

УДК 004.02:007.5+004:67

О. Ролік, В. Смолій, Н. Смолій

МЕТОД КОРОТКОСТРОКОВОГО ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ БПЛА

Анотація: В статті запропоновано метод уникнення перешкод безпілотними літальними апаратами в режимі реального часу з використанням морфологічних перетворень відеопотоків стереокамери. Запропонований метод менш вимогливий до обчислювальних ресурсів, оскільки не використовує методи штучного інтелекту. Метод забезпечує систему управління польотом вторинними даними про довколишнє середовище, які придатні до інтерпретування людиною, та враховує габарити БПЛА, на якому розгортається система. Наведено математичні перетворення, що необхідні для оброблення даних від бортових систем БПЛА, а також для оброблення зображень від стереоскопічної камери для отримання відкоригованої короткострокової траєкторії. Наведено методи оцінки коригування траєкторії та алгоритм оброблення зображення від стереоскопічної камери.

Ключові слова: коригування маршруту, інформаційні системи, уникнення перешкод, стереоскопічний зір, оброблення зображень, короткострокове планування траєкторії.

Вступ

Впродовж останніх років в галузі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відбувається стрімка еволюція. Ця технологія пройшла шлях від спорту з невеличкою кількістю фанатів до впровадження технологій БПЛА в інфраструктуру міст. З'явився поділ на гоночні та вантажні, пілотовані та автономні БПЛА. Використання БПЛА від змагань розширилось до завдань екологічного моніторингу [1], картографування, використання в промисловості [2], а також в оборонних і пошуково-рятувальних операціях. Постійне зростання вимог до автономності, точності виконання завдань, зменшення споживання енергії та обчислювальних потужностей актуалізує необхідність розробки нових методів оброблення даних, спеціально призначених для використання в системах управління БПЛА.

Сучасні автономні БПЛА містять систему комп'ютерного зору з використанням в системах управління БПЛА методів цифрової обробки зображень, знань з різних галузей математики, фізики та теорії керування. Інтеграція комп'ютерного зору з системою управління БПЛА дозволяє виявляти об'єкти, будувати карти довкілля,

здійснювати навігацію при польотах в умовах обмеженої або відсутньої супутникової навігації та неповної інформації про місцезнаходження БПЛА. Робота присвячена використанню комп'ютерного зору для виявлення перешкод на шляху польоту БПЛА між точками місії при польотах на низьких висотах.

Аналіз літературних джерел

Огляд технологій виявлення перешкод та їх порівняльна характеристика наведена в роботі [3]. Автор стверджує, що візуальні методи виявлення перешкод на основі бінокулярних та стереоскопічних камер відрізняються від інших тим, що дають велику точність за малу ціну, проте їм притаманна вища складність порівняно з системами на основах монокулярних камер, ультразвуку та LIDAR-систем. Відзначається також суттєва залежність якості роботи від погодних умов. Таким чином RGB-D камери мають прийнятні характеристики стійкості та вимог до обчислювальних потужностей, але на якість результатів роботи значно впливають погодні фактори та засвічування об'єктива, що є очікуваним. Тому в даному дослідженні цьому аспекту приділено особливу увагу.

У статті [4] система стереоскопічного зору використовується для уникнення перешкод. Проте автори не приділяють уваги таким аспектам, як вибір бажаного напрямку руху та перетворення зображення з простору зображення камери в простір БПЛА. Також не наведені особливості використаних алгоритмів.

В [5] описані результати реконструкції зображення, засвіченого сонячними променями. Продемонстровано використання морфологічних фільтрів для завдань виявлення та локалізації відблисків різних типів. Описано процес підготовки зображення до оброблення з використанням операцій згортки та фільтрації.

Результатом праці [6] є метод для реконструкції супутникового зображення, ушкодженого при передаванні сигналів. Наведені приклади реконструкцій зображення та визначені особливості реалізації запропонованого методу. Окремо досліджуються операції морфологічного закриття та відкриття й аналізується їх вплив на розподіл пікселів чорно-білого зображення за значенням інтенсивності та вплив корекцій на сегментацію зображення.

В статті [7] продемонстровані можливості використання системи стереоскопічного зору для визначення відстані до об'єктів, які розташовані на дистанції більшій, ніж 50 метрів. Детально розглянуто питання калібрування бінокулярної камери та коригування зображень з усуненням тангенціальних та радіальних викривлень через недоліки об'єктива.

В роботі [8] запропоновано метод оптимізації руху БПЛА, спираючись на показник енергоефективності польоту. В роботі детально описано процес побудови

моделі БПЛА в середовищі MatLab, наведено засоби аналізу побудованої моделі, керування симуляцією та збурюючими впливами. Також порушено проблему використання БПЛА в складнодосяжних середовищах.

Результатами праці [9] є рекомендації щодо процесу побудови системи тривимірного аналізу середовища на основі каліброваної камери. Авторами наведено математичний апарат, який необхідний для здійснення прямих та зворотних перетворень між координатними системами камери та глобальної системи координат (ГСК).

В [10] розглянуто особливості маневрування БПЛА різних конструкцій. Наведено результати досліджень траєкторій гальмування БПЛА в залежності від швидкості руху. Запропоновано і перевірено ряд математичних моделей та виявлено найбільш результативні з них.

Автори [11] описують процес оброблення відеопотоків для отримання стереозображень високої роздільної здатності. Наведено приклад побудови тривимірної мапи обличчя з використанням пристрою власної розробки. Оброблення даних здійснювалась за допомогою SGBM-алгоритму з подальшим порівняльним аналізом результатів оброблення зображень для різних значень пар параметрів.

У статті [12] розроблена та проаналізована керована система швидкісного обприскування садових насаджень, яка ухвалює рішення з керування оприскувачем на основі системи стереоскопічного зору та альтернативного позиціонування з використанням візуальної навігації. Запропонована система завдяки використанню моделі детектора YOLO7 має придатні для навігації показники точності.

В [13] наведений математичний апарат для оцінки льотних параметрів БПЛА. Запропоновані математичні моделі для розрахунків моментів інерції та часу зміни напрямку БПЛА. Наведено приклади переводу між системами координат БПЛА та ГСК. Проведені розрахунки характеристик променю рами БПЛА. Здійснено експериментальну перевірку математичних моделей та методів на моделі квадрокоптера з чотирма гвинтами та променями.

Структурна схема системи БПЛА

Методи коригування траєкторії враховують дані про орієнтацію БПЛА, його положення, а також результуючий вектор сили тяги, що діє на БПЛА. Це обумовлює мінімальний необхідний набір компонент системи та їх зв'язків. Структуру системи управління БПЛА, в якій реалізовано метод коригування траєкторії, наведено на рис. 1. Схему побудовано з використанням типової архітектури автономного БПЛА [8].

Головними компонентами системи БПЛА є польотний контролер, бортовий комп'ютер та стереоскопічна камера. Ці компоненти здійснюють отримання даних, їх

оброблення та генерацію керуючих команд БПЛА. Стереоскопічна камера надає RGB–D зображення та метадані про нього.

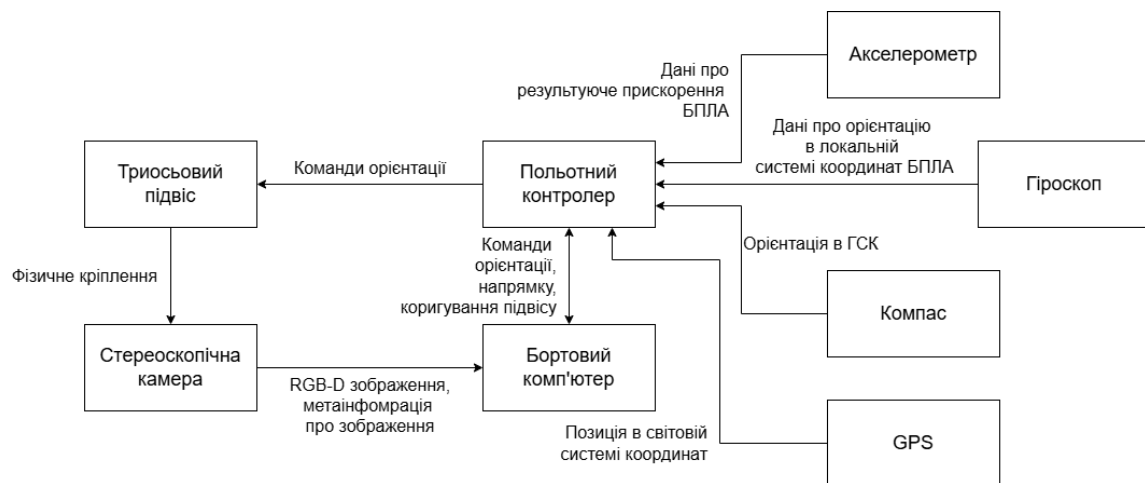


Рисунок 1. Структурна схема системи БПЛА

Для розуміння сутності метадані необхідно знати вміст RGB–D зображення. Окрім RGB–компоненти таке зображення містить характеристику глибини, яка може бути виражена як за допомогою фактичних значень з розмірністю в сантиметрах, метрах чи дюймах (в залежності від налаштувань камери), так і в одиницях невідповідності (disparity), які є результатом обробки зображення алгоритмом поєднання стереоскопічних зображень, таким як SG або SGBM. Зі збільшенням цілочисельних значень невідповідності через дії алгоритму, що поєднує зображення від лівого та правого об'єктивів, зменшується ширина результуючого зображення. В разі представлення глибини значеннями невідповідності потрібно перевести значення невідповідності в одиниці довжини. Перетворення здійснюється з урахуванням кроку дискретизації значень невідповідності, який може надходити з камери. В разі відсутності такої інформації враховуються фокусна відстань стереоскопічної камери та відстань між оптичними осями об'єктивів камери. Характеристики глибини разом з інформацією про кут зору камери, її роздільну здатність та частоту кадрів складають метадані стереоскопічної камери.

Дані від стереоскопічної камери надходять в бортовий комп'ютер (див. рис. 1), в якому реалізовано запропонований метод уникнення перешкод. Функціональні модулі системи управління БПЛА, в яких реалізовано запропонований метод, наведено на рис. 2.



Рисунок 2. Модулі системи бортового комп'ютера

Оброблення RGB-D зображень в модулі обробки RGB-D зображення перетворює його в бінарне представлення. При цьому отримується інформація стосовно безпеки польоту БПЛА в зоні, що знаходиться в полі зору камери.

В модулі оцінки можливих напрямків на основі даних про безпеку польоту здійснюється оцінка потенціалу для вибору кожного пікселя зображення як можливий напрямок руху БПЛА та переведення зображення з оцінками потенціалів в координати точки на зображенні. Координати точки передаються в модуль перетворення у напрям руху. Перетворення здійснюється з урахуванням даних про орієнтацію підвісу камери та орієнтацію в ГСК. Бажаний формат даних орієнтації для сучасних систем БПЛА – це формат кватерніону, що обумовлено його властивостями незалежного обертання на відміну від кутів Ейлера, де спостерігається явище блокування обертання.

Перетворення зображення у вектор напрямку відбувається з певною дискретизацією. Крок дискретизації залежить від поля зору та роздільної здатності камери. Чим більше буде поле зору та чим більше є роздільна здатність камери, тим точнішим буде отримуване значення корекції.

Метод коригування траєкторії вирішує проблеми виділення із зображення інформації про небезпечні області, переведення точки з системи координат зображення камери у ГСК та проєкції точки в ГСК у точку на зображенні.

Перетворення зображення у набір обмежень на рух

Метою перетворень вхідного RGB-D зображення є отримання зображення з характеристикою безпеки середовища польоту в полі зору камери. Для цього необхідно отримати максимум інформації від обох компонент зображення. Схема обробки (рис. 3) побудована за принципом розподіленої обробки компонент RGB-D зображення. Глибинне зображення містить оцінку відстані до об'єктів в лівому об'єктиві камери на основі порівняння кадрів з лівого та правого об'єктивів. В джерелах [3, 4] відзначена вразливість систем стереоскопічного зору від поверхонь складних рельєфностей, таких як поверхні водойм або крони дерев. Вразливість проявляється в аномальних перепадах значень глибини в межах одного об'єкта. Виявлення та класифікація таких поверхонь як безпечних або небезпечних закладена у функціонал ланки оброблення RGB-зображення. Обробка глибинного зображення сегментує зображення за глибиною та класифікує отримані сегменти, забезпечуючи уникнення зіткнень з об'єктами, які детектуються без дефектів.

Обробка починається з поділу RGB-D зображення між ланцюгами перетворень. Бінарна класифікація пікселів зображення ланкою RGB-перетворень досягається використанням чотирьох елементарних перетворень.

Вхідне RGB зображення обробляється алгоритмом усунення відблисків.

Оскільки реалізації подібних алгоритмів апробовані та достовірні [5], в даній роботі вони використовуються без новацій.

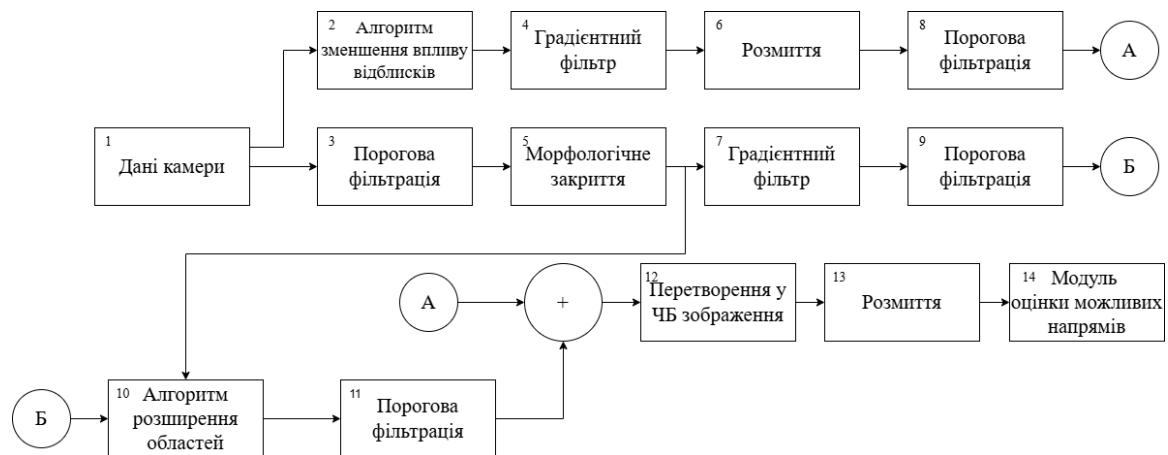


Рисунок 3. Функціональна схема запропонованого ланцюга обробки зображень RGB-D камери

Результуюче зображення зі зменшеним впливом джерел світла передається далі для градієнтної фільтрації. Результатом оброблення є чорно-біле зображення з інформацією про інтенсивність перепадів кольору. Величини на результуючому зображенні та його характерні ознаки після перетворення суттєво залежать від використаного при фільтрації ядра згортки. Для тестових реалізацій використано фільтр з ядром згортки Собеля. Як наслідок, похилені лінії та області з високою неоднорідністю можуть мати доволі малі значення градієнту після перетворення. Методом усунення зазначеного недоліку є зміна ядра згортки. Наприклад, ядро згортки Шарра дає більші значення градієнтів, а ядро Лапласа – меншу залежність від орієнтації шуканих перепадів в просторі зображення.

Градієнтне зображення може містити інтенсивні перепади з мінімуму в максимум в межах одного контуру, а також нерівномірності контуру в межах одного об'єкту. Використання операції розмиття призначено для нівелювання таких недоліків зображення. Для зменшення інтенсивностей перепадів на зображенні та підвищення однорідності регіонів використано Гаусове або медіанне розмиття. Ці типи розмиття надають перевагу зваженому середньому значенню пікселів в регіоні згортки.

В отриманому зображенні є інформація про приблизні межі об'єктів, що не співпадають за кольором, та складні поверхні, які виглядають як області з постійними значеннями градієнтів, що необхідно класифікувати за значенням. Для класифікації пропонується використовувати порогову фільтрацію. Значення порогу фільтрації залежить від кольорової корекції зображення камери, використаного розміру ядра згортки в блоках розмиття та градієнтного фільтра.

Ланка перетворень для глибинного зображення виявляє об'єкти на малих

відстанях та доповнює інформацію, отриману від ланки RGB–перетворень. Отримане зображення глибини містить велику кількість неоднорідностей. Для замкнених приміщень виникає потреба виявлення простору, достатнього для здійснення маневру БПЛА. Класифікація перепадів глибини як достатніх ґрунтується на понятті «сильного градієнту». Градієнт вважається сильним, якщо його значення задовольняє пороговому перепаду глибини для обраної моделі БПЛА. Величина порогу th спирається на максимальний розмір БПЛА та використане при обчисленні градієнтів ядро згортки. Приклад розрахунку th для БПЛА розміром $d = 1.4$ метри при використанні фільтра Собеля наведено в (3). Ядра згортки фільтру за шириною та висотою наведені в (1) та (2) відповідно. Підсумкове значення градієнту вираховується, як середнє між градієнтами в кожному напрямку. Сильні градієнти є важливими для подальших обчислень та потребують збереження. Вираз, який характеризує трансформацію перетвореного I_G з оригінального I_G зображення для кожного пікселя p , наведено в (4).

$$S_{kw} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$S_{kh} = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$th = \sum_{i=0}^2 S_{kwi,2} * d = 5.6. \quad (3)$$

Формула (3) дійсна за умови, що значення в глибинному зображенні виражені в метрах.

$$\neg I_G = \forall p \in I_G, (p > th \rightarrow p) \vee (p \leq th \rightarrow 0). \quad (4)$$

Перетворення з глибинного зображення в бінарне потребує виконання шістьох елементарних перетворень.

Для зменшення необхідної кількості обчислень при отриманні глибинного зображення, значення глибини, які перевищують довжину гальмівного шляху БПЛА [10], встановлюються на рівні максимального значення відстані. Результуюче зображення міститиме випадкові перепади від мінімуму до максимуму, які в комп'ютерному зорі носять назву шуму типу «сіль та перець».

Операція «закриття» забезпечує зменшення випадкових перепадів глибини на зображенні. Вона складається з операції ерозії (зменшення яскравих контурів, що ефективно усуває шум типу «сіль») та дилатації (збільшення яскравих контурів, що ефективно при усуненні шуму типу «перець»). Таким чином формується зображення з чіткими однорідними сегментами, що мають значення глибини до регіонів зображення.

Наступним кроком є виділення меж об'єктів, для чого необхідно використовувати операцію згортки з ядром Собеля, Шарра чи Лапласа. Результат градієнтного перетворення фільтрується за допомогою функції сильного градієнта (4).

Для забезпечення однорідності сегментів, що відповідають областям з постійним значенням градієнта, в ланцюг перетворень додано функцію розповсюдження мінімального значення глибини в межах сильного градієнту до меж цього градієнту. Подібний алгоритм, який працював на основі переводу в s -простір, було запропоновано в роботі [4]. Наведене перетворення пов'язане з додатковими параметрами камери, чого вдалось уникнути завдяки використанню запропонованого алгоритму. Входами для алгоритму є градієнтне відфільтроване зображення та глибинне зображення після обробки фільтром закриття.

Псевдокод для Алгоритму:

Вхід: чорно-біле зображення I_D з градієнтами, отриманими з попередніх перетворень, I_G – відфільтроване чорно-біле зображення. Зображення ідентичних розмірів.

Вихід: сегментоване чорно-біле зображення.

```

1   Borders ← []
2   Values ← []
4   n ← 1
3   for each row  $l_D$  in  $I_D$ ,  $v_G$  in  $I_G$ , where  $\text{index}(l_D) \% n == 0$ ;
4        $L_G \leftarrow [0,0]$ 
5        $V_G \leftarrow [v_G[0]]$ 
6       while  $L_G[-1] \neq \text{len}(l_D)-1$ 
7           new_ind ← find_max_value_index( $l_P[L_G + 1:\text{len}(l_D)]$ ) + 1
8           if new_ind ==  $\text{len}(l_D)$ 
9                $L_G.append(\text{len}(l_D)-1)$ 
10               $V_G.append(\max(v_G[L_G[-2]: L_G[-1:]])$ 
11              Break
12          If new_ind- $L_G[-1] \leq 4$ 
13               $L_G[-1] \leftarrow \text{new\_ind}$ 
14               $V_G \leftarrow \max(v_G[L_G[-2]: L_G[-1:]])$ 
15              continue
16           $L_G.append([new\_ind, new\_ind])$ 
17           $V_G.append(\max(v_G[L_G[-3]: L_G[-2:]])$ 
18           $V_G.append(v_G[L_G[-1]])$ 
19      Borders.append( $L_G$ )
20      Values.append( $V_G$ )

```



```

21   Result ← порожнє зображення ідентичного до  $I_D$  розміру
22   For val_row in Values[1:]
23       r_ind ← index(val_row)
24       For val in val_row
25           val_ind ← index(val)
26           result[r_ind][borders[r_ind][val_ind]:borders[r_ind][val_ind+1]
← val
27   return result

```

Приклад оброблення зображення наведено на рис. 4,а та 4,б, де *a*) – вхідне синтетичне зображення, *б*) – результат обробки.

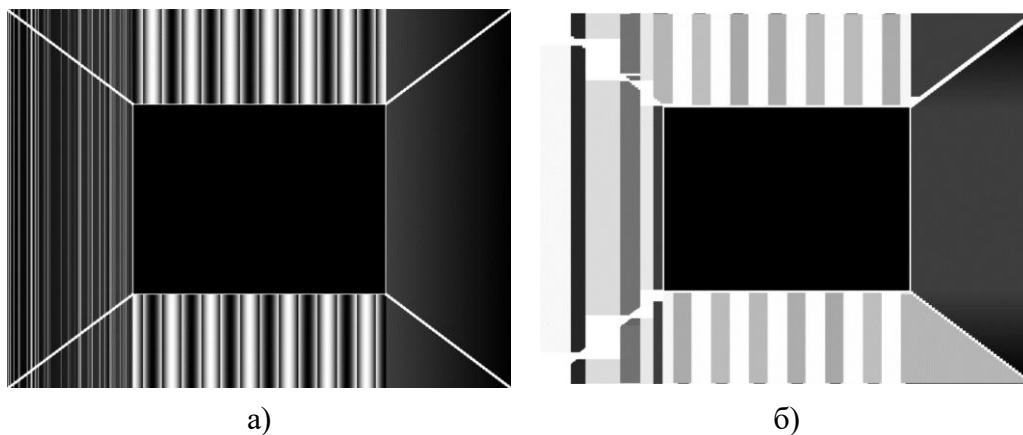


Рисунок 4. Приклад обробки синтетичного зображення запропонованим алгоритмом

Аналізуючи рис.4, можна бачити, як області з шумами змінюють свій вигляд та отримують більші значення, що і було метою роботи алгоритму.

Задля зменшення необхідних ресурсів, призначених для коригування траєкторії БПЛА, передбачена можливість часткової обробки зображення. Зазначена обробка пропускає зображення, скомпоноване з кожного n -того рядка оригінального зображення, через алгоритм розповсюдження значень глибини. Для покриття алгоритмом усієї площі зображення додано параметр зсуву, який в подальшому іменується фазою алгоритму та вказує набір рядків, що обробляє алгоритм на поточній ітерації. Так, за значення $n = 2$ та фази 0, будуть оброблені нульовий, другий та четвертий рядки, а за значення фази 1 – перший, третій та п'ятий. Значення n відповідає величині шпаруватості алгоритму. Досліджено залежність часу обробки від розміру зображення та значення фази алгоритму. Результати роботи алгоритму для різних значень n наведено на рис. 5.

В залежності від шпаруватості час обробки зменшується. Залежність часу обробки зображення від значення шпаруватості має нелінійний характер. Це зумовило

визначення та дослідження оптимального за загальним часом оброблення значення для n . Загальний час оброблення – це сума часів оброблення для всіх унікальних наборів строк зображення. В процесі дослідження порівняно значення часу оброблення зображення цілком з приведеними значеннями часу оброблення при частковій обробці зображення. Різниця в значеннях між часом оброблення зображення зі значенням $n = 1$ та часом оброблення за інших n наведені на рис. 6. Побудовано графіки відношення часу оброблення за $n = 1$ до часу неповного оброблення зображення за інших значень n (рис. 7).

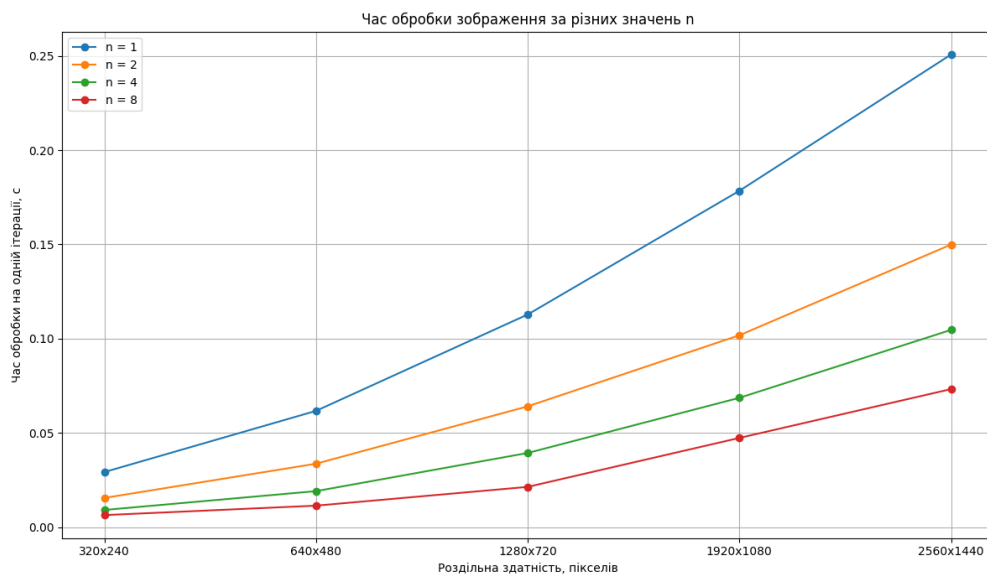


Рисунок 5. Часові витрати на одну ітерацію обробки зображення за різних значень шпаруватості

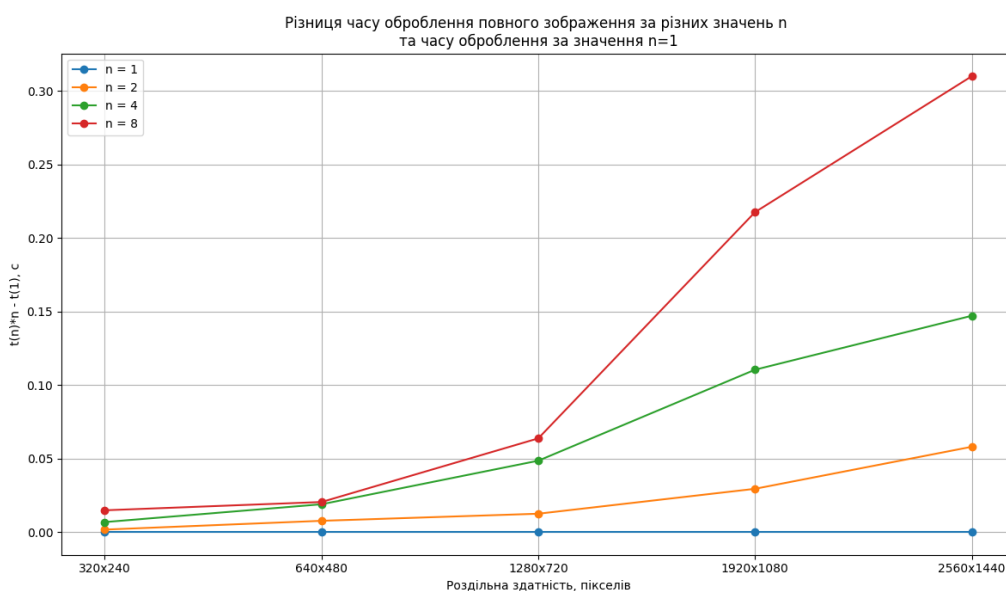


Рисунок 6. Загальні часові витрати на повне оброблення зображення за різних значень шпаруватості

Збільшення значення кількості рядків, залишених без оброблення, збільшує загальний час оброблення. Наведене вдосконалення доцільно використовувати лише за умови, що для системи важливим є дотримання вимог норми кадрів на секунду. У разі надання пріоритету метриці кількості оброблених кадрів на секунду, доцільним буде використовувати значення шпаруватості в 2 або 4, як такі що зменшують час однієї ітерації в ~ 0.6 та ~ 0.4 рази (рис. 7). У цьому випадку система втрачає невелику кількість даних про оточення.

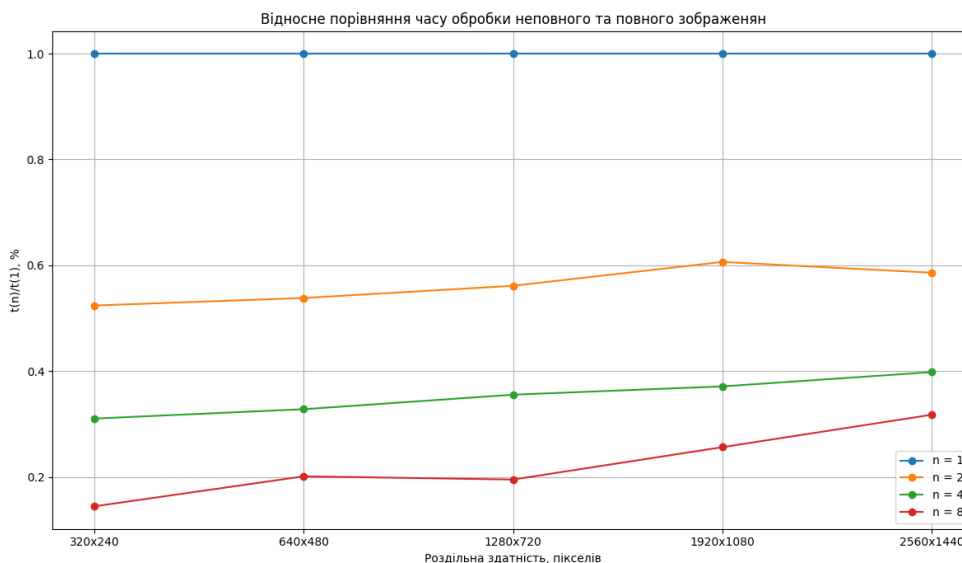


Рисунок 7. Відносне зменшення часу на одну ітерацію в залежності від значення шпаруватості

Завершальною операцією ланки перетворення RGB–D зображення є операція бінаризації за пороговим значенням. Її використання обумовлене необхідністю позначення об'єктів, що безпосередньо загрожують руху БПЛА. Можливі два варіанти встановлення значення порогу:

- Перший варіант бере в якості критичного значення глибини довжину гальмівного шляху БПЛА. Співпадає з функцією першого порогового фільтру (функціональний блок 3 на рис. 3). Усі виявлені об'єкти позначаються як небезпечні і збільшується ймовірність непередбачуваної поведінки системи. БПЛА сприйматиме об'єкти, перед якими не зможе загальмувати, як небезпечні. Така класифікація є виправданою в разі необхідності подолати маршрут з максимальною швидкістю;

- Другий варіант використовує константне значення, визначене архітектором системи. Величина константи впливатиме на те, наскільки близько БПЛА здатний наблизитись до поверхні перед тим, як почне уникати зіткнення. Цей варіант корисний для дослідницьких або картографічних місій, в яких важливим є детальна характеристика місцевості.

