

---

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt215.01.020>

CC BY-NC

**ДЖЕБРАЇЛОВ Р.Ю.**, аспірант,

молодш. наук. співроб. наук.-досл. лаб. безпілотних комплексів і систем

<https://orcid.org/0000-0002-4473-9670>, e-mail: [rombik1197@gmail.com](mailto:rombik1197@gmail.com)

**ГОСПОДАРЧУК О.Ю.**,

старш. наук. співроб. відд. інтелектуального управління

<https://orcid.org/0000-0001-6619-2277>, e-mail: [olexago@gmail.com](mailto:olexago@gmail.com)

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій

та систем НАН України та МОН України,

просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна

## **ВИЯВЛЕННЯ ОСОБЛИВИХ ЗОН ЯК ОСНОВА МЕТОДУ ТОПОГРАФІЧНОЇ СПОРІДНЕНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ**

---

**Вступ.** Супутникова та інерційна системи навігації безпілотного літального апарата (БпЛА) або безпілотного авіаційного комплексу (БпАК) мають свої недоліки, пов'язані з необхідністю гарантованого надійного зв'язку. Спроби обійти ці недоліки полягають в розробленні автономної системи навігації. Офіційно запатентована модель автономної системи навігації, як виявилось, також має свої недоліки. Відповідно виникає запит на вдосконалення такої автономної системи навігації.

**Мета.** Розроблення методу визначення топографічної спорідненості зображень на основі врахування виявлених особливих зон на зображеннях природнього ландшафту для автономної навігації БпЛА.

**Результати.** Розроблено метод топографічної спорідненості візуальних зображень, який працює на основі виявлення особливих зон за принципом пошуку локальних максимумів оператора Лапласа на зображенні. Метод топографічної спорідненості зображень дає змогу залучати для порівняння меншу кількість особливих точок, що зменшує обсяг необхідних ресурсів пам'яті та підвищує швидкодію.

**Висновки.** Запропонований метод топографічної спорідненості зображень на основі виявлення особливих зон (blob detection methods) за принципом пошуку локальних максимумів оператора Лапласа може бути використано для побудови системи автономної навігації БпЛА.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, безпілотний авіаційний комплекс, автономна навігація, особливі точки, особливі зони, метод аналізу особливих зон зображень.

© ВД «Академперіодика» НАН України, 2024

## ВСТУП

На сьогоднішній день однією з основних проблем застосування безпілотних літальних апаратів (БпЛА), або безпілотних авіаційних комплексів (БпАК), є їх навігаційне забезпечення. Системи навігації, побудовані на основі сигналу з глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), є вразливими до природніх або штучних перешкод сигналу, навмисного придушення керувального сигналу, важко маскуються, не є доступними в усіх місцях на планеті, є залежними від терміну роботи супутника на орбіті та загрози щодо його діяльності в контексті розвитку повітряно-космічних військових сил різними державами світу. Застосування інерційної системи навігації пов'язано з проблемами накопичення похибок в кутах орієнтації і координатах польоту БпЛА. Паралельне застосування цих навігаційних систем додатково з радіонавігацією з землі та встановленням додаткових давачів — магнітометра, одометра, баровисотоміра, хоча і зменшує, але не усуває зазначені недоліки, а також збільшує вагу обладнання.

Саме тому з метою вирішення зазначених проблем виникає запит на розроблення нових принципів і методів навігації. Одним з них є метод навігації на основі особливих точок або зон. Він може бути застосований для малих і середніх БпЛА, практично не дає похибок, має невелику вартість, низьке енергоспоживання, а вага необхідних пристроїв обмежується лише вагою наявної фотокамери БпЛА і мікрочипів.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

До способів розв'язання проблем застосовуваних систем навігації можна віднести: систему відстеження рельєфу місцевості (TERCOM), оптико-електронну екстремально-кореляційну систему корекції (DSMAC), одночасну локалізацію і картографування (V-SLAM), візуальну одометрію (visual odometry), візуально-інерційну одометрію (visual inertial odometry), метод візуальної навігації, метод топографічної кластеризації візуальних зображень тощо.

Система відстеження рельєфу місцевості (TERCOM) була створена в США в 70-их роках минулого століття. Вона передбачає сканування поверхні землі радіовисотоміром та порівняння даних перепадів висот з еталонними. Сканування відбувається не на всьому маршруті, а на певних визначених точках, збