замість неї до блоку ФК підключається аеромагнітометрична система, яка буде здійснювати корекцію інерціальної навігаційної системи.

Після відновлення сигналу від супутникової системи, аеромагнітометрична система відключається від блоку ФК і комплекс переходить до основного режиму



роботи. Проте, корекція даних АМНС (корекція похибок) знову починає відновлюватися в обчислювальному блоці за алгоритмом максимуму правдоподібності, використовуючи високоточну інформацію режиму інерціально-супутникової навігації.

Отже, основні навігаційні задачі, які буде вирішувати такий навігаційний комплекс це задачі інерціальної та супутникової навігації. Основний режим роботи комплексу це режим інерціально-супутникової навігації. На період радіомовчання СНС комплекс переходить на автономний режим роботи від інерціальної та аеромагнітометричної систем.

1.3. Обґрунтування необхідності створення системи візуальної навігації, структура, принципи, рішення.

Для вирішення навігаційної задачі БПЛА в зоні активних радіоперешкод пропонується система заснована на використанні додаткової навігаційної інформації. Отримані дослідним шляхом дані при використанні додаткового навігаційного джерела.

Такої інформації, як система візуальної навігації, базуються на комбінації методів комп'ютерного зору та використанні згорткової нейронної мережі, які забезпечують підвищену точність вирішення навігаційної задачі безпілотного літального апарату в зоні активного придушення радіосигналів.

Порівняльний аналіз підходів і алгоритмів систем візуальної навігації щодо споживання обчислювальної потужності бортового процесора та точності навігації, що забезпечується. У сучасному світі все частіше безпілотні літальні апарати використовуються для вирішення завдань фото, відео аеророзвідки, і часто потрапляють до зони активних радіоперешкод.

При цьому GPS не є працездатною і необхідне джерело додаткової навігаційної інформації для забезпечення польоту по заданому маршруту. Результати ефективної роботи системи візуальної навігації для безпілотного літального апарату підтвержені лабораторними випробуваннями та реальними

польотами БПЛА, характеристики швидкодії та точності алгоритмів будуть представлені у таблицях цієї статті.

Розглянуто та обґрунтовано два основні підходи використання системи візуальної навігації, які накладають обмеження на обчислювальну потужність та масогабаритні характеристики бортового обчислювача БПЛА. Визначено структуру системи візуальної навігації та комплекс технічних засобів. Доведено актуальність використання системи візуальної навігації для сучасних БПЛА. Виконано аналіз класичних методів комп'ютерного зору для вирішення задачі візуальної навігації та запропоновано комбіновані методи з використанням згорткових нейронних мереж для підвищення точності візуальної навігації. Крім цього розглянуто можливість подвійного призначення системи візуальної навігації для вирішення задач відео стабілізації та трекінгу об'єктів у кадрі відео камери БПЛА, коли є GPS сигнали і немає необхідності обробляти візуальні наземні орієнтири.

На сьогоднішній день БПЛА все частіше використовуються для аеро розвідки і опиняються в зоні дії РЕБ, таким чином при завадах блокуються сигнали СНС, а ІНС накопичує похибку. Сто відсоткова залежність навігації від СНС навіть у режимі польоту БПЛА по авто місії при наявності завад унеможливають виконання поставлених завдань та можуть привести до втрати БПЛА. Сучасні завдання вимагають від БПЛА саме навігацію при наявності постійних завад або в місцях прийому слабого gps сигналу.

Для рішення даної проблеми необхідні додаткові джерела навігаційної інформації високої степені завадо захищеності. В якості такого додаткового джерела інформації пропонується система візуальної навігації(СВН), актуальність розробки та ефективність роботи якої, немає сумнівів. До складу типового складу СВН належать: цифрова камера, обчислювач додаткової навігаційної інформації, гіростабілізований підвіс та інтерфейси передачі інформації в автопілот для навігації та корекції свого місця знаходження завдяки уточненню орієнтирів.

#### 1.4. Структура системи візуальної навігації.

Візуальна навігація є визначення координат БПЛА для рахунку пошуку земельних орієнтирів на місцях шляхом обробки знятих зображень ВРЛА та порівняння знайдених на отриманому зображенні орієнтирів з відображенням образів на електронних картах, координати яких із Вестників, виділенням особливих точок дескрипторів з наступним аналізом розміщення цих точок. на наступних зображеннях даного орієнтира, що дозволяє розрахувати поточні координати ВРЛА. Система візуальної навігації є перспективним способом вирішення цієї проблеми.

Структурна схема системи візуальної навігації представлений на рис. 1.4

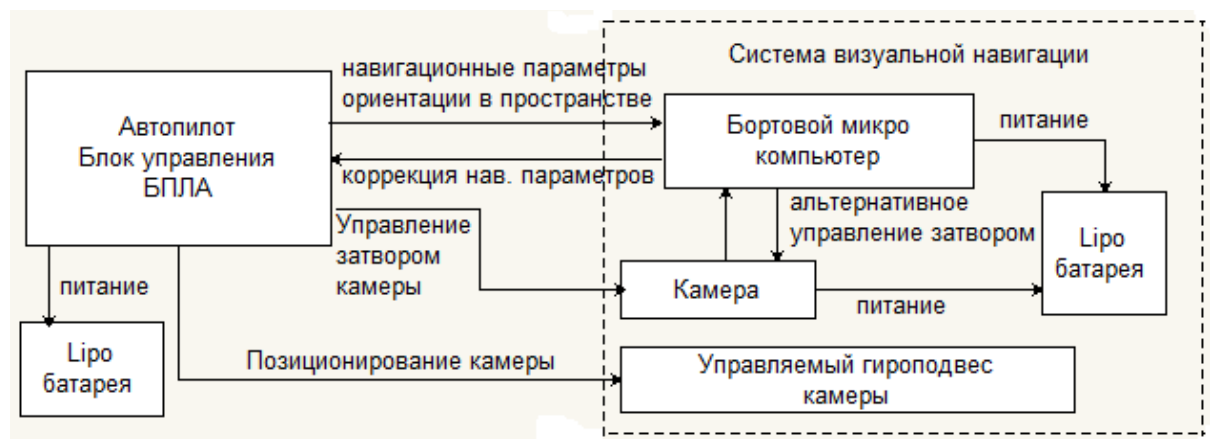


Рис. 1.4 Структурная схема системы визуальной навигации.

До складу СВН належать: цифрова камера, обчислювач додаткової навігаційної інформації, гіростабілізований підвіс та інтерфейси передачі інформації в автопілот для навігації та корекції свого місця знаходження завдяки уточненню орієнтирів.

Зі структурної схеми випливає що необхідний набір компонентів СВН включає: автопілот, гіростабілізований підвіс, бортовий мікрокомп'ютер, батарею для їх автономного живлення та камеру.

Камера підключається до бортового комп'ютера за допомогою USB/Ethernet інтерфейсу, задається період одного фотографування. Якщо використовується гіростабілізоване підвіс, керуючі сигнали надходять на підвіс від автопілота. В іншому випадку, під час фотографування бортовий обчислювач

посилає запит до автопілота на отримання кутових параметрів орієнтації БПЛА і проводить корекцію знімка (вирівнювання). Після цього бортовий комп'ютер знаходить спеціальні точки, визначає зміщення спеціальних точок, розраховує поточні координати БПЛА і по зворотному зв'язку відправляє їх автопілоту. Зворотний зв'язок здійснюється через послідовний інтерфейс (SPI).

Система візуальної навігації може запитувати від основної батареї БПЛА. Для цього необхідно додатково встановити DC/DC понижуючий перетворювач напруги або запитувати від власної літій-іонної, особливо, якщо БПЛА використовує мотор типу ДВС.

### 1.5. Типи систем візуальної навігації

1. Системи візуальної навігації по області застосування діляться на дві категорії: навігація усередині приміщень (indoor navigation) та навігація на відкритій місцевості (outdoor navigation).

2. Системи візуальної навігації в середині приміщень (Indoor Navigation systems) – дані системи забезпечують візуальну навігацію в закритих приміщеннях та на прилежній до будівель території. Використовується стерео пара камер та ультразвукових сенсорів, максимальна відстань роботи таких систем візуальної навігації становить 20 метрів, що є суттєвим недоліком. Дані системи використовуються для побудов 3Д реконструкцій моделей навколишнього середовища, моніторингу закритих на небезпечних для здоров'я людини приміщень. В основі роботи систем візуальної навігації класу Indoor Navigation використовується SLAM алгоритм:

SLAM — Simultaneous Localization And Mapping — Метод одночасної навігації та побудови картки — метод, що використовується роботами та автономними транспортними засобами для побудови картки у невідомому просторі або для оновлення карти у заздалегідь відомому просторі з одночасним контролем поточного розташування та пройденого шляху.

SLAM - це концепція, яка пов'язує два незалежні процеси в безперервний цикл послідовних обчислень, при якому результати одного процесу беруть участь

у обчисленнях іншого процесу. Побудова картки – це проблема інтеграції інформації, зібраної з датчиків робота. У цьому процесі, робот хіба що відповідає питанням: «Як виглядає світ?» Головними аспектами у побудові карти є представлення даних про довкілля та інтерпретація даних датчиків. Навпаки, локалізація - це проблема визначення розташування робота на карті.

При цьому, робот відповідає на запитання «Де я?» Локалізацію можна розділити на два види – локальна та глобальна. Локальна локалізація дозволяє відстежити місцезнаходження робота на карті, коли його початкове місцезнаходження відомо, а глобальна локалізація — це визначення місцезнаходження робота на незнайомому місці (наприклад, при викраденні робота).

SLAM – це проблема побудови карти та локалізації робота на цій карті. На практиці ці дві проблеми не можуть бути вирішені незалежно одна від одної. Перш ніж робот зможе відповісти на питання про те, як виглядає навколишнє середовище (виходячи із серії спостережень), він повинен знати, де ці спостереження були зроблені. У той же час важко оцінити поточне положення робота без карти. Ось і виходить, що SLAM є типовою проблемою курки та яйця: картка необхідна для локалізації, а локалізація необхідна для створення картки.

Приклад системи класу Indoor Navigation – DJI Guidance:



Система навігації постійно сканує навколишнє середовище та виявляє перешкоди в реальному часі. При використанні з контролером польоту DJI він може вказати вашій системі польоту автоматично уникати зіткнення навіть на високих швидкостях.

## ВИСОКОТОЧНЕ ПОЗИЦІОНУВАННЯ БАЧЕННЯ

Навіть без GPS досягайте зависання з точністю до сантиметрів. Навіть під час польоту на високих швидкостях високоточні стереоалгоритми надають інформацію про місцезнаходження майже над будь-якою місцевістю. Система оглядового позиціонування Guidance ефективна на висоті до 64 футів (20 метрів) Ліва фігура призначена лише для передачі ідеї визначення перешкод

2) Системи візуальної навігації на відкритих місцевостях (Outdoor navigation systems) – системи візуальної навігації для картографування, аерофотозйомки та навігації на робочих висотах 100 – 1500 метрів. Основний підхід даних систем.

Літальний апарат оснащений фото або відеокамерою, жорстко закріпленою або рухомою. Відомі технічні характеристики камери на БПЛА, а у разі її рухливості – орієнтація камери щодо апарату. Є супутниковий знімок місцевості,

над якою БПЛА здійснює польоти. Для знімка зі штучного супутника Землі (ШСЗ) задано географічну прив'язку. Відомі та технічні характеристики камери на ШСЗ.

Для цієї ділянки Землі може бути доступна карта висот - псевдозображення, де кожному пікселю зіставлена висота над рівнем моря тієї точки, проекція якої потрапляє в цей піксель. Супутниковий знімок разом із картою висот становлять тривимірну модель даної ділянки земної поверхні. Якщо карта висот відсутня, вважається, що ділянка є плоскою. Щодо завдання моделювання знімок з ШСЗ застосовувався для генерації знімків з камери на віртуальному апараті.

Під час польоту камера на БПЛА породжує певний набір кадрів. Для кожного кадру необхідно визначити положення та орієнтацію БПЛА, що відповідають цьому кадру, без використання додаткових датчиків (у тому числі без використання GPS/ГЛОНАСС та інерційної навігаційної системи). Обробка даних може виконуватися на борту БПЛА чи наземної станції.

Для вирішення завдання був використаний наступний підхід: так як на кожному знімку з БПЛА відображено деяку ділянку земної поверхні, яка спостерігається і на знімку з ШСЗ, можна спробувати знайти параметри проєктивного перетворення, що зв'яже два зображення, і тим самим обчислити взаємну орієнтацію камер на ШСЗ ( на той момент, коли було виконано супутниковий знімок) та БПЛА.

Оскільки супутниковий знімок має географічну прив'язку, то за відомих параметрах шуканого перетворення обчислення становища і орієнтації БПЛА стає очевидним завданням.

Обчислення невідомих параметрів передувє пошук деякого набору пар загальних (відповідних) точок, які спостерігаються на обох зображеннях. Як основний інструмент для вирішення завдання найбільше підходить програмна бібліотека комп'ютерного зору OpenCV

Головна проблема підходу в тому, що файл, який відповідає супутниковому знімку місцевості, над якою БПЛА здійснює польоти, має значні розміри (від сотень мегабайт до кількох десятків гігабайт і більше). Навіть з використанням кластерних обчислювальних установок робота з такими великими файлами може

виявитися скрутною, а якщо всі обчислення повинні виконуватися на борту БПЛА, взагалі неможливою.

Також є схожий принцип, БПЛА з заданим періодом фотографування відправляє знімки з камери на наземну станцію(сервер), сервер швидко обчислює прийнятий кадр співставивши з великою картою та відправляє координати місця знаходження назад до БПЛА. Даний підхід не можливий у присутності радіо завад так як всі канали зв'язку подавлені.

## 1.6 Технічні засоби сучасних систем навігації

### МОДУЛЬ ЦИФРОВОЇ КАМЕРИ LOGITECH WEBCAM HD PRO C920



Рис. 3 Камера + подвес з гіро стабілізацією

Інтерфейс – USB 2.0

Характеристики:

Роздільна здатність відео - FullHD (1920x1080)

Фокусування - автофокус Windows XP (SP2 або пізніша версія), Windows Vista або Windows 7 (32- або 64-розрядна версія)

Рекомендовані вимоги для відеодзвінків у форматі Full HD 1080p та 720p:  
швидкість передачі та отримання даних не менше 1 Мбіт/с для дозволу 720p  
швидкість передачі та отримання даних не менше 2 Мбіт/с для дозволу 1080p  
(вимоги для стандартів H.264 та MJPEG можуть різнитися)



Для запису відео у форматі HD 1080p потрібні процесор 2,4 ГГц Intel Core 2 Duo не менше 2 ГБ оперативної пам'яті порт USB 2.0 (також сумісний із USB 3.0) Використання гіро стабілізованих оптичних пристроїв забезпечує утримання захопленої мети у кадрі та дає незалежність від просторового положення БПЛА під час польоту. Бортовий обчислювач ODROID XU-4



Рис. 6 ODROID XU-4

Характеристики:

Центральний процесор Samsung

Exynos5422 Cortex™-A15 2Ghz и 8-ми ядерний процесор Cortex™-A7

Mali-T628 MP6(підтримка OpenGL

ES 3.0/2.0/1.1 и OpenCL 1.1 повний профіль)

2ГБайта LPDDR3 RAM PoP

Флеш накопичувач eMMC5.0 HS400

2 x USB 3.0 Host, 1 x USB 2.0 Host

Гігабітний Ethernet порт

Інтерфейс HDMI 1.4a

Розмір: 82 x 58 x 22 мм (включаючи кулер)

Емпірично ODROID XU4 обчислювач має максимальну продуктивність при малих габаритах доступних на ринку на сьогоднішній день.

Phantom 3 Pro (Built in Camera) ▾

### Camera Parameters

Image Width	4000 px
Image Height	3000 px
Sensor Width	6.17 mm
Sensor Height	4.55 mm
Focal Length	3.57 mm

2 Enter a flight height  m ▾

3 Data Validation ✓ No errors

GSD

**21.60 cm/px**

Рис. 1. Точність камери при масштабі висоти 500 метрів польоту БПЛА

GSD – ground sample distance  $GSD = H/F$ , де висота  $H$  вимірюється у сантиметрах, а фокусна відстань  $F$  у пікселях. Якщо у паспорті цифрової камери не вказано фокусну відстань у пікселях, її легко розрахувати, розділивши фокусну відстань у міліметрах на фізичний розмір пікселя матриці камери. Працюючи в ЦФС зі знімками, отриманими цифровою камерою, цілком природно вимірювати всі величини в пікселях. Фізичний розмір пікселя матриці визначає її світлочутливість.

Камера Logitech Webcam HD Pro C920 має точність розпізнавання об'єктів на висоті 500 метрів 21.6 сантиметрів/піксель. Багато систем візуальної навігації не мають бортового комп'ютера, а просто відправляють зроблені знімки на наземну станцію, де потужні та габаритні обчислювачі виконують обробку знімків і навігацію БПЛА. Але цей спосіб не передбачає виконання головного навігаційного завдання, а саме політ у зоні радіо електронної боротьби за наявності перешкод. У такому разі канал передачі на наземну станцію не працюватиме і така система не працює. Наша модель СВН побудована за принципом обробки всіх обчислень автономно на борту БПЛА.

1. Обмеження за вагою та обчислювальною потужністю бортового обладнання БПЛА викликають складність вибору компонентів для СВН.

2. Вага та потужність бортового комп'ютера який виконує обробку зображень та розпізнавання орієнтирів обмежені, і його параметри безпосередньо впливають на технічні характеристики камери, що вибирається. Оскільки знімки камери можуть бути по ширині та висоті в пікселях такої високої роздільної здатності, що бортовий обчислювач не встигатиме їх обробляти. З іншого боку, якщо знімки з камери надто зашумлені і розмиті, то алгоритми обробки та розпізнавання бортового обчислювача будуть працювати вкрай погано.

Технічні характеристики системи візуальної навігації:

Камера Logitech Webcam HD Pro C920:

Характеристики:

- Центральний процесор Samsung Exynos5422 Cortex™-A15 2Ghz та 8-ми ядерний процесор Cortex™-A7
- Mali-T628 MP6(підтримка OpenGL ES 3.0/2.0/1.1 и OpenCL 1.1 повний профіль)
- 2ГБайта LPDDR3 RAM PoP
- Флеш накопичувач eMMC5.0 HS400
- 2 x USB 3.0 Host, 1 x USB 2.0 Host
- Гігабітний Ethernet порт
- Інтерфейс HDMI 1.4a
- Розмір: 82 x 58 x 22 мм (включаючи кулер)

GSD – ground sample distance має точність розпізнавання об'єктів на висоті 500 метрів 21.6 сантиметрів/піксель - Бортове живлення для модуля системи візуальної навігації (обчислювача та камери) 5V 4A - Інтерфейси інтеграції з автопілотом – UART, SPI, I2C, Ethernet, USB.

## РОЗДІЛ 2

### АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ВІЗУАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЇ

#### 2.1. Фізичні основи системи візуальної навігації

Є відео запис польоту з камери БПЛА встановленої на гіростабілізований підвіс і потік кадрів, що представляє, у вигляді послідовностей двовимірних матриць пікселів. Політ проводився на квадрокоптері DJI Phantom 3 pro тривалістю 15 хвилин та роздільною здатністю камери 4К.

Камера була встановлена на гіростабілізоване підвіс і дивилася строго вниз. Відеозйомка попередньо нарізана на кадри і зберігається у вигляді фотографій формату jpeg з перекриттям мінімум 60% між кадрами.

Для оптимального вибору алгоритмічного забезпечення модуля візуальної навігації та оцінки точності системи необхідно: - нормалізувати кожне вхідне зображення шляхом зменшення розміру вхідного кадру з 4096x2160 до 520x380 пікселів у зв'язку з обмеженою потужністю бортового мікрокомп'ютера; - перевести кожен вхідний кадр у чорно-білий формат (grayscale) для мінімізації обчислювальних ресурсів; - вибрати оптимальний алгоритм визначення унікальних локальних орієнтирів (детектор), у співвідношенні споживаних ресурсів процесора і точності детектування одних і тих же локальних особливостей, що забезпечується, на парі зображень, поточного і попереднього кадрів.

- Вибрати оптимальний алгоритм опису унікальних локальних особливостей на зображеннях (дескриптор) для подальшого їх порівняння, дескриптор повинен бути:

- Специфічним (у різних точок на зображенні повинні бути максимально різні дескриптори);

- локальним (опис точки має залежати невеликий її околиці, а чи не всього зображення);

- інваріантним до спотворень зображення (необхідно забезпечити пошук точок або локальних наземних орієнтирів в одній області зображення незалежно від його спотворень) на наступному кадрі;

- швидко зважати на бортовому мікрокомп'ютері;
- вибрати оптимальний метод зіставлення пар кандидатів локальних особливостей між двома зображеннями із взаємним перекриттям понад 60%; - Вибрати оптимальний метод фільтрації помилкових пар кандидатів (викидів) локальних особливостей зображення;
- Обчислити підсумкове піксельне зсув від попереднього кадру до поточного і визначити нові координати БПЛА попередньо знаючи розмір пікселя на місцевості в метрах.
- ітеративним шляхом повторити всю процедуру для всіх відео кадрів польоту тривалістю 15 хвилин (знаходження в зоні активних радіо перешкод) і оцінити підсумкову точність візуальної навігації знаючи справжні показання лог файлу GPS системи БПЛА.
- Оцінити збільшення обчислювального навантаження для розміру зображень 520x380, 720x576, 800x600. Також слід додати допоміжні методи та підпрограми для підвищення точності та мінімізації помилок системи візуальної навігації.

Для цього пропонується використовувати комбінацію алгоритмів комп'ютерного зору бібліотеки OpenCV та нейронну мережу архітектури ResNet101.

2.2 Аналіз ефективності алгоритмів комп'ютерного зору для пошуку, опису та зіставлення наземних орієнтирів, а також підвищення точності системи візуальної навігації

Широкого застосування набрали такі алгоритми комп'ютерного зору для пошуку, опису та зіставлення локальних особливостей (крапок) на зображенні: - SIFT (Scale Invariant Feature Transform), його плюсами є - особливі точки локальні та стійкі до оклюзії та шуму, локальні точки унікальні і можуть бути зіставлені з великою базою даних об'єктів, можуть бути створені навіть для маленьких об'єктів на зображенні, може виконуватися в реальному часі, недоліком є патентне право на його використання у комерційних розробках та великі витрати обчислювальної потужності процесора;

- SURF (Speed Up Robust Features), його плюсами є інваріантність до масштабу порівнюваних зображень, інваріантність до зміни яскравості, повороту і куту огляду, проте метод мало ефективний за відсутності яскраво виражених текстур і складних об'єктів, має патент на використання в комерційних розробках, значне споживання обчислювальних ресурсів;

- ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF), має найкращу швидкість обчислень особливих точок на зображенні, але низьку точність за наявності цифрового шуму та розмиття зображення.

- BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints), визначає та описує максимальну кількість особливих точок на зображенні, проте в них потрапляє цифровий шум, і на фільтрацію пар кандидатів витрачається значний час процесора;

- AKAZE (Accelerated KAZE) має особливу структуру завдяки чому виконує пошук та опис особливих точок на нелінійній багатомасштабній піраміді за декількома параметрами, тоді як у інших алгоритмів один параметр;

- BF (Brute Force Matcher) алгоритм зіставлення пар точок між двома зображеннями за принципом повного перебору, приймає дескриптор особливої точки першого зображення та порівнює з усіма дескрипторами другого зображення з деяким розрахунком відстані та повертає найближче схоже;

- KNN (K-Nearest Neighbor) алгоритм зіставлення пар точок між двома зображеннями за принципом найближчих сусідів, стійкий до аномальних викидів, оскільки ймовірність попадання викиду в  $k$ -найближчих сусідів низька.

### 2.3. Фізичні основи реалізації СВН

Візуальна навігація є визначення координат БПЛА за рахунок пошуку наземних орієнтирів на місцевості шляхом обробки знятих БПЛА зображень та порівняння знайдених на отриманому зображенні орієнтирів з відповідними образами на електронних картах, координати яких відомі, виділенням особливих точок дескрипторів з подальшим аналізом зміщення по даного орієнтиру, що дозволяє розрахувати поточні координати БПЛА.

Система візуальної навігації є перспективним способом вирішення даної проблеми. Розв'язувані завдання

При побудові системи візуальної навігації необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробити математичне забезпечення підсистеми обробки зображень із метою пошуку виявлення візуальних орієнтирів. Математичне забезпечення включає вирішення наступних завдань: • передобробка; • сегментація; • визначення точок, що належать межі дескриптора; • контурний аналіз; • кореляційний аналіз; • порівняння кореляційної функції знайденого орієнтира з кореляційними функціями бази даних відповідних орієнтирам наперед визначеними координатами та визначення поточних координат БПЛА.

2. Розробити математичне забезпечення підсистеми навігації з метою визначення поточних координат БПЛА. • пошук особливих точок (Scale invariant feature transform/Speed up robust features); • Визначення відповідності між однаковими особливими точками одного дескриптора на різних зображеннях (RANSAC); • Визначення поточних координат БПЛА.

Оптимальний вибір комплексу технічних засобів: - Камера; - бортовий обчислювач; - керований гіро підвіс; - літій – полімерний акумулятор для автономного живлення системи; контролер управління гіро підвісом.

#### 2.4. Алгоритми пошуку особливих точок

##### 2.4.1 Постановка задачі

Дано матрицю пікселів зображення  $N * M$ , необхідно, використовуючи підходи комп'ютерного зору, знайти особливі точки на даному зображенні.

- На зображеннях виділяються спеціальні точки та їх дескриптори.
- За збігом дескрипторів виділяються особливі точки.
- На основі набору особливих точок, що збіглися, будується модель перетворення зображень, за допомогою якого з одного зображення можна отримати інше.

Особливою буде називатися така точка зображеного об'єкта, яка з великою ймовірністю буде знайдена на іншому зображенні цього ж об'єкта. Детектором називатимемо метод вилучення особливих точок із зображення. Детектор

повинен забезпечувати інваріантність знаходження одних і тих самих особливих точок щодо перетворень зображень.

Методи зіставлення спеціальних точок на зображеннях.

Дескриптор - ідентифікатор особливої точки, що виділяє її з решти особливих точок.

У свою чергу, дескриптори повинні забезпечувати інваріантність знаходження відповідності між особливими точками щодо перетворення зображень.

2.4.2. Класифікація методів пошуку особливих точок та їх порівняльний аналіз Методи виділення особливих точок на зображенні (детектори, дескриптори)

- SIFT
- SURF
- ORB
- MSER
- AKAZE

У цій роботі розглядаються найефективніші методи пошуку спеціальних точок: SURF & SIFT

У алгоритмі SIFT є такі недоліки - не всі отримані спеціальні точки та їх дескриптори будуть визначатися на наступних знімках, що позначатиметься на подальшому вирішенні завдання зіставлення зображень.

- алгоритм не працює у таких випадках: умови освітлення різні (наприклад, день/ніч), об'єкт має поверхню, що відображає (як правило, автомобілі, дзеркала), яскраво виражену 3-D структуру, собі подібні структури (в результаті, виникають «справжні» невідповідності), кут огляду камери для різних знімків сильно відрізняється.

В алгоритмі SURF є такі недоліки:

- при обробці зображення не виділяється об'єкт з фону (особливості можуть бути як усередині об'єкта, так і на фоні, на точках межі об'єкта та фону); - Алгоритм погано працює:



для об'єктів простої форми і без яскраво вираженої текстури (всередині таких об'єктів, метод швидше за все не знайде особливих точок, точки будуть знайдені або на межі об'єкта з тлом, або тільки на тлі).

Алгоритм MSER має такі недоліки: - не повною мірою інваріантний до масштабу (нормалізація масштабу відбувається в залежності від розміру виділених областей).

- використання функції розрідженості, що вимагає контрастних областей на зображенні.

Алгоритм методу SURF (Speed Up Robust Features) має вигляд:

- 1) Сформувані цифрову модель зображення як матриці пікселів.
- 2) Перевести матрицю в інтегральне представлення зображення для більш швидкого обчислення.

- 3) Визначити елементи матриці Гессе, які обчислюються як згортка (сума творів).

- 4) Обчислення Гессіана пікселя при зміні масштабу фільтра.

- 5) Знаходження локального максимуму Гессіана.

- 6) Знаходження орієнтації особливої точки.

- 7) Обчислення дескриптора особливої точки. Розглянемо кожен крок цього алгоритму окремо.

- 1) Цифрова модель зображення має вигляд матриці, в якій положення кожного елемента визначається розміщенням відповідного пікселя на зображенні, а значення кожного елемента визначається яскравістю даного пікселя (0-255).

Перевести матрицю в інтегральне представлення зображення для більш швидкого обчислення.

Інтегральне уявлення зображення - це матриця, розмірність якої збігається з розмірністю вихідного зображення.

Елементи цієї матриці розраховуються за такою формулою: де  $I(i, j)$  – яскравість пікселя вихідного зображення. Кожен елемент інтегрального

зображення  $\Pi[x, y]$  містить у собі суму пікселів зображення прямокутнику від  $(0,0)$  до  $(x, y)$ .

$$\Pi(x, y) = \sum_{\substack{i \leq x, j \leq y \\ i=0, j=0}} I(i, j)$$

Розрахунок інтегрального зображення займає лінійний час, пропорційний числу пікселів вихідного зображення.

Розрахунок інтегрального зображення  $\Pi$  можна проводити за рекурентною формулою

$$\Pi(x, y) = I(x, y) - \Pi(x-1, y-1) + \Pi(x, y-1) + \Pi(x-1, y)$$

Однією з найкорисніших особливостей інтегрального уявлення є можливість дуже швидко обчислити суму пікселів довільного прямокутника (або будь-якої іншої фігури, яку можна апроксимувати кількома прямокутниками).

Наприклад, прямокутник ABCD, що цікавить нас: Суму всередині прямокутника можна виразити через суми та різниці суміжних прямокутників за формулою:

$$\text{SumOfRect}(ABCD) = \Pi(A) + \Pi(C) - \Pi(B) - \Pi(D)$$

Інтегральне зображення використовується для швидкого обчислення яскравості заданих ділянок зображення (у вейвлет-перетвореннях, фільтрах Хаара, розрахунку дескрипторів (SURF))

3) Визначити елементи матриці Гессе які обчислюються як згортка (сума творів)

$$H(f(x, y)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{bmatrix}$$
$$\det(H) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2$$

Елементи матриці Гессе обчислюються як пакунок пікселів зображення та ядра фільтра. Значення Гессіана (визначника матриці Гессе) використовуються

для знаходження локальних максимумів яскравості зображення, які відповідають особливим точкам.

Гесіан функції - симетрична квадратична форма, що описує поведінку функції в другому порядку

Найбільш ефективним підходом знаходження особливих точок зображення є використання для знаходження локальних максимумів бінаризованої апроксимації матриці фільтра (FAST-HESSIAN) На малюнку зображені фільтри, які використовуються для знаходження матриці Гессе в SURF. Білі області відповідають значенню +1, чорні -2 (на третьому фільтрі -1), сірі – нульові. Просторовий масштаб – 9×9 пікселів. Цей фільтр стійкіший до обертання, і його можна ефективно обчислити за допомогою інтегральної матриці. У SURF, гесіан обчислюється за такою формулою:

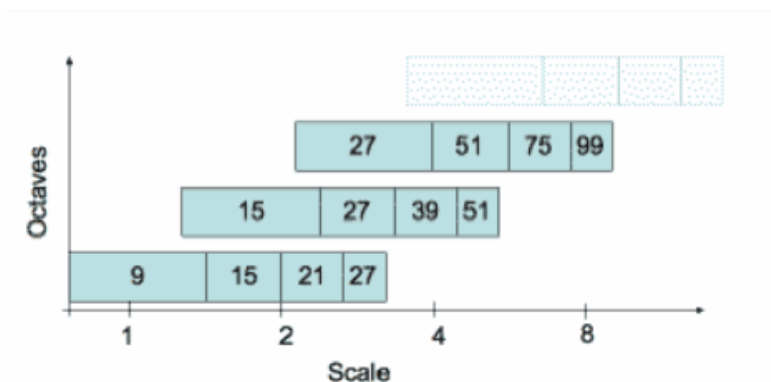
$$\det(H_{approx}) = D_{xx}D_{yy} - (0.9D_{xy})^2$$

Де  $D_{xx}$ ,  $D_{yy}$ ,  $D_{xy}$  – пакунки за фільтрами, зображеними на малюнку вгорі. Коефіцієнт 0.9 має теоретичне обґрунтування та коригує наближений характер обчислень. SURF пробігається пікселями зображення і шукає максимум Гессіана. Спосіб знаходження локального максимуму Гессіана розглянемо далі. У методі задається граничне значення Гессіана.

Якщо обчислене значення для пікселя вище за поріг – піксел розглядається як кандидат на ключову точку. Значення Гессіана залежить тільки від перепаду яскравості, а не від абсолютного її рівня, тому він інваріантний по відношенню до зсуву яскравості зображення. Таким чином, зміна рівня висвітлення зразка не впливає на виявлення ключових точок. 4) Обчислення Гессіана пікселя при зміні масштабу фільтра. Гесіан не інваріантний щодо масштабу (масштаб пікселя зображення змінюється в залежності від висоти польоту, що потребує зміни масштабу фільтра).

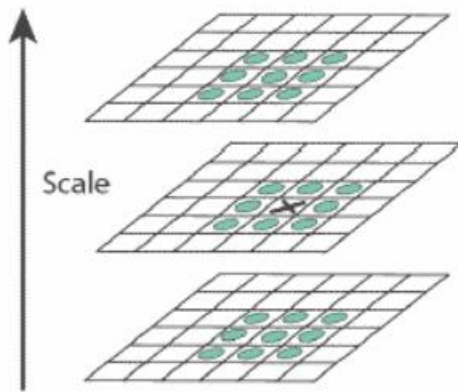
Це означає, що для одного і того ж пікселя, гесіан може змінюватись при зміні масштабу фільтра. Вирішення цієї проблеми – перебирати різні масштаби фільтрів та по черзі їх застосовувати до цього пікселя. Розмір фільтра Fast-Hessian не може набувати довільних значень. Допустимі розміри даного фільтра такі

(починаючи з мінімального): 9, 15, 21, 27 і так далі, з кроком 6. На практиці, поступово збільшувати розмір фільтра на 6 - не вигідно, тому що для великих масштабів крок 6 виявляється занадто дрібним, а фільтри - надмірними. Тому (і з деяких інших причин), SURF розбиває безліч масштабів на так звані октави. Кожна октава покриває певний інтервал масштабів і має характерний розмір фільтра. Якщо ми шукатимемо максимум серед усіх гесіанів, за всіма масштабами, то ми б знайшли лише один із максимумів, тоді як їх може бути кілька. Один – в одному масштабі, інший – в іншому. Виходячи з перерахованого, октава містить не один фільтр, а чотири фільтри, які добре покривають характерний масштаб октави:



Цифри у прямокутниках показують розмір фільтра Fast-Hessian. Логарифмічна шкала знизу показує масштаби, що покриваються октавами. Крок розміру фільтра у першій октаві – становить 6, у другій – 12, у третій – 24 тощо.

5) Знаходження локального максимуму Гессіана. Властивості Гессіана такі, що він досягає максимуму, як у точці білої плями на чорному тлі, так і чорної плями на білому тлі. Таким чином, метод виявляє і темні та світлі особливості зображення. Для знаходження локального максимуму Гессіана використовується так званий метод сусідніх точок 3x3x3 див. рисунок.



Піксел, позначений хрестиком, вважається локальним максимумом, якщо його гесіан більше ніж у будь-якого його сусіда в його масштабі, а також більше будь-якого з сусідів масштабом менше і масштабом більше (усього 26 сусідів). Виходячи з такого визначення локального максимуму, зрозуміло, що октава повинна містити не менше трьох фільтрів, інакше ми не зможемо визначити факт знаходження локального максимуму гесіана всередині октави.

Зазначимо ще такий момент. Фільтри октави вважаються не всім пікселів поспіль. Перша октава вважається для кожного другого пікселя зображення. Друга – для кожного четвертого, третя – для кожного восьмого тощо. Сенс зрозумілий - дві точки з відстанню 2 не можуть містити більше одного максимуму масштабу 2, 3 або вищих масштабів. Тому немає сенсу перебирати всі точки зображення, знаходження максимуму масштабу 3, наприклад. Подвоєння кроку пікселів для октав дозволяє заощаджувати під час розрахунку фільтрів.

Як ви вже помітили, розміри фільтрів в октавах повторюються. Так, наприклад, фільтр розміром 27 є у трьох октавах. Так ось, при обчисленнях цей фільтр буде вважатися тільки для першої октави. Друга та третя – просто використовують розрахунки першої октави. А подвоєння кроку пікселів гарантує, що крапки в яких треба вважати гесіан, вже були прораховані попередньою октавою. Тому, незважаючи на те, що октава містить чотири фільтри, насправді кожна октава (крім першої) вважає лише два характерні для неї розміри, два інші – завжди можна взяти з попередніх октав. Перша ж октава змушена вважати всі чотири своїх фільтри.

Отже, після знаходження максимального гесіана методом сусідніх точок 3x3x3, ми знайшли піксел, в якому цей максимум досягається. Однак, оскільки

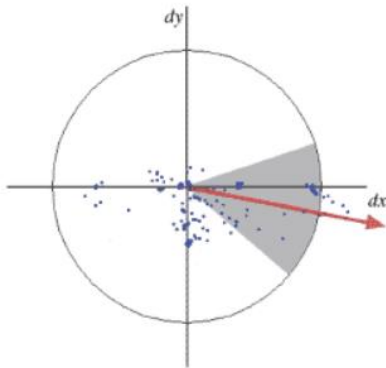
октава перебирає не всі точки зображення, то справжній максимум може не збігатися зі знайденим пікселем, а лежати десь поруч у сусідніх пікселях. Для знаходження точки істинного максимуму використовується інтерполювання знайдених гесіанів куба  $3 \times 3 \times 3$  квадратичною функцією. Далі обчислюється похідна (методом кінцевих різниць сусідніх точок). Якщо вона близька до нуля – ми у точці справжнього максимуму. Якщо похідна велика – зрушуємося у бік її зменшення, і повторюємо ітерацію, допоки похідна стане менше заданого порога.

Якщо у процесі ітерацій ми відходимо від початкової точки занадто далеко, це вважається хибним максимумом, і точка більше вважається особливою. б) Знаходження орієнтації особливої точки. Для інваріантності обчислення дескрипторів особливої точки, які будуть розглянуті нижче, потрібно визначити переважну орієнтацію перепадів яскравості в особливій точці. Це поняття близьке до градієнта, але SURF використовує трохи інший алгоритм знаходження вектора орієнтації. Спочатку обчислюються точкові градієнти в пікселях, сусідніх з особливою точкою. Для розгляду беруться пікселі в колі радіусу  $6s$  навколо особливої точки. Де  $s$  – масштаб особливої точки. Для першої октави беруться крапки з околиці радіусом 12. Для обчислення градієнта використовується фільтр Хаара. Розмір фільтра береться рівним  $4s$  де  $s$  - масштаб особливої точки. Вигляд фільтрів Хаара показаний на зображенні:

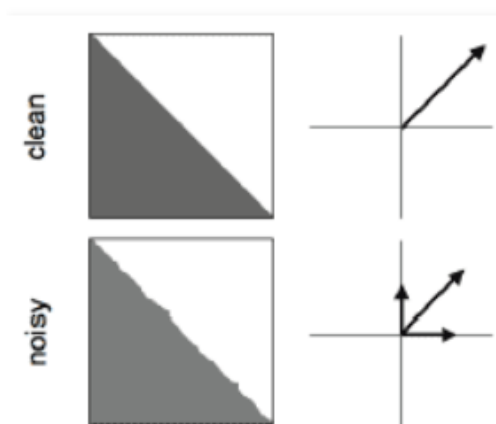


Фільтри Хаара. Чорні області мають значення  $-1$ , білі  $+1$ . Фільтри Хаара дають точкове значення перепаду яскравості осі  $X$  і  $Y$  відповідно. Оскільки фільтри Хаара мають прямокутну форму, їх значення легко рахуються за допомогою інтегральної матриці. Для розрахунку одного фільтра довільного розміру потрібно лише 6 операцій. Значення вейвлету Хаара  $dX$  та  $dY$  для кожної точки множаться на вагу та запам'ятовуються у масиві. Вага визначається як значення гауссіани з центром в особливій точці та сигмою рівною  $2s$ . Зважування на гауссіані необхідне відсікання випадкових перешкод на далеких від особливої

точки відстанях. Знайдені значення  $dX$  і  $dY$  умовно наносяться у вигляді точок на площину, як показано на малюнку:

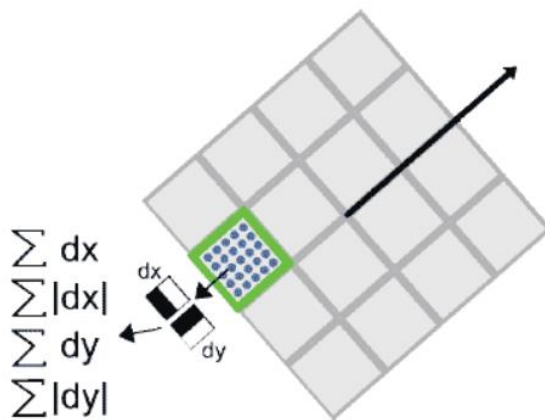


На малюнку показані всі знайдені градієнти у вигляді точок просторі  $dXdY$ . Далі, береться кутове вікно (показано сірим малюнку) розміром  $\pi/3$ , і обертається навколо центру координат. Вибирається таке положення вікна, при якому довжина сумарного вектора для точок, що потрапили у вікно, – максимальна. Обчислений таким чином вектор нормується і приймається як пріоритетний напрямок області особливої точки. Маніпуляції з вікном потрібні зменшення впливу шумових точок. Нижче на малюнку наведено приклад градієнта при ідеальному краї і при краї з шумом:



Шум дає додаткові градієнти у напрямках, що не збігаються з напрямком основного градієнта. Використання вікна дозволяє відсікти такі шумові точки, і точніше обчислити справжній градієнт. Зазначимо, що не завжди потрібна інваріантність дескрипторів щодо обертання. Метод SURF має модифікацію, у якій орієнтація спеціальних точок не обчислюється. Така модифікація дозволяє надійно ідентифікувати точки, повернуті лише на  $\pm 15$  градусів. 7) Обчислення дескриптора особливої точки.

Дескриптор є масивом з 64 (у розширеній версії 128) чисел, що дозволяють ідентифікувати особливу точку. Дескриптори однієї і тієї ж особливої точки на зразку та на сцені мають приблизно збігатися. Метод розрахунку дескриптора такий, що він залежить від обертання і масштабу. Для обчислення дескриптора навколо особливої точки формується прямокутна область, що має розмір  $20s$ , де  $s$  - масштаб в якому була знайдена особлива точка. Для першої октави область має розмір  $40 \times 40$  пікселів. Квадрат орієнтується вздовж пріоритетного напрямку, обчисленого особливої точки. Дескриптор вважається як опис градієнта для 16 квадрантів навколо особливої точки

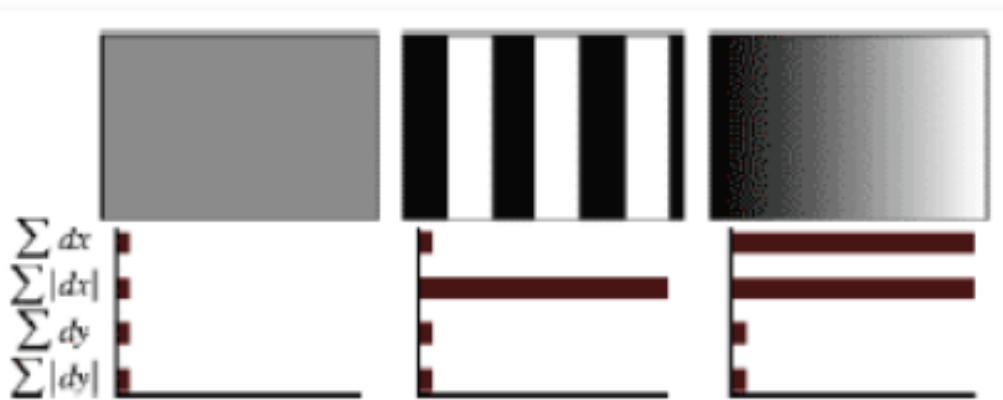


Далі квадрат розбивається на 16 дрібніших квадрантів, як показано на малюнку. У кожному квадранті береться регулярна сітка  $5 \times 5$  і для точки сітки шукається градієнт за допомогою фільтра Хаара. Розмір фільтра Хаара береться рівним  $2s$ , і першої октави становить  $4 \times 4$ . Слід зазначити, що з розрахунку фільтра Хаара, зображення не повертається, фільтр у звичайних координатах зображення. А ось отримані координати градієнта ( $dX$ ,  $dY$ ) повертаються на кут, що відповідає орієнтації квадрата. Для обчислення дескриптора особливої точки потрібно обчислити 25 фільтрів Хаара, в кожному з 16 квадрантів. Разом, 400 фільтрів Хаара. Враховуючи, що на фільтр потрібно 6 операцій, виходить, що дескриптор обійдеться щонайменше 2400 операцій. Після знаходження 25 точкових градієнта квадранту обчислюються чотири величини, які власне і є компонентами дескриптора:

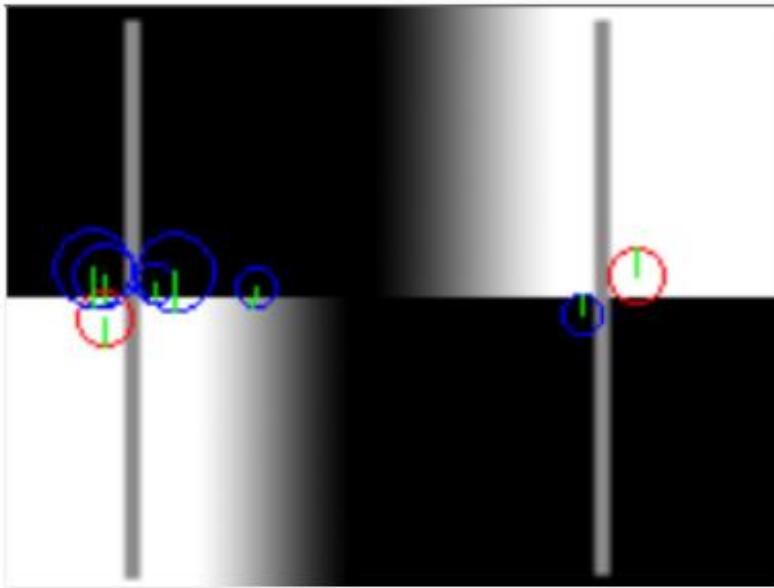
$$\sum dX, \sum |dX|, \sum dY, \sum |dY|$$



Дві з них просто сумарний градієнт по квадранту, а дві інших – сума модулів точкових градієнтів. На малюнку показано поведінку цих величин для різних ділянок зображень.



Малюнок показує поведінку дескриптора різних зображень. Для рівномірних областей всі значення близькі до нуля. Для вертикальних смужок, що повторюються, - всі величини, крім другої близькі до нуля. При збільшенні яскравості у бік осі X, дві перші компоненти мають великі значення. Чотири компоненти на кожен квадрант, і 16 квадрантів, дають 64 компоненти дескриптора для всієї області особливої точки. При занесенні в масив значення дескрипторів зважуються на Гауссіану, з центром в особливій точці і з сигмою 3.3s. Це потрібно для більшої стійкості дескриптора до шумів у віддалених від особливої точки областях. Плюс до дескриптора для опису точки використовується знак сліду матриці Гессе, тобто величина  $\text{sign}(D_{xx}+D_{yy})$ . Для світлих точок на темному тлі слід від'ємний, для темних точок на світлому тлі – позитивний. Таким чином, SURF розрізняє світлі та темні плями.



На зображенні показані особливі точки зображення. Зелена лінія показує характерний напрямок особливої точки. Синій колір кола показує позитивний слід матриці Гессе, червоний негативний слід. Детальний розгляд алгоритму SURF дозволяє визначити параметри його налаштування

Алгоритм методу SIFT

1. Сформуувати цифрову модель зображення як матриці пікселів.
2. Побудова піраміди Гауссіанів та різниць Гауссіанів (Difference Of Gaussian DOG) для пошуку спеціальних точок.
3. Перевірка придатності точки екстремуму на роль ключової.
4. Знаходження орієнтації особливої точки.
5. Побудова дескриптора особливої точки.

1. Побудова піраміди Гауссіанів та різниць Гауссіанів (Difference Of Gaussian DOG) для пошуку спеціальних точок. Гауссіаном (або зображенням, розмитим фільтром гауса) є зображення виду:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y)$$

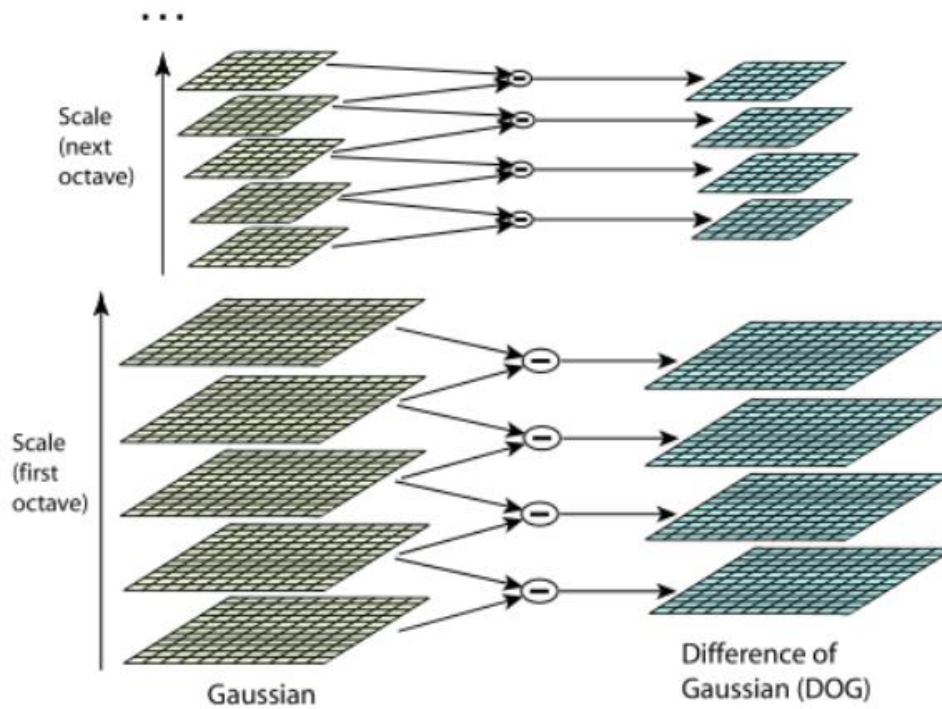
Тут L - значення Гауссіана в точці з координатами (x, y), а sigma - радіус розмиття. G - гаусове ядро, I - значення вихідного зображення, \* - Операція згортки.

Різницею Гауссіанів називають зображення, отримане шляхом попіксельного віднімання одного гаусіана вихідного зображення з Гауссіана з іншим радіусом розмиття.

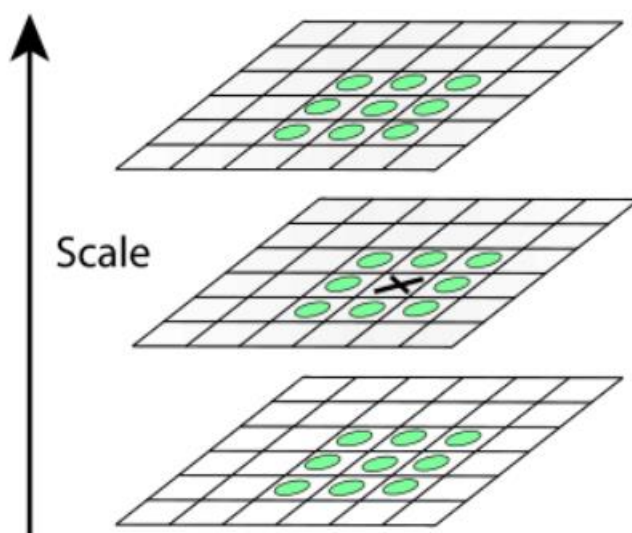
$$\begin{aligned} D(x, y, \sigma) &= (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) \\ &= L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma). \end{aligned}$$

У двох словах скажемо про масштабовані простори. Масштабується простір зображення є набір всіляких, згладжених деяким фільтром, версій вихідного зображення. Доведено, що гауссово масштабований простір є лінійним, інваріантним щодо зрушень, обертань, масштабу, що не зміщує локальні екстремуми, і має властивість напівгруп. Для нас важливо, що різний ступінь розмиття зображення фільтром гауса може бути прийнята за вихідне зображення, взяте в деякому масштабі. Загалом інваріантність щодо масштабу досягається за рахунок знаходження ключових точок для вихідного зображення, взятого в різних масштабах.

Для цього будується піраміда гауссіанів: весь простір, що масштабується, розбивається на деякі ділянки — октави, причому частина масштабованого простору, який займає наступна октава, вдвічі більша за частину, яку займає попередня. До того ж, при переході від однієї октави до іншої робиться ресемплінг зображення, його розміри зменшуються вдвічі. Природно, що кожна октава охоплює безліч гауссіанів зображення, тому будується лише деяка їх кількість  $N$ , з певним кроком по радіусу розмиття. З тим самим кроком добудовуються два додаткові гауссіани (всього виходить  $N+2$ ), що виходять за межі октави. Далі буде видно, навіщо це потрібне. Масштаб першого зображення наступної октави дорівнює масштабу зображення попередньої октави з номером  $N$ . Паралельно з побудовою піраміди гауссіанів, будується піраміда різниць гауссіанів, що складається з різниці сусідніх зображень у піраміді гауссіанів. Відповідно, кількість зображень у цій піраміді буде  $N+1$ .



На малюнку ліворуч зображено піраміду гауссіанів, а праворуч — їх різниці. Схематично показано, що кожна різниця виходить з двох сусідніх гауссіанів, кількість різниць на одиницю менша від кількості гауссіанів, при переході до наступної октави розмір зображень зменшується вдвічі. Після побудови пірамід справа залишається за малим. Вважатимемо точку особливою, якщо вона є локальним екстремумом різниці гауссіанів. Для пошуку екстремумів будемо використовувати метод, схематично



Якщо значення різниці гауссіанів у точці, позначеній хрестиком, більше (менше) всіх значень у точках, помічених кружляшками, то ця точка вважається точкою екстремуму

У кожному зображенні з піраміди DoG шукаються точки локального екстремуму. Кожна точка поточного зображення DoG порівнюється з її вісьмома сусідами та з дев'ятьма сусідами в DoG, що знаходяться на рівень вище та нижче в піраміді. Якщо ця точка більша (менша) за всіх сусідів, то вона приймається за точку локального екстремуму.

Думаю, тепер має бути зрозуміло, навіщо нам знадобилися «зайві» зображення в октаві. Для того, щоб перевірити наявність точок екстремуму N'е зображення в DoG піраміді, потрібно мати N+1'е. А щоб отримати N+1'е в DoG піраміді, треба мати N+1'е і N+2'е зображення в піраміді гауссіанів. Дотримуючись тієї ж логіки, можна сказати, що потрібно будувати 0'е зображення (для перевірки 1'го) в піраміді DoG і ще два в піраміді гауссіанів. Але згадавши, що 1'е зображення в поточній октаві має той самий масштаб, що і N'е у попередній (яке вже має бути перевірено). 2) Перевірка придатності точки екстремуму на роль ключової. По-перше, визначаються координати особливої точки із субпіксельною точністю. Це досягається за допомогою апроксимування функції DoG багаточленом Тейлора другого порядку, взятого в точці обчисленого екстремуму.

$$D(\mathbf{x}) = D + \frac{\partial D}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{x} + \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \frac{\partial^2 D}{\partial \mathbf{x}^2} \mathbf{x}$$

Тут D – функція DoG, X = (x, y, sigma) – вектор зміщення щодо точки розкладання, перша похідна DoG – градієнт, друга похідна DoG – матриця Гессе. Екстремум багаточлена Тейлора знаходиться шляхом обчислення похідної та прирівнювання її до нуля. У результаті отримаємо зміщення точки обчисленого екстремуму, щодо точного

$$\hat{\mathbf{x}} = -\frac{\partial^2 D}{\partial \mathbf{x}^2}^{-1} \frac{\partial D}{\partial \mathbf{x}}$$

Усі похідні обчислюються за формулами кінцевих різниць. У результаті отримуємо СЛАУ розмірності 3x3 щодо компонент вектора X^hat. Якщо одна з компонентів вектора X^hat більше 0.5\*крок\_сітки\_в\_цьому\_напрямі, то це означає,

що насправді точка екстремуму була обчислена невірно і потрібно зрушити до сусідньої точки в напрямку зазначених компонент. Для сусідньої точки все повторюється наново. Якщо таким чином ми вийшли за межі октави, слід виключити дану точку з розгляду. Коли положення точки екстремуму обчислено, перевіряється на трохи саме значення DoG у цій точці за формулою

$$D(\hat{\mathbf{x}}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial \mathbf{x}} \hat{\mathbf{x}}$$

Якщо ця перевірка не проходить, то точка виключається як точка з малим контрастом. Зрештою, остання перевірка. Якщо особлива точка лежить на межі якогось об'єкта або погано освітлена, то таку точку можна виключити з розгляду. Ці точки мають великий вигин (одна з компонентів другої похідної) вздовж кордону і малий у перпендикулярному напрямку. Цей великий вигин визначається матрицею Гесс  $\mathbf{H}$ . Для перевірки підійде  $\mathbf{H}$  розміру  $2 \times 2$ .

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix}$$

Нехай  $\text{Tr}(\mathbf{H})$  – слід матриці, а  $\text{Det}(\mathbf{H})$  – її визначник.

$$\text{Tr}(\mathbf{H}) = D_{xx} + D_{yy} = \alpha + \beta,$$

$$\text{Det}(\mathbf{H}) = D_{xx}D_{yy} - (D_{xy})^2 = \alpha\beta.$$

Нехай  $r$  - відношення більшого вигину до меншого,

$$\alpha = r\beta$$

Тоді

$$\frac{\text{Tr}(\mathbf{H})^2}{\text{Det}(\mathbf{H})} = \frac{(\alpha + \beta)^2}{\alpha\beta} = \frac{(r\beta + \beta)^2}{r\beta^2} = \frac{(r + 1)^2}{r}$$

і точка розглядається далі, якщо

$$\frac{\text{Tr}(\mathbf{H})^2}{\text{Det}(\mathbf{H})} < \frac{(r + 1)^2}{r}$$

3) Знаходження орієнтації особливої точки. Після того, як ми переконалися, що якась точка є ключовою, необхідно обчислити її орієнтацію. Як буде видно далі, точка може мати декілька напрямків. Напрямок ключової точки обчислюється виходячи з напрямків градієнтів точок, сусідніх з особливою. Всі обчислення градієнтів виробляються на зображенні в піраміді гауссіанів, з найбільш близьким масштабом до масштабу ключової точки. Для довідки: величина та напрямок градієнта у точці  $(x, y)$  обчислюються за формулами

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x + 1, y) - L(x - 1, y))^2 + (L(x, y + 1) - L(x, y - 1))^2}$$

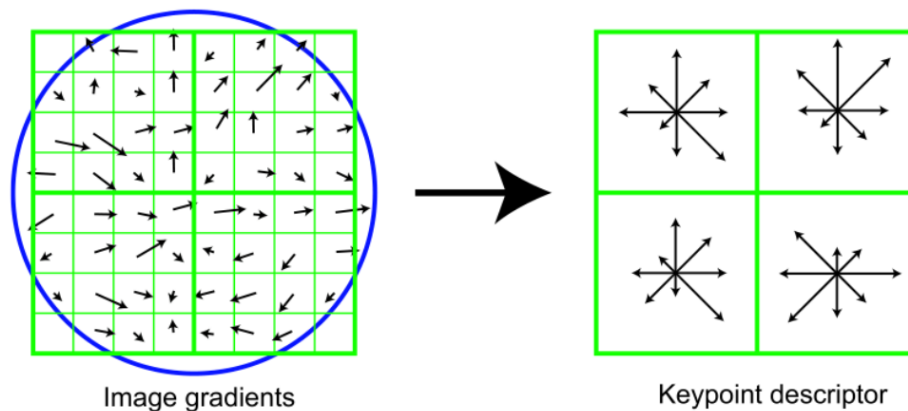
$$\theta(x, y) = \tan^{-1}((L(x, y + 1) - L(x, y - 1)) / (L(x + 1, y) - L(x - 1, y)))$$

$m$  - величина градієнта,  $\theta$  - його напрямок

Для початку визначимо вікно (околиця) ключової точки, в якому будуть розглянуті градієнти. По суті, це буде вікно, необхідне для згортки з ядром гауса, причому воно буде круглим і радіус розмиття для цього ядра ( $\sigma$ ) дорівнює  $1.5 * \text{масштаб\_особой\_точки}$ . Для гаусового ядра діє так зване правило "трьох сигм". Воно полягає в тому, що значення ядра гауса дуже близько до нуля на відстані, що перевищує  $3 * \sigma$ . Таким чином, радіус вікна визначається як  $[3 * \sigma]$ . Напрямок ключової точки знайдемо з гістограми напрямків  $O$ . Гістограма складається з 36 компонент, які рівномірно покривають проміжок у 360 градусів, і формується вона наступним чином: кожна точка вікна  $(x, y)$  робить внесок, рівний  $m * G(x, y, \sigma)$ , ту компоненту гістограми, яка покриває проміжок, що містить напрям градієнта  $\theta(x, y)$ . Напрямок ключової точки лежить у проміжку, який покривається максимальною компонентою гістограми. Значення максимальної компоненти ( $\max$ ) і двох сусідніх з нею інтерполуються параболою, і точка максимуму цієї параболи береться як напрям ключової точки. Якщо гістограмі є ще компоненти з величинами щонайменше  $0.8 * \max$ , всі вони аналогічно інтерполируються і додаткові напрями приписуються ключовій точці.

4) Побудова дескрипторів особливої точки. Тепер перейдемо безпосередньо до дескрипторів.

Дане раніше визначення свідчить, що має робити дескриптор, але з тому, що це таке. В принципі, дескриптором може виступати будь-який об'єкт (аби він справлявся зі своїми функціями), але зазвичай дескриптором є певна інформація про околицю ключової точки. Такий вибір зроблено через кілька причин: на маленькі області менший вплив надають ефекти спотворень, деякі зміни (зміна становища об'єкта на картинці, зміна сцени, перекриття одного об'єкта іншим, поворот) можуть вплинути на дескриптор зовсім. У методі SIFT дескриптор є вектор. Як і напрямок ключової точки, дескриптор обчислюється на гауссіані, найближчому масштабу до ключової точки, і виходячи з градієнтів в деякому вікні ключової точки. Перед обчисленням дескриптора це вікно повертають на кут напрямку ключової точки, чим досягається інваріантність щодо повороту. Для початку подивимось на малюнок



Тут схематично показана частина зображення (ліворуч) та (праворуч) отриманий на її основі дескриптор. Для початку подивимося ліворуч. Тут можна побачити пікселі, позначені маленькими квадратами. Ці пікселі беруться з квадратного вікна дескриптора, яке у свою чергу поділено ще на чотири рівні частини (далі називатимемо їх регіонами). Маленька стрілочка в центрі кожного пікселя позначає градієнт цього пікселя. Цікаво, що центр цього вікна знаходиться між пікселями. Його треба вибрати якомога ближче до точних координат ключової точки. Остання деталь, яку можна побачити - це коло, що означає вікно згортки з ядром гауса (аналогічно вікну для обчислення напрямку ключової точки). Для цього ядра визначається  $\sigma$ , що дорівнює половині ширини вікна дескриптора. Надалі значення кожної точки вікна дескриптора буде



примножуватися на значення ядра гауса в цій точці, як на ваговий коефіцієнт. Тепер подивимося праворуч. Тут ми можемо бачити схематично зображений дескриптор особливої точки розмірності  $2 \times 2 \times 8$ . Перші дві цифри у значенні розмірності – це кількість регіонів по горизонталі та вертикалі. Ті квадрати, які охоплювали певний регіон пікселів на лівому зображенні, праворуч охоплюють гістограми, побудовані на пікселях цих регіонів.

Відповідно, третя цифра розмірності дескриптора означає кількість компонент гістограми цих регіонів. Гістограми в регіонах обчислюються так само, як і гістограма напрямків із трьома невеликими але: 1. Кожна гістограма так само покриває ділянку 360 градусів, але ділить її на 8 частин 2. Як ваговий коефіцієнт береться значення гаусового ядра, загального для всього дескриптора (про це вже говорилося) 3. Як ще одних вагових коефіцієнтів беруться коефіцієнти трилінійної інтерполяції.

Кожному градієнту у вікні дескриптора можна приписати три речові координати ( $x, y, n$ ), де  $x$  - відстань до градієнта по горизонталі,  $y$  - відстань по вертикалі,  $n$  - відстань до напрямку градієнта в гістограмі (мається на увазі відповідна гістограма дескриптора робить внесок цей градієнт). За точку відліку приймається нижній лівий кут вікна дескриптора і початкове значення гістограми. За одиничні відрізки беруться розміри регіонів по горизонталі та вертикалі для  $x$  та  $y$  відповідно, і кількість градусів у компоненті гістограми для  $n$ . Коефіцієнт три лінійної інтерполяції визначається кожною координатою ( $x, y, n$ ) градієнта як  $1-d$ , де  $d$  дорівнює відстані від координати градієнта до середини того одиничного проміжку в який ця координата потрапила. Кожне входження градієнта в гістограму множиться на всі три вагові коефіцієнти три лінійної інтерполяції.

Дескриптор ключової точки складається із усіх отриманих гістограм. Як було зазначено розмірність дескриптора малюнку 32 компоненти ( $2 \times 2 \times 8$ ), але практично використовуються дескриптори розмірності 128 компонент ( $4 \times 4 \times 8$ ). Отриманий дескриптор нормалізується, після чого всі компоненти, значення яких більше 0.2, урізаються до значення 0.2 і потім дескриптор нормалізується ще раз.

У такому вигляді дескриптори готові до використання. SIFT дескриптори не позбавлені недоліків. Не всі отримані точки та їх дескриптори відповідатимуть вимогам, що висуваються. Природно це позначатиметься на подальше вирішення завдання зіставлення зображень. У деяких випадках рішення може бути не знайдено, навіть якщо воно існує. Наприклад, при пошуку афінних перетворень (або фундаментальної матриці) по двох зображеннях цегляної стіни може бути не знайдено рішення через те, що стіна складається з об'єктів (цегли), що повторюються, які роблять схожими між собою дескриптори різних ключових точок. Незважаючи на цю обставину, ці дескриптори добре працюють у багатьох практично важливих випадках.

## 2.5. Визначення відповідності між однаковими особливими точками одного дескриптора на різних зображеннях (RANSAC)

### 2.5.1. Постановка задачі

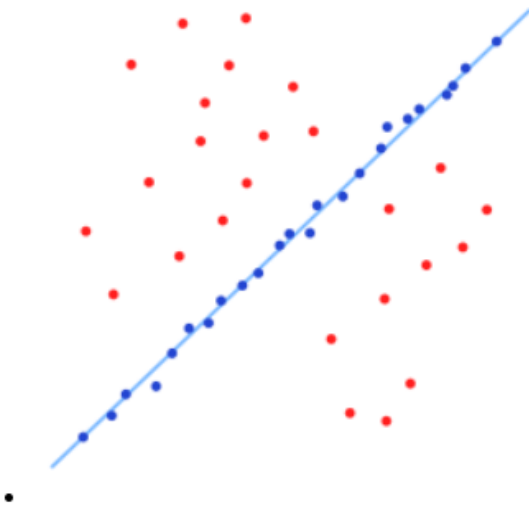
Встановлено безліч особливих точок поточного зображення з координатами  $(X_i(t_k), Y_i(t_k))$ ; та попереднього зображення  $(X_i(t_{k-1}), Y_i(t_{k-1}))$   $i = 1 \dots n$ ;  $k = 1 \dots N$ . Необхідно визначити відповідність між однаковими точками одного дескриптора на різних зображеннях.

### 2.5.2. Алгоритм RANSAC

RANSAC – метод оцінки параметрів моделі на основі випадкових вибірок. Приклад роботи алгоритму: вписування прямої 2Д( $x_i, y_i$ ) точки. Приймаючи той факт, що серед даних є викиди, оцінка параметрів стандартним способом, наприклад методом найменших квадратів, призведе до того, що буде обчислена неправильна модель, так як модель будується на основі всіх точок. Метод RANSAC бере за основу лише дві точки необхідні для побудови прямої та з їхньою допомогою будує модель, після чого перевіряє, скільки точок відповідає моделі, використовуючи функцію оцінки із заданим порогом.



Нижче наведено набір даних, у який треба вписати пряму. викиди присутні у великій кількості.

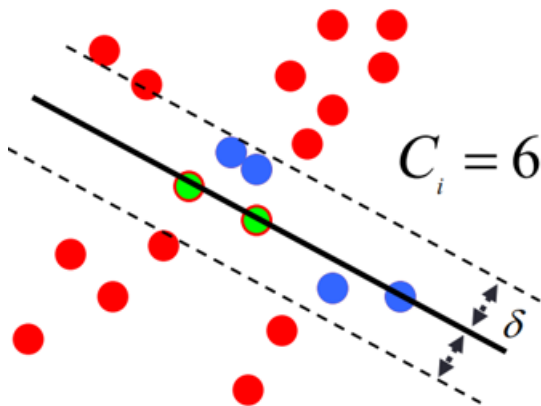


У запропонованій алгоритмом RANSAC прямий викиди не впливають на результат. Опис алгоритму На вхід надходить: 1. Набір вихідних даних. 2. Функція  $M$ , що дозволяє обчислити параметри моделі моделі  $P$  по набору даних з  $n$ -точок. 3. Функція оцінки  $E$  відповідності точок отриманої моделі. 4. Поріг  $t$  функції оцінки. 5. Кількість ітерацій методу  $k$ . Цей алгоритм складається з одного циклу, кожен ітерацію якого можна логічно розділити на два етапи. Перший етап: - вибір точок та підрахунок моделі; - Вибір випадковим чином  $n$  різних точок з безлічі вихідних; - на основі вибраних точок обчислення параметрів моделі моделі  $P$  за допомогою функції  $M$ , побудована модель називається гіпотезою. Другий етап: - для кожної точки перевіряється її відповідність цій гіпотезі за допомогою функції оцінки  $E$  та порога  $t$ . - кожна точка позначається значимою чи викидом ( inlier or outlier). - після перевірки всіх точок, перевіряється, чи є гіпотеза кращою на даний момент, і якщо є, то вона заміняє попередню кращу

гіпотезу. Результатом роботи є: 1) Параметри  $\theta$  моделі Р. 2) Точки вихідних даних позначені значимими чи викидами.

Оцінка вихідних даних

Переваги і недостатки алгоритма RANSAC



Визначення GPS координат БПЛА Для розрахунку координат значущих точок на опорному зображенні в точці зльоту необхідно визначити піксельну відстань від центру знімка, координати якого нам відомі, до відфільтрованих методом RANSAC точок. Піксельна відстань (зміщення) між точками  $A(x_1, y_1)$  і  $B(x_2, y_2)$  на площині визначається за формулою:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Для розрахунку координат значущих точок на опорному зображенні в точці зльоту необхідно визначити піксельну відстань від центру знімка, координати якого нам відомі, до відфільтрованих методом RANSAC точок. Піксельна відстань (зміщення) між точками  $A(x_1, y_1)$  і  $B(x_2, y_2)$  на площині визначається за формулою:.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Визначений за цією формулою тангенс є кутовим коефіцієнтом прямої. Додатково необхідно прикріплювати до кожного знімка курс з компасу зчитаний з автопілота. Визначивши відстань до точок та кут, необхідно перерахувати

координати їх широти та довготи, вважаючи їх точками призначення щодо центральної точки знімка відстань від якої нам відома за такою формулою:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Отримана відстань дорівнює кількості пікселів, яку необхідно помножити на поточний масштаб матриці камери в метрах при відомій висоті і фокусній відстані. Тангенс кута між відрізком та позитивним напрямом осі Oх визначається за формулою (цей кут відраховується від осі Oх проти годинникової стрілки).

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Визначений за цією формулою тангенс є кутовим коефіцієнтом прямої. Додатково необхідно прикріплювати до кожного знімку курс з компасу зчитаний з автопілота. Визначивши відстань до точок та кут, необхідно перерахувати координати їх широти та довготи, вважаючи їх точками призначення щодо центральної точки знімка відстань від якої нам відома за такою формулою:

$$\varphi_2 = \operatorname{asin}(\sin \varphi_1 \cdot \cos \delta + \cos \varphi_1 \cdot \sin \delta \cdot \cos \theta)$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \operatorname{atan2}(\sin \theta \cdot \sin \delta \cdot \cos \varphi_1, \cos \delta - \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2)$$

поточна довгота,  $\varphi_2$  довгота цільової точки місії завантаженої в пам'яті автопілота БПЛА, поточна широта  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  широта цільової точки, R радіус Землі (середній радіус 6,371km); Як точка відліку початку координат приймається центр першого знімка в точці зльоту. Після цього знайдені наземні орієнтири на знімку асоціюватимуться з цією точкою та її GPS координатами. Екстраполюючи отримані координати від знімків, та зчитуючи з пам'яті автопілота записані координати точок авто місії польотного плану, отримуємо координати цільової точки та поточної. Використовуючи формулу habersine вважаємо відстань до цільової точки через дугу великого кола апроксимуючи Землю сферою в метрах. Для деяких автопілотів необхідно також обчислити курс на цільову точку для навігації за формулою:

$$\theta = \text{atan2}(\sin \Delta\lambda \cdot \cos \varphi_2, \cos \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 - \sin \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \cos \Delta\lambda)$$

де,  $\varphi_1$   $\lambda_1$  довгота/широта поточної точки,  $\varphi_2$   $\lambda_2$  широта/довгота точки, що обчислюється (точки призначення) місії завантаженої з пам'яті автопілота БПЛА.



*Baghdad to Osaka -  
not a constant bearing!*

Параметри системи візуальної навігації, що настроюються. Алгоритм SIFT 1. Кількість особливих точок, що шукаються (nFeatures) 2. Кількість шарів октав (nOctavesLayers = 3 за замовчуванням) 3. Поріг яскравості (contrastThreshold = 0.04 за замовчуванням) 4. EdgeThreshold = 10 за замовчуванням 5. Sigma = 1.6 за замовчуванням 6. Коефіцієнт нормалізації дескриптора = 0.2 за замовчуванням Алгоритм SURF 1. Порогове значення Гесіана 2. Кількість октав (nOctaves = 4 за замовчуванням) 3. Кількість шарів октав (nOctavesLayers = 2 за замовчуванням) 4. Розмір масштабу висоти (сигма) 5. Розмір та вид ядра фільтра Алгоритм RANSAC 1. Величина порога влучення особливих точок (сигма).

## РОЗДІЛ 3.

### ІМІТАЦІЙНИЙ СТЕНД ПОЛЬОТУ БПЛА

Система візуальної навігації є важливим навігаційним модулем БПЛА. Для визначення ефективності її роботи, виключення помилок проектування та вибору оптимальних обчислювальних алгоритмів потрібне проведення численних лабораторних випробувань, що не залежать від погодних умов та тривалих підготовок до польотів. Метою роботи є розробка імітаційного стенду польоту БПЛА щодо тестів системи візуальної навігації. У роботі наведено основні конструктивні рішення для апаратної та електронної частин стенду.

Для розробки системи візуальної навігації та для налаштування роботи алгоритмів та їх параметрів необхідна велика кількість випробувань (польотів). Для вирішення цієї задачі був запропонований та розроблений лабораторний імітаційний стенд польоту БПЛА.

Переваги імітаційного стенду:

- непотрібна перед польотна підготовка та виїзд,
- незалежність від погодних умов,
- еталонні параметри пройденого шляху імітації авто місії на стенді для порівняння та підстройки результатів обчислень алгоритмів системи візуальної навігації.
- тонке налаштування та порівняння похибок обчислень програмних модулів системи візуальної навігації
- розробка стенду імітації польоту БПЛА для налаштування та розробки алгоритмів системи візуальної навігації.

#### 3.1 Постановка завдання

Для імітації польоту БПЛА необхідно створювати три осьові зміни положення камери по крену, тангажу і курсу, а також мати можливість двох координатного лінійного переміщення по осях  $X$  і  $Y$ , вздовж рельєфної карти. Загальна концепція стенду представлена у вигляді структурної схеми. Стенд складається з наступних частин. 1) Первинна рама - блок автопілота до складу

якого входить інерційна система для оцінки положення системи візуальної навігації в просторі, що рухаються серво моторами і ширококутна камера. 2) Вторинна рама – кріплення для первинної рами і система лінійного двох осьового переміщення стенду що складається з 4 крокових двигунів, 4 драйверів, керованих мікроконтролером і зміни кутового положення камери за допомогою серво моторів. 3) Рельєфна карта земної поверхні над якою здійснюється імітація польоту та навчання нейронної мережі шляхом руху над нею первинної та вторинної рам. Загальними вимогами для стенду є використання немагнітних і загальнодоступних матеріалів, простота виготовлення.

### 3.2. Розробка імітаційного стенду польоту БПЛА

Первинна рама повинна створювати три осьові зміни кутового положення камери, з достатнім кутом огляду наземного рельєфу. Серед можливих варіантів конструкції імітаційного стенду польоту БПЛА були обрані співвісні первинні квадратні рамки на кшталт гіроскопів, що рухаються закріпленими серво моторами, на підставі яких розміщений автопілот і камера. А також вторинна платформа до якої кріпиться первинна платформа і рухається чотирма кроковими двигунами для лінійного переміщення стенду в двох площинах. Дана конструкція простіше у виготовленні порівняно з гіростабілізованими платформами і має більше ступенів свободи переміщень у просторі. Останнім елементом є поверхня, що підстилає, у вигляді рельєфної карти.

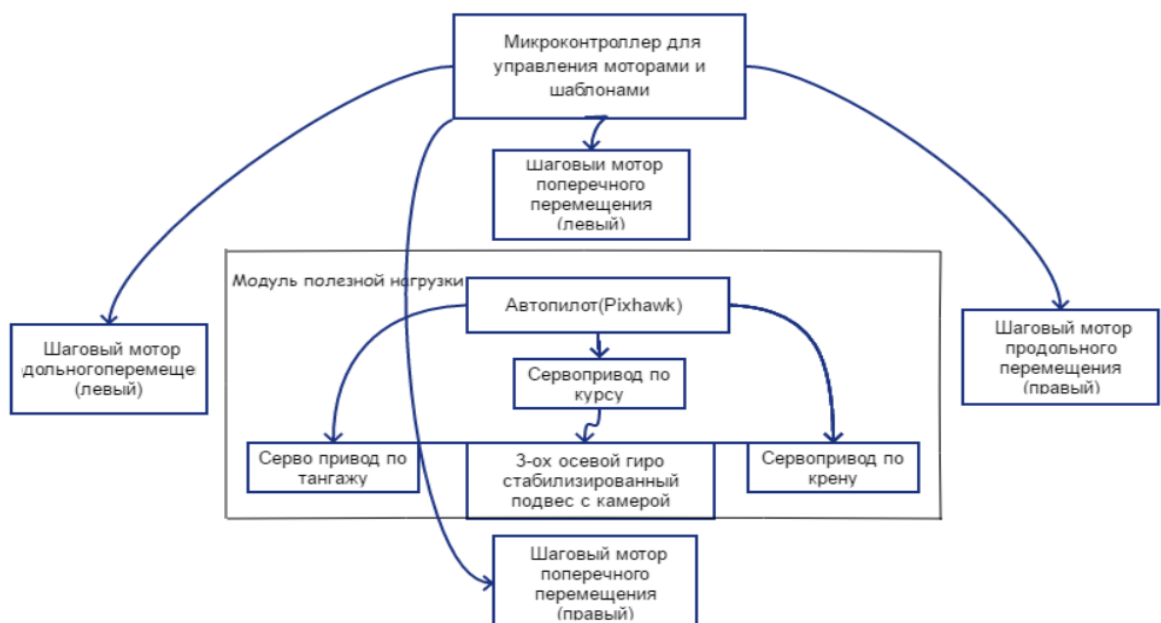




Рис. 3.1 Блок схема стенда.

Дана схема передбачає наявність трьох серво моторів, які забезпечують трьох осьове позиціонування платформи з корисним навантаженням у трьох площинах. Для визначення кутового положення платформи з камерою необхідна інерційна система навігації до складу якої входять: 3ох осьовий гіроскоп, 3ох осьовий акселерометр і 3ох осьовий компас. Як ІНС використовується ІНС автопілота PIXHAWK має даний модуль у своєму складі і розташований над камерою зі зворотного боку каретки, а також використовуються в даному автопілоті типові команди управління БПЛА для максимальної реалістичності імітації. Інтерфейс обміну даними камери системи візуальної навігації імітаційного стенду із зовнішнім стаціонарним ПК є USB. А від бортового мікрокомп'ютера або лабораторного ПК до автопілота передача даних здійснюється через стандартний послідовний інтерфейс USART/SPI, для зворотного зв'язку та коригування положення БПЛА в просторі. Для спрощення конструкції рами і позбавлення від контактів, що обертаються, на первинну раму поряд з автопілотом встановлюється радіо модуль. І тут передача даних здійснюється через звичайний радіо канал.

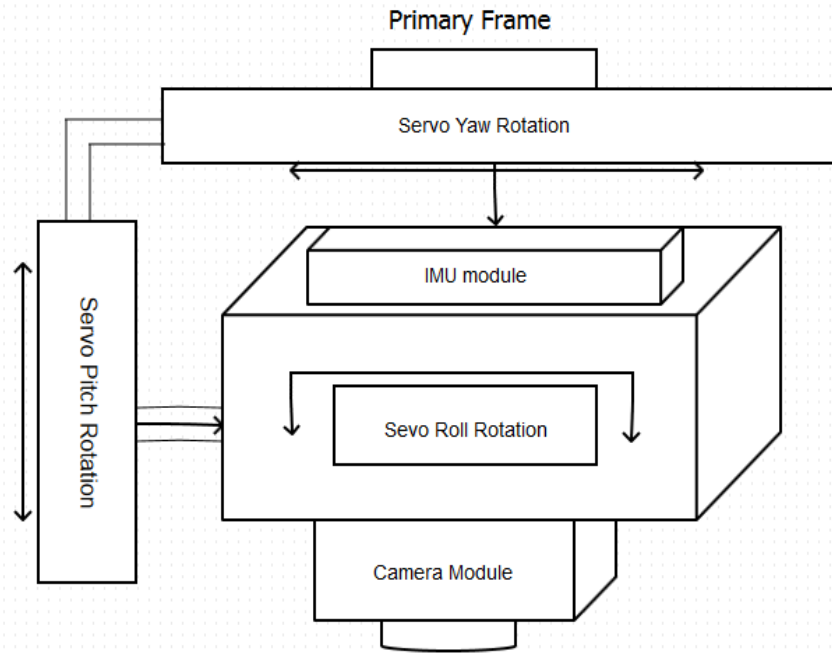


Рис 3.2 СТРУКТУРНА СХЕМА ПЕРВИННОЇ РАМИ ІМІТАЦІЙНОГО СТЕНДУ

Як IMU було обрано реальний автопілот, що має даний модуль у своєму складі, а також типові команди управління БПЛА для максимальної реалістичності імітації. Управління кутовим положенням модуля камери здійснюється через ШІМ канал автопілота, на виходи якого підключено серво мотори та запущено шаблонний скрипт зміни пілотажних кутів польоту. Інтерфейс обміну даними камери системи візуальної навігації імітаційного стенду із зовнішнім стаціонарним ПК є Ethernet. А від бортового мікрокомп'ютера або лабораторного ПК до автопілота передача даних здійснюється через стандартний послідовний інтерфейс USART/SPI, для зворотного зв'язку та коригування положення БПЛА в просторі. Для спрощення конструкції рами і позбавлення від контактів, що обертаються, на первинну раму поряд з автопілотом встановлюється радіо модуль. І тут передача даних здійснюється через звичайний радіо канал 433 MHz.

### 3.3 СТРУКТУРНА СХЕМА ВТОРИННОЇ РАМИ ІМІТАЦІЙНОГО СТЕНДУ

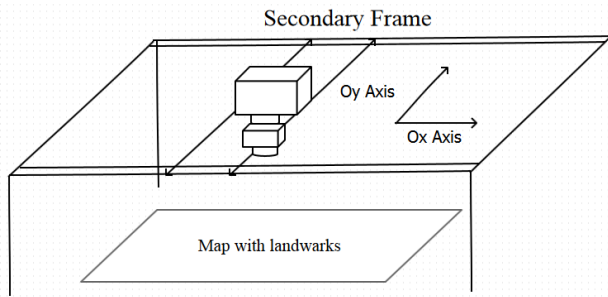
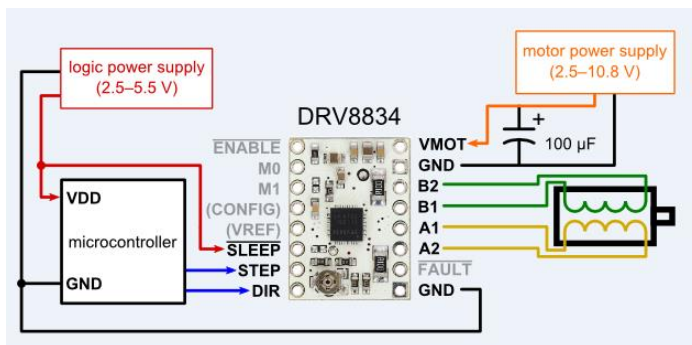


Рис 3.3 Вторинні кадр імітаційного стенду.

Дана рама є основною несучою конструкцією, основа якої складається з балок, а так само чотирьох жолобів, по яких колесами переміщається корпус вторинної рами в площинах  $Ox$  і  $Oy$ . Схема приводу створює двох осьове переміщення складається з 4ох серво моторів попарно з'єднаних до двох осей. Це дозволяє в 2 рази збільшити момент, що крутить, а відповідно корисне навантаження імітаційного стенду. Управління здійснюється за допомогою чотирьох драйверів DRV8834 та центрального мікроконтролера STM32f103C8.

Електрична схема підключення має вигляд:



Лінійний обхід первинної рами над рельєфною картою здійснюється на вибір одного з перед завантажених у мікроконтролер шаблонів геометричних фігур: прохід по квадрату, трикутнику, прямокутнику і більш складних. Таким чином досягається максимальна схожість з реально завантажуваним польотним планом автомобільної місії в автопілот БПЛА. В результаті з'єднання первинної та вторинної рам отримуємо імітаційний стенд 5ти ступенів свободи, які мають вигляд:

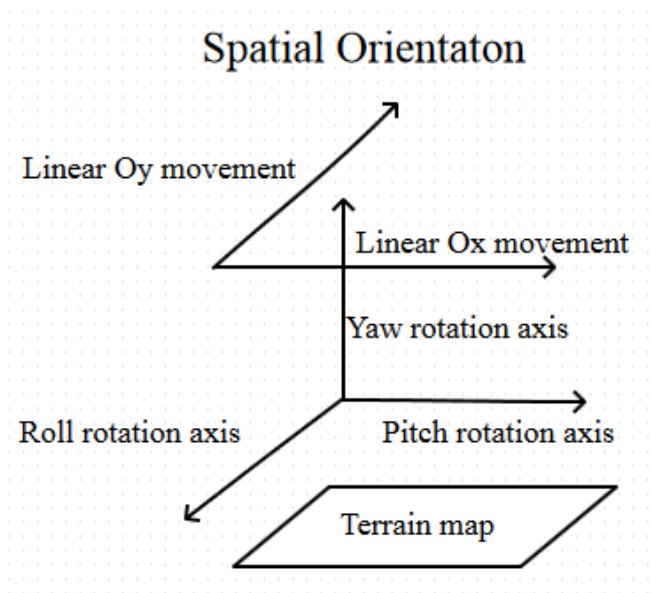


Рис. 2.4 Просторовий рух стенду.

Крім проходу карти всілякими геометричними траєкторіями, імітацію яких забезпечує вторинна рама, первинна рама імітує кути нахилу, тангажу та курсу. Дані кути можна вивантажити з пам'яті автопілота реального БПЛА після завершення авто місії і завантажити в автопілот встановлений на імітаційному стенді. Після чого повністю повторяться всі реальні маневри або можна створити і завантажити свій польотний план.

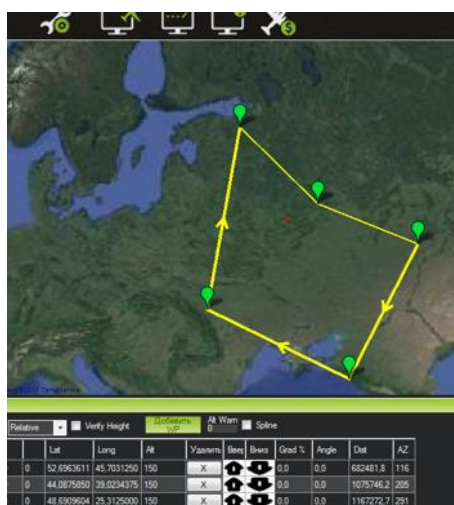


Рис. 3.4 Приклад побудови польотного плану.

Також реалізовано управління корисним навантаженням з гіро стабілізацією. Описати алгоритм гіростабілізації? Активація та вибір шаблонів відбувається перемиканням на новий польотний режим автопілота "Imitation"

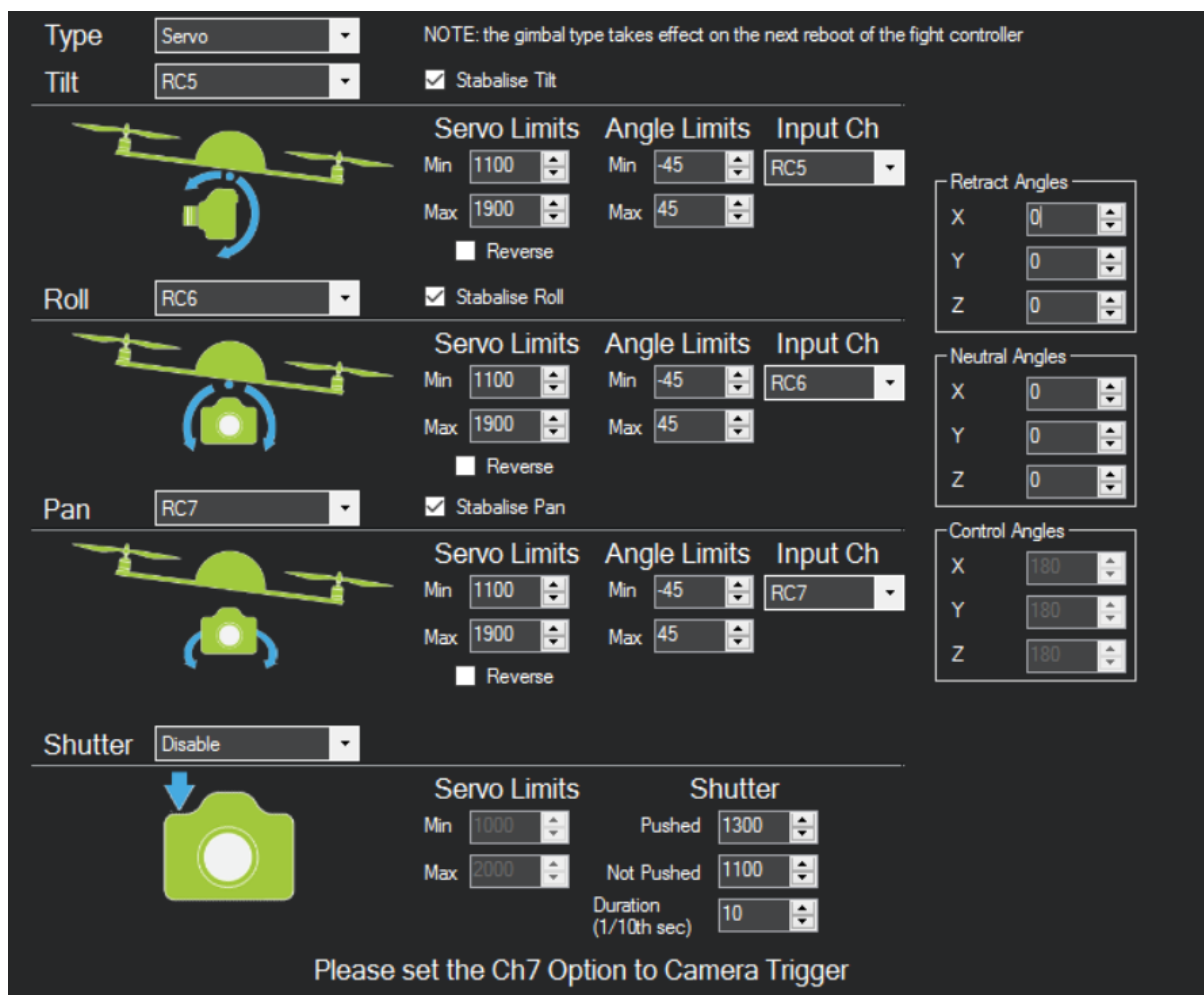


Рис. 3.5

3-ох осьове керування корисним навантаженням у просторі, здійснюється за допомогою сервоприводів SPRING-RC SM-S4315M 15-кг тяги що більш ніж достатньо для даної камери. Так як реальні БПЛА в процесі польоту не здійснюють крен і тангажі більш ніж на  $\pm 45$ град, забезпечення  $\pm 80$ град нахилу корисного навантаження є більш ніж достатньо. Також реалізований вибір імітації типу БПЛА (мультироторний, літаковий, літаюче крило, гібрид) Вибір завантажуваної прошивки автопілота для імітації

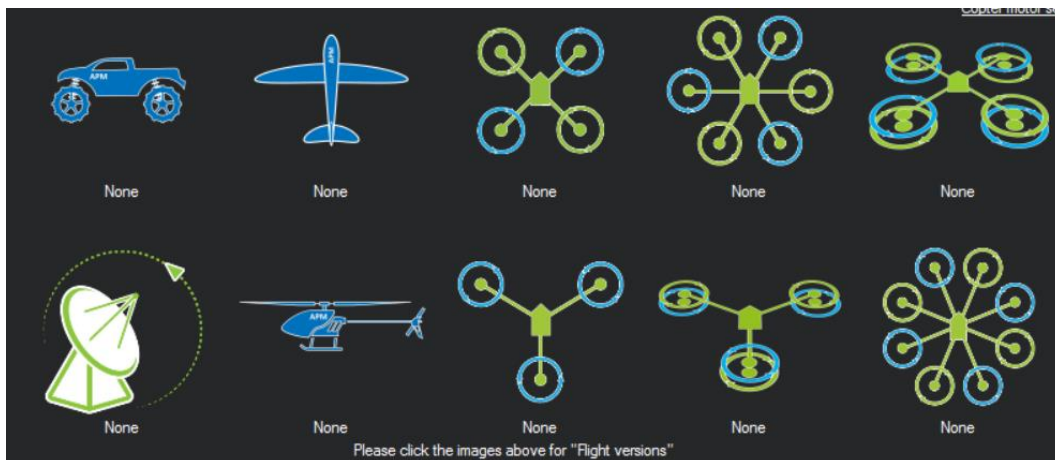
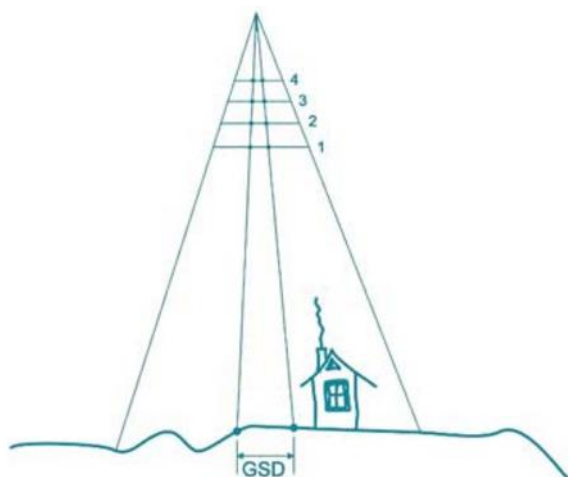


Рис. 3.6

Від вибору типу БПЛА залежать максимально допустимі значення кутів відхилень сервоприводів по трьох осях: крен, тангаж, курс і швидкість польоту.

### 3.4 РОЗРАХУНОК МАСШТАБУ КАРТИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО СТЕНДУ

Для космічних цифрових знімків використовується поняття розмір пікселя на місцевості (в англійській літературі — ground sample distance, GSD). Це поняття слід використовувати і для цифрових бортових камер. На рис. 5 наведені варіанти зйомки камер з різними розмірами матриці.



Приклад зйомки камер з різним розміром матриць та GSD.

З малюнка видно, що масштаб зйомки, для всіх камер різний. Якщо у паспорті цифрової камери не вказано фокусну відстань у пікселях, її легко розрахувати, розділивши фокусну відстань у міліметрах на фізичний розмір пікселя матриці камери. Працюючи в ЦФС зі знімками, отриманими цифровою камерою, цілком природно вимірювати всі величини в пікселях. Фізичний розмір пікселя матриці визначає її світлочутливість. Чим більший розмір комірки, тим більше фотонів потрапляє на матрицю (при використанні одного об'єктива), що дозволяє проводити зйомку з меншими витримками або при найгіршому освітленні.

Величина GSD, яка зрештою визначає точність результатів подальшої обробки, обчислюється за формулою:  $GSD = H/F$  де висота  $H$  вимірюється у сантиметрах, а фокусна відстань  $F$  у пікселях. Величина GSD визначає порядок точності результатів у плані, реальна точність може бути дещо кращою при використанні маркованих точок та автоматичних процедур вимірювання та гірше за наявності систематичних помилок, поганого калібрування камери. Для точності результатів за висотою слід розділити величину GSD на  $B/H$  — відношення базису зйомки до її висоти.

Так як для вирівнювання блоку знімків потрібно перекриття 60%, то  $B/H$  легко розрахувати  $U$  разі використання автоматичних вимірів (корелятора) точність вимірів за висотою визначатиметься формулою:  $dZ = c (GSD/(B/H))$ , де  $c$  - Якість знімка. За непрямыми ознаками (помилки взаємного орієнтування, точність вільних триангуляційних моделей) для деяких цифрових камер величина може досягати 0,1. Однією з паспортних характеристик цифрових камер є кількість кадрів на секунду FPS.

Значення FPS обмежує мінімальну висоту зйомки (мінімальне значення GSD). Справа в тому, що літак, на якому встановлена камера, не може мати швидкість меншою за певну. Для фотограмметричної обробки блоку аерозйомки потрібно перекриття сусідніх знімків у маршруті щонайменше 60%. Тому швидкість БПЛА  $V$ , висота  $H$  та FPS пов'язані формулою:

$$V = H ( FPS ( 0,4 ( (S/F) = 0,4 ( FPS ( S ( GSD,$$

де  $S$  - розмір кадру в пікселях уздовж осі польоту (зазвичай, менша сторона кадру). Якщо разом із приймачем GPS на борту літака встановлено систему IMU, то після обробки даних GPS/IMU можна отримати елементи зовнішнього орієнтування для кожного знімка.

При достатній точності цих елементів із процесу обробки даних на ЦФБ можна виключити зрівняння та використовувати так зване пряме геопозиціонування. Дуже грубою оцінкою необхідної точності системи IMU є кутовий розмір пікселя  $\Delta\varphi = 1/F$ , де  $F$  - фокусна відстань камери в пікселях. Для цифрових камер, що розглядаються, ця величина приблизно дорівнює  $0,006^\circ$ . Виробники систем IMU випускають апарати різного класу точності. Так, з приладів компанії Arplanix можна використовувати не найдорожчі POS AVI серії 410-510. Якщо на борту літака додатково встановлений лазерний сканер, який дозволяє отримувати хмару точок у польоті, то фотограмметрична обробка знімків ще більше спрощується, тому що після постачання сканерних даних для побудови ортофотопланів вже буде в наявності модель рельєфу місцевості.

Для використання технології лазерного сканування необхідні GPS/IMU-системи класу не нижче (іноді й вище), ніж цифрових камер. Технології прямого геопозиціонування за допомогою GPS/IMU-систем та отримання рельєфу місцевості за допомогою лазерного сканування все частіше використовуються при реалізації виробничих проектів. Камера обрана для встановлення на імітаційний стенд польоту БПЛА має такі технічні характеристики: • Module Size: 38mm \* 38mm 32mm \* 32mm • Temperature (Operation) : -20degree to 70 degree • Temperature (Stable Image):  $0^\circ$  до  $60^\circ$  • Camera Board Assembly technique : SMT (ROSH) • Focus: Manual • Object distance: 5CM-100M • Resolution : 3264(H) X 2448(V) 8Megapixel • Interface: USB 2.0 High Speed • Protocol : USB Video Class(UVC) • Operating system request: Win XP Win7 Win8 • Certifications : FCC and CE • Sensor Type: Sony (1/3.2") • Active Array Size : 3264X2448 • Minimal illumination: 0.5Lux • 3264X2448 MJPG 15fps YUY2 2fps • Dynamic Range: 83.5dB • Focal Length: 3.6mm • FOV:  $75^\circ$  • IR Filter:  $650\pm 10\text{nm}$  • Maximum Image Transfer Rate: 3264X2448 MJPG 15fps YUY2 2fps 2592X1944 MJPG 15fps YUY2 3fps



2048X1536 MJPG 20fps YUY2 3fps 1600X1200 MJPG 20fps YUY2 10fps 1280X960  
MJPG 20fps YUY2 10fps 1024X768 MJPG 30fps YUY2 10fps 800X600 MJPG 30fps  
YUY2 30fps 640X480 MJPG 30fps YUY2 30fps

## РОЗДІЛ 4

### НАЛАШТУВАННЯ СИСТЕМИ ВІЗУАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЇ НА ІМІТАЦІЙНОМУ СТЕНДІ

4.1 Постановка завдання налаштування системи візуальної навігації на стенді.

Визначити оптимальні значення параметрів системи візуальної навігації  $g_i$ , що настроюються,  $i=1..12$  у сенсі критерію.

$$I = \sum_{i=1}^N [(x_i - x_{ie})^2 + (y_i - y_{ie})^2]$$

де  $x_i, y_i$  – значення поточних координат БПЛА обчислених за допомогою системи візуальної навігації, а  $x_{ie}, y_{ie}$  – еталонні координати, що визначаються абсолютним положенням каретки. Алгоритм визначення оптимальних параметрів системи візуальної навігації Алгоритм визначення оптимальних параметрів системи візуальної навігації будується виходячи з використання генетичного алгоритму.

#### 4.2. ОЦІНКА ЯКОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ВІЗУАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЇ

Основними критеріями, які визначають якість роботи системи візуальної навігації є точність визначення координат БПЛА за допомогою СВН, а також час, що витрачається обчислювачем на визначення поточних координат БПЛА. Розглянемо програмні модулі, з яких складається система налаштування на стенді. SOFTWARE MODULES OF VISUAL NAVIGATION SYSTEM (VNS)

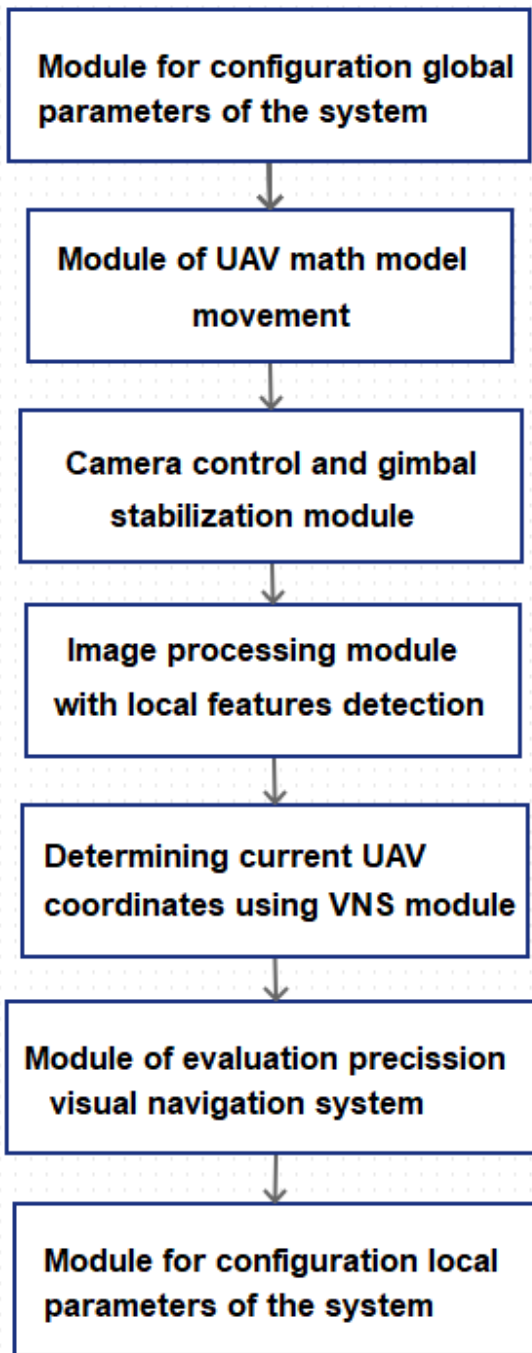


Рис. 4.2 Структурна схема програмного забезпечення.

#### 4.2.1. МОДУЛЬ НАЛАШТУВАННЯ ГЛОБАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ

**Module for configuration global parameters of the system**

Модуль містить опис функцій, що реалізують сітку переміщення крокових моторів у площині горизонту. За цією сіткою побудовано функції-шаблони основних геометричних фігур. Комбінуючи геометричні фігури, описані типові траєкторії руху БПЛА для крокових моторів. Додано новий польотний режим. У новому польотному режимі додані нахили серво моторів (крен, тангаж, курс) керованого гиро підвісу при переміщенні кутами вже описаних шаблонів крокових моторів модуля Camera Gimbal Control. Дане програмне забезпечення налаштовується глобальними параметрами, які визначають ступінь симуляції польоту БПЛА. Такими параметрами є: швидкість польоту (переміщення крокових двигунів),

#### 4.2.2. Модуль математичного руху та підрахунку пройденого шляху

**Module of UAV math model movement**

Даний модуль реалізує переміщення первинної та вторинних рам стенда в горизонтальній площині ( $Ox$ ,  $Oy$ ), керуючи кроковими моторами. Дана рама є основною несучою конструкцією, основа якої складається з балок, а так само чотирьох жолобів, по яких колесами переміщається корпус вторинної рами в площинах  $Ox$  і  $Oy$ . Схема приводу створює двох осьове переміщення складається з 4ох серво моторів попарно з'єднаних до двох осей. Це дозволяє в 2 рази збільшити момент, що крутить, а відповідно корисне навантаження імітаційного стенду. Управління здійснюється за допомогою чотирьох драйверів DRV8834 та центрального мікроконтролера STM32f103C8. Лінійний обхід первинної рами над рельєфною картою здійснюється на вибір одного з перед завантажених у мікроконтролер шаблонів геометричних фігур: прохід по квадрату, трикутнику,

прямокутнику і більш складних. Таким чином досягається максимальна схожість з реальною завантажуваним польотним планом автомобільної місії в автопілот БПЛА. Також є можливість вважати реальний польотний план і перетворити його траєкторію на переміщення стенду.

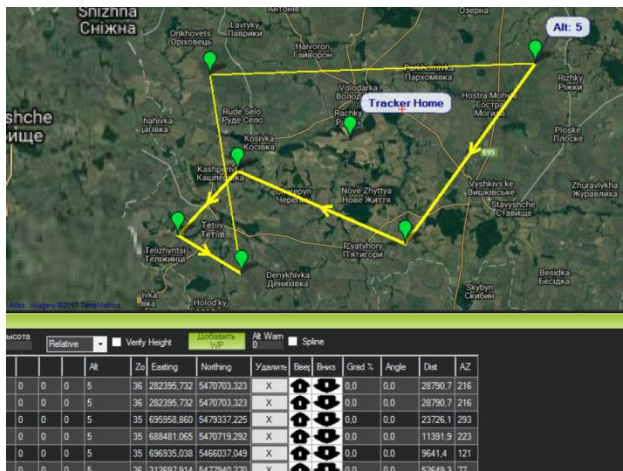
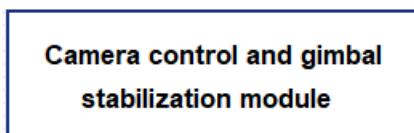


Рис. 4.3 Шаблон авто місії.

#### 4.2.3. Модуль управління корисним навантаженням та гіро стабілізацією



Модуль містить заздалегідь описані шаблони руху камери, налаштування параметрів швидкості відпрацювання підвісу визначається у відкритій програмі Mission Planner. Активація та вибір шаблонів відбувається увімкненням нового польотного режиму автопілота "Imitation". Так як реальні БПЛА в процесі польоту не здійснюють крен і тангажі більш ніж на  $\pm 45$ град, забезпечення  $\pm 80$ град нахилу корисного навантаження є більш ніж достатньо. Даний модуль працює в парі з модулем генерації траєкторії автомобільної місії, для стабілізації та керування камерою даний модуль використовує базовий польотний контролер Pixhawk (PWM pins) імітуючи маневри на віражах.

#### 4.2.4. Модуль обробки локальних наземних орієнтирів на зображенні

**Image processing module  
with local features detection**

Цей модуль є основним джерелом навігаційних даних з візуальних орієнтирів. Основні етапи пошуку визначення та знаходження БПЛА подібні до SIFT/SURF/RANSAC алгоритмів. Алгоритм модуля наведено нижче. 1. Сформувані цифрову модель зображення як матриці пікселів. 2. Побудова піраміди Гауссіанів та різниць Гауссіанів (Difference Of Gaussian DOG) для пошуку спеціальних точок. 3. Перевірка придатності точки екстремуму на роль ключової. 4. Знаходження орієнтації особливої точки. 5. Побудова дескриптора особливої точки. Постановка задачі Встановлено безліч особливих точок поточного зображення з координатами  $(X_i(tk), Y_i(tk))$ ; та попереднього зображення  $(X_i(tk-1), Y_i(tk-1))$   $i = 1..n$ ;  $k = 1 \dots N$ . Необхідно визначити відповідність між однаковими точками одного дескриптора на різних зображеннях.

#### 4.2.5. Модуль розрахунку та визначення GPS координат

**Determining current UAV  
coordinates using VNS module**

Даний модуль як точка відліку початку координат приймає центр першого знімка в точці зльоту. Після цього знайдені наземні орієнтири на знімку асоціюватимуться з цією точкою та її GPS координатами. Екстраполюючи отримані координати від знімків, та зчитуючи з пам'яті автопілота записані координати точок авто місії польотного плану, отримуємо координати цільової точки та поточної. Використовуючи формулу  $\text{habersine}$  вважаємо відстань до цільової точки через дугу великого кола апроксимуючи Землю сферою в метрах.

4.2.6. Модуль налаштування алгоритмів роботи системи, локальних параметрів

**Module for configuration local  
parameters of the system**

Локальні параметри системи такі: 1. Кількість особливих точок, що шукаються (nFeatures) 2. Кількість шарів октав (nOctavesLayers = 3 за замовчуванням) 3. Поріг яскравості (contrastThreshold = 0.04 за замовчуванням) 4. EdgeThreshold = 10 за замовчуванням 5. Sigma = 1.6 за замовчуванням 6. Коефіцієнт нормалізації дескриптора = 0.2 за замовчуванням 7. Порогове значення Гесіана 8. Розмір масштабу висоти (сигма) 9. Розмір та вид ядра фільтра 10. Величина порога влучення особливих точок (сигма) Саме налаштування даних параметрів вимагає багато часу і визначає якість роботи системи візуальної навігації.

#### 4.2.7. ВИБІР ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАЛАШТУВАННЯ VNS.

1. Кількість особливих точок, що шукаються (nFeatures) 2. Кількість шарів октав (nOctavesLayers = 3 за замовчуванням) 3. Поріг яскравості (contrastThreshold = 0.04 за замовчуванням) 4. EdgeThreshold = 10 за замовчуванням 5. Sigma = 1.6 за замовчуванням 6. Коефіцієнт нормалізації дескриптора = 0.2 за замовчуванням SURF 1. Порогове значення Гесіана 2. Кількість октав (nOctaves = 4 за замовчуванням) 3. Кількість шарів октав (nOctavesLayers = 2 за замовчуванням) 4. Розмір масштабу висоти (сигма) 5. Розмір та вид ядра фільтра RANSAC 1. Величина порога влучення особливих точок (сигма)

## **Висновок**

У даній роботі розглянуті основні принципи функціонування інерціальної навігаційної системи (ІНС) та супутникової навігаційної системи (СНС) на сучасних безпілотних літальних апаратах (БПЛА). Визначено переваги інерціальних систем, зокрема їх автономність, завадозахищеність та високу інформативність, але й недоліки, пов'язані з накопиченням похибок і коливаннями вимірювань. Для корекції похибок використовується супутникова навігаційна система.

Актуальною є задача створення інтегрованої навігаційної системи, що поєднує інерціальну та супутникову навігацію, для досягнення високої точності і надійності вимірювань. Для поліпшення навігаційних параметрів під час перерв у роботі супутникової системи пропонується використовувати додаткову інформацію від аеромагнітометричної системи. Планується розробити інтегрований навігаційний комплекс БПЛА на основі безплатформного блоку інерціальних датчиків, супутникового приймача СНС, магнітометра та аерометричних датчиків.

Основні задачі такого навігаційного комплексу полягатимуть у вирішенні інерціальних та супутникових навігаційних задач. Магнітометрична та аерометрична системи виступатимуть як допоміжні засоби, що попереджатимуть розбіжності інерціально-супутникової системи і реалізовуватимуть інерціально-курсо-повітряний метод числення координат. Запропоновано використовувати методи сумісної обробки інформації на основі калманівської фільтрації та оцінювати похибки курсо-повітряного числення.

Навігаційний комплекс буде базуватися на мікромеханічних датчиках, які вимагатимуть тарірування, калібрування та налагодження. Для вирішення цієї задачі також планується розробити окремі елементи спеціальної апаратури налагоджування.

Цей проект спрямований на покращення навігаційних можливостей БПЛА та забезпечення високої точності і надійності вимірювань під час польоту.

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**



[1] Ministry of Internal Affairs of Ukraine "Instructions on the use by military personnel of the National Guard of Ukraine of technical devices and technical means that have the functions of photo and film shooting, video recording, photo and film shooting equipment, video recording" from 13.01.2021 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0294-21> [in Ukrainian].

[2] Classification of the Unmanned Aerial Systems <https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/5>

[3] Vittorio Castrillo, & Angelo Manco, & Domenico Pascarella & Gabriella Gigante, "A Review of Counter-UAS Technologies for Cooperative Defensive Teams of Drones," *Drones*, 2022, 6(3), 65. <https://doi.org/10.3390/drones6030065>.

[4] DRONEII: Tech Talk – Unraveling 5 Levels of Drone Autonomy <https://dronelife.com/2019/03/11/droneii-tech-talk-unraveling-5-levels-of-drone-autonomy/>

[5] Taha Elmokadem & Andrey Savkin, "Towards fully autonomous UAVs: A survey," *Sensors*. 2021, 21. 6223. <https://doi.org/10.3390/s21186223>.

[6] Mirosław Adamski, "Analysis of propulsion systems of unmanned aerial vehicles," *Journal of Marine Engineering & Technology*, 16:4, 291–297, 2017. <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1383337>

[7] S. Nagarajan, Jagannathan Panneerselvam, Raj Mohmed Sadiq Batcha, "Nano Unmanned Aerial Vehicles – Drone or Helicopter in Military," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) CONF CALL*, vol. 7, Issue 11, 2019.

[8] Vinay Chamola & Pavan Kotes Aayush & Agarwal & Navneet Gupta & Mohsen Guizani & Naren Naren, "A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques," *Ad Hoc Networks*, vol. 111, 2021, 102324. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324>.

[9] Mohamed Zakaria & Moatassem Abdallah & Adnan Elshaafi, "Design and Production of Small Tailless Unmanned Aerial Vehicle (SAKR 2)," 2012. <https://doi.org/10.21608/amme.2012.36970>

[10] G.Singhal, B.Bansod,and L. Mathew, "Unmanned Aerial Vehicle Classification, Applications and Challenges: A Review,"Preprints, 2018, 2018110601 <https://doi.org/10.20944/preprints201811.0601.v1>.

[11] MaziarArjomandi,"Classification of Unmanned Aerial Vehicles,"The University of Adelaide, 2007, 49 p.[in Australia].

[12] I.S. Romanchenko, O.I. Lysenko, S.M. Chumachenko, O.M. Tachinina. et al.,Models of application of information and telecommunication technologies based on unmanned aircraft systems in emergency situations. Monograph, Kyiv: NAU, 2016, 335 p.[in Ukrainian]

[13] Hoa Nguyen& Toan Quyen& Van-Cuong Nguyen& Anh Le& Hoa Tran & MinhNguyen,"Control Algorithms for UAVs: A Comprehensive Survey,"EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems,vol. 7, Issue 23, e5, 2020.<https://doi.org/10.4108/eai.18-5-2020.164586>.

[14] Order of the Ministry of Defense of Ukraine About approval of Rules of performance of flights by unmanned aviation complexes of the state aviation of Ukraine. From December 8, 2016 #661. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17#Text> [in Ukrainian].