Останнім перетворенням модуля обробки зображення є застосування логічного «Або» над бінарними зображеннями, отриманими від ланцюгів перетворень RGB та глибинних зображень.

Оцінка бінарного зображення

Функції перетворень (12) та (13) схеми (рис. 3) не належать модулю перетворення зображення, проте є частиною процесу його оброблення. Вони забезпечують перехід від бінарного зображення з пікселями, що позначають безпечний – небезпечний напрям, до зображення, в якому містяться значення оцінки кожного пікселя щодо придатності до обрання в якості подальшого напрямку руху БПЛА. Значення зображення цінності отримуються шляхом обчислення для кожного пікселя суми функцій цінності від значення цього пікселя, його координат та оточення. Результатом перетворення модуля є координати точки на зображенні цінності з найменшим значенням небезпеки. Результируюча функція цінності для кожного пікселя складається з наступних компонент:

- функція цінності на основі відхилення від точки маршруту;
- функція цінності зі збереженням висоти;
- функція цінності для зниження ризиків.

Функція цінності на основі відхилення від точки маршруту забезпечує вибір напрямків руху БПЛА з найменшим відхиленням від напрямку до цільової точки за умови доступності такого маршруту. Ця функція використовує поточну точку маршруту для введення оцінки кожного пікселя зображення. Для отримання оцінки необхідно виконати перетворення точки маршруту в точку в просторі зображення.

Перетворення координат точки місії ($B_{lat}, B_{lon}, B_{alt}$), де індекси lat – широта, lon – довгота, alt – висота, у вектор, пов'язаний з позицією БПЛА $P (P_{lat} P_{lon} P_{alt})$, виконується для подальшого приведення отриманого вектора в координати точки на зображенні. Для отримання вектора в КС БПЛА вираховується відстань $d_{deg}(\varphi, \lambda)$ в градусних одиницях між точками B та P як

$$d_{deg} = (B_{lat}, B_{lon}) - (P_{lat}, P_{lon}) = (\varphi, \lambda). \quad (5)$$

Таким чином, φ – градусна різниця в широті між точками B та P ; λ – градусна різниця в довготі.

Далі здійснюється розрахунок відстані в метрах до проекцій точки маршруту B на одиничні вектори КС БПЛА, використовуючи функцію F розрахунку довжини ортодоми [19], введена в роботу як

$$F(A, B) = 2 * r * \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta \varphi}{2} \right) + \cos(\varphi_1) * \cos(\varphi_2) * \sin^2 \left(\frac{\Delta \lambda}{2} \right)} \right), \quad (6)$$

де A – початкова точка; B – кінцева точка; r – радіус Землі в метрах або кілометрах

(визначає розмірність шуканої величини); φ_1, φ_2 – широта точок А та В; $\Delta\varphi, \Delta\lambda$ – градусна різниця між широтою та довготою точок А та В.

Відстані до точки проєкцій маршруту на одиничні вектори ГСК мають значення:

$$\bar{d} = (F((P_{lat}, B_{lon}), P), F((B_{lat}, P_{lon}), P), -(B_{alt} - P_{alt})), \quad (7)$$

$$\bar{d} = \frac{\bar{d}}{\|\bar{d}\|}. \quad (8)$$

В такому випадку «вартість» вибору кожного пікселя обчислюється як евклідова відстань між проєкцією точки маршруту та кожним пікселем. Перетворення з точки ГСК у точку на зображенні розглянуто нижче.

Функція цінності зі збереженням висоти необхідна для польотів, в яких збільшення або зменшення висоти невідворотно призведе до зіткнення.

Для проведення оцінки необхідно побудувати лінію горизонту в координатах зображення та виміряти відстань кожного пікселя до неї. Оскільки, згідно схеми (рис. 1), система забезпечена гіроскопом, то завдання побудови лінії горизонту зводиться до проєкції двох точок з малою кутовою відстанню, які знаходяться в площині XOY КС БПЛА, на зображення.

Функція цінності для зниження ризиків необхідна для забезпечення надання переваги напрямкам, віддаленим від країв потенційно небезпечних областей. Реалізація функції внесена в ланцюг перетворень (рис. 3) в якості перетворень зображення (12, 13) та не потребує реалізації.

Методи розв'язання колізії не розглядались, оскільки для їх виникнення необхідно, щоб на шляху БПЛА виникла множина точок, рівновіддалених в координатах зображення від проєкції точки маршруту, розташованих на висоті горизонту та які мають однакове безпекове оточення. В такому випадку припускається, що напрям руху БПЛА обирається випадковим чином з множини доступних варіантів.

Математичний апарат для переведення з точки зображення у напрям БПЛА

ГСК, в якій знаходиться БПЛА, в системах автопілоту характеризується одиничними векторами: OX – направлений на північ, OY – направлений на схід та OZ – направлений до центру Землі або вгору в залежності від системи, встановленої на польотному контролері.

Власна КС БПЛА орієнтована подібним чином:

- вектор OZ орієнтований до центру Землі або від нього;
- вектор OX розташований у горизонтальній площині, орієнтований вздовж руху БПЛА;
- вектор OY є повернутим на 90 градусів вектором OX навколо осі OZ .

КС стереоскопічної камери, на відміну від БПЛА, використовує іншу орієнтацію векторів:

- вектор OZ орієнтований за оптичною віссю камери за напрямком зору, площина, перпендикулярна даному вектору, є площиною зображення;
- орієнтація OX в площині зображення співпадає з напрямком збільшення індексу ширини пікселів та збільшується від центру зображення до правого краю;
- вектор OY орієнтований в площині зображення в напрямку від верхнього до нижнього краю зображення.

Метод уникнення перешкод є методом оброблення зображення. Одиницею даних є двовимірне зображення. Необхідним є перетворення для переходу від КС зображення до КС камери. Матриця камери M_{cam} (9) здійснює перетворення координат (X_p, Y_p) для точки p зображення I у тривимірний вектор, спираючись на припущення про рівність проєкційної компоненти координати Z_p одиниці

$$M_{cam} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

де f_x – фокусна відстань за віссю OX КС камери; f_y – фокусна відстань за віссю OY КС камери; c_x – координата за OX проєкції оптичної осі на зображення; c_y – координата за OY проєкції оптичної осі на зображення. Значення для цієї матриці зазвичай не потребують розрахунку, оскільки є опановані методи їх реалізації у вигляді програм, що розраховують ці значення як частину процесу калібрування камери [9, 20].

Для переведення з КС БПЛА в КС камери використовують матрицю переведення M_T :

$$M_T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Матриця (10) може бути використана за умови, що вектор OZ координатної системи БПЛА орієнтований до центру Землі. В протилежному випадку слід замінити одиницю в другому стовпці на -1 .

Можливим є встановлення камери на підвісі та без нього. Розглянуто підхід до обробки інформації з камери, встановленої на підвісі. Перевагою такого встановлення є те, що орієнтація камери перестає залежати від орієнтації БПЛА, що надає більші можливості щодо огляду оточення БПЛА та нівелює потребу в вирівнюванні горизонту камери шляхом коригування орієнтації БПЛА. Вимогою запропонованого методу є наслідування камерою напрямку руху БПЛА за значеннями азимуту та піднесення. Азимут визначається як значення градусного відхилення проєкції руху БПЛА

в площину XOY від вектора OX КС БПЛА. Піднесення трактується як градусне відхилення проекції вектора руху БПЛА від вектора OX в площині XOZ .

Оскільки наявні у вільному доступі системи автопілотів не мають подібного режиму стабілізації підвісу, розроблено математичний апарат для розрахунку кватерніона орієнтації підвісу, спираючись на дані про поточний азимут (Az) руху БПЛА та результуючі показники тяги від бортового акселерометра Ac (Ac_x, Ac_y, Ac_z) для розрахунку кута піднесення (El). В розрахунках не використовується поточна орієнтація БПЛА, оскільки азимут БПЛА отримує від компаса, який оперує в ГСК, а орієнтація вектора тяги, який вираховується з показників акселерометра, також є вектором в ГСК. Кут піднесення El визначається як

$$El = \arctg\left(\frac{Ac_z}{\|(Ac_x, Ac_y)\|}\right). \quad (11)$$

Визначені El та Az використовуються для розрахунку опорної матриці M [18] в ГСК, з якої формується кватерніон орієнтації підвісу. Під опорною розуміють матрицю ортогональних векторів, що містить в собі вектор орієнтації та два інших ортогональних вектори, які разом утворюють координатну систему тривимірного простору. Розрахунок вектора орієнтації I_{UAV} виконується через частковий оберн одиничного вектора OX на кут азимуту (12). Побудова опорної матриці M описана в формулах (13 – 15).

$$OX \bullet \begin{pmatrix} \cos(Az) & -\sin(Az) & 0 \\ \sin(Az) & \cos(Az) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = I_{uav}, \quad (12)$$

$$S = I_{uav} \times Up = I_{uav} \times (0, 0, 1), \quad (13)$$

$$Up_n = I_{uav} \times S, \quad (14)$$

$$M = (I_{uav}^T, S^T, Up_n^T). \quad (15)$$

Перетворення матриці M в кватерніон Q_{xoy} відбувається за математичним апаратом [18]. Результуючий кватерніон Q_G розраховується як поворот кватерніона навколо осі S на кут El , що ілюструє (17). Це вимагає розрахунку кватерніона піднесення Q_{El} (16).

$$Q_{El} = (\cos(El / 2), \sin(El / 2) * S), \quad (16)$$

$$Q_G = Q_{El} * Q_{xoy} * Q_{El}^{-1}. \quad (17)$$

Таким чином забезпечується наслідування підвісом напрямку руху БПЛА, що є важливим для подальших розрахунків вектора напрямку БПЛА в ГСК із зображення.

Для перетворення найбільш вигідного пікселя зображення цінності у просторовий вектор напрямку БПЛА використані перетворення з простору зображення у тривимірний вектор.

Переведення пікселя з КС камери у вектор D КС БПЛА здійснено як зворотне перетворення до проєкції точки в КС зображення. Над точкою I зображення з координатами пікселя (X_I, Y_I) – за шириною та висотою виконані наступні перетворення:

$$I = [X_I, Y_I, 1.0], \quad (18)$$

$$D = I \cdot M_{cam}^{-1} \cdot M_T^{-1}. \quad (19)$$

Для переведення отриманого тривимірного вектора D в кватерніон орієнтації Q_{cd} слід виконати перетворення (13 – 15) з розрахунком опорної матриці M для вектора D . Врахування орієнтації підвіса камери здійснюється обертанням отриманого кватерніону Q_{cd} на кватерніон орієнтації підвісу Q_G (20). Так отримуємо кватерніон орієнтації Q_{cam} з пікселя зображення.

$$Q_{cam} = Q_G * Q_{cd} * Q_G^{-1}. \quad (20)$$

Для переходу від вектора в ГСК у КС зображення зворотні перетворення мають вигляд:

- перетворення з КС світу в КС камери;
- перетворення з переведення з КС камери у КС зображення.

Перетворення точки p_w з КС світу в точку p_c КС камери виконується шляхом переведення точки p_w у кватерніон Q_p (13 – 15), його оберту на кватерніон Q_G , переведення з кватерніона у матрицю за формулами у [18]. Результатом є опорна матриця M_p для точки p_w , в якій вектор M_{p0} є тривимірним вектором напрямку на точку в КС камери.

Переведення точки p_c з КС камери у p КС зображення має вигляд

$$p = p_c \cdot M_T \cdot M_{cam}. \quad (21)$$

Отримана таким чином точка p містить характеристику віддаленості пікселя через координату p_z . Для отримання координат (X_p, Y_p) точки на зображенні необхідно виконати

$$(X_p, Y_p) = \left(\frac{p_x}{p_z}, \frac{p_y}{p_z} \right). \quad (22)$$

Зменшення похибок перетворення пікселя зображення у просторовий вектор, які спричинені недосконалощами оптичної системи камери, забезпечується застосуванням апроксимуючої функції викривлень, визначенням її коефіцієнтів та калібруванням камери [20].

Пропонована система стикається з дилемою: для отримання більшої кількості варіантів шляху необхідно мати широке поле зору камери, проте таке поле зору супроводжуватиметься специфічною будовою об'єктиву камери, що спричинятиме нелінійні викривлення зображення, нівелювати які повністю не є можливим.

Збільшення максимального можливого кута зору камери та зображень більших роздільних здатностей є перспективами подальших досліджень.

Подяка

Дослідження виконані в рамках наукового грантового проєкту 2023.04/0077 «Дрон для забору проб води» від Національного фонду досліджень України.

Висновки

Розроблення методу уникнення перешкод вносить вагомий внесок у розвиток систем навігації БПЛА в невідомих середовищах, зменшуючи ризики при виконанні автономних місій.

Запропоновано метод уникнення перешкод на основі оброблення RGB–D зображень, отриманих зі стереоскопічної камери, що зменшує вимоги до обчислювальних ресурсів бортових систем БПЛА шляхом використання морфологічних фільтрів.

Метод забезпечує безпечні польоти БПЛА в динамічних середовищах без використання нейронних мереж в задачах детекції та оминання перешкод, що важливо для збільшення кількості потенційних платформ для використання на БПЛА та пришвидшення циклів розробки систем уникнення перешкод.

Створено функціонал перетворень для оброблення RGB–D за допомогою морфологічних фільтрів, який доповнено адаптивним алгоритмом сегментації зображення. Реалізація алгоритму дозволяє уникнути прив'язки до апаратних параметрів камери, а також дає можливість регуляції споживаних ресурсів.

Побудовано математичний апарат для проєціювання точок реального світу на зображення та в зворотньому напрямку, використано отримані перетворення для побудови функцій цінності зображень, які забезпечують уникнення зіткнень з перешкодами та дотримання курсу місії.

Обґрунтовано перевагу використання морфологічних фільтрів, як операцій для швидкої обробки зображень, результатами дії яких на зображення є придатні до інтерпретації людиною зображення, що пришвидшує процеси вдосконалення систем БПЛА.

Список використаних джерел

1. Polishchuk M., Rolik O. Improvement of Technological Equipment Drone for Water Sampling: Design and Modeling / FME Transactions. – 2024, 52, No 2. – p. 237–245. doi: 10.5937/fme2402237P
2. Поліщук М.М., Ролік О.І Дрон для технічного обслуговування труб великого діаметру// Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – Том 35 (74) № 4. 2024. С. 1–7. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/01>

3. J. Chen, Y. Zhou, Q. Lv, K. K. Deveerasetty and H. Ugochi Dike, "A Review of Autonomous Obstacle Avoidance Technology for Multi-rotor UAVs," 2018 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), Wuyishan, China, 2018, pp. 244–249, doi: 10.1109/ICInfA.2018.8812473.
4. L. Matthies, R. Brockers, Y. Kuwata and S. Weiss, "Stereo vision-based obstacle avoidance for micro air vehicles using disparity space," 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Hong Kong, China, 2014, pp. 3242–3249, doi: 10.1109/ICRA.2014.6907325.
5. Jin, Z., Feng, H., Xu, Z., & Chen, Y. (2023). A Data Generation Method for Image Flare Removal Based on Similarity and Centrosymmetric Effect. *Photonics*, 10(10), 1072. <https://doi.org/10.3390/photonics10101072>
6. M. Pesaresi and J. A. Benediktsson, "A new approach for the morphological segmentation of high-resolution satellite imagery," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 2, pp. 309–320, Feb 2001, doi: 10.1109/36.905239.
7. L. Hamad, M. A. Khan and A. Mohamed, "Object Depth and Size Estimation Using Stereo-Vision and Integration With SLAM," in *IEEE Sensors Letters*, vol. 8, no. 4, pp. 1–4, April 2024, Art no. 6003204, doi: 10.1109/LSSENS.2024.3367956.
8. Писаренко А., Ролік О. Енергоєфективна автономна безпілотна система відбору проб води для екологічного моніторингу / Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління», № 1 (46), 2025. – с. 267–282. DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.46.2025.323886>
9. Shichao Yang, Jian Wen, Shiwei Wu, Tian Yang, Yanxue Wu, Fei Liu, Camera calibration with active standard Gaussian stripes for 3D measurement, *Measurement*, Volume 233, 2024, 114793, ISSN 0263–2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114793>.
10. Yao, Y., Wu, J., Chen, H., Xu, J., Yin, Z. (2025). Braking Models for Short-Distance Recovery of UAV. In: Jia, L., Yang, F., Cheng, X., Wang, Y., Li, Z., Huang, W. (eds) *The Proceedings of 2024 International Conference of Electrical, Electronic and Networked Energy Systems. EENES 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 1316. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-2080-7_5
11. Krecichwost, Michal & Sage, Agata & Miodonska, Zuzanna & Badura, Pawel. (2022). 4D Multimodal Speaker Model for Remote Speech Diagnosis. *IEEE Access*. PP. 1–1. 10.1109/ACCESS.2022.3203572.
12. Victor Massaki Nakaguchi, R.M. Rasika D. Abeyrathna, Zifu Liu, Ryoza Noguchi, Tofael Ahamed, Development of a Machine stereo vision-based autonomous navigation system for orchard speed sprayers, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 227, Part 2, 2024, 109669, ISSN 0168–1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109669>.

13. Benić, Zoran & Piljek, Petar & Kotarski, Denis. (2016). Mathematical Modelling of Unmanned Aerial Vehicles with Four Rotors. Interdisciplinary Description of Complex Systems. 14. 88–100. 10.7906/indcs.14.1.9.
14. Y. Yuan and M. Ryll, "Dual Quaternion Control of UAVs with Cable–suspended Load," 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Yokohama, Japan, 2024, pp. 1561–1567, doi: 10.1109/ICRA57147.2024.10610170.
15. Wang, Baocai & Luo, Zirong & Shang, Jianzhong & Xia, Minghai. (2019). Research on Modeling and Control of Tilting Three–rotor UAV. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 677. 052091. 10.1088/1757–899X/677/5/052091.
16. Gama, Filipe & Georgiev, Mihail & Gotchev, Atanas. (2018). Unsupervised calibration of RGB–NIR capture pairs utilizing dense multimodal image correspondences. 2145–2149. 10.23919/EUSIPCO.2018.8553454.
17. MAVLink Project, "Common Message Set: ATTITUDE_QUATERNION (#31)," MAVLink Documentation, [Online]. Available: https://mavlink.io/en/messages/common.html#ATTITUDE_QUATERNION. [Accessed: 23–May–2025].
18. Mike Day, "Converting a Rotation Matrix to a Quaternion" Insomniac Games [Online]. Available: <https://d3cw3dd2w32x2b.cloudfront.net/wp-content/uploads/2015/01/matrix-to-quat.pdf>. [Accessed: 23–May–2025].
19. Oxford English Dictionary. Oxford University Press. 2nd ed. 1989. Cites coinage of term «Haversine» by Prof. Jas. Inman, D. D., in his Navigation and Nautical Astronomy, 3rd ed. (1835).
20. OpenCV Team, "Camera Calibration" OpenCV Documentation, [Online]. Available: https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html. [Accessed: 23–May–2025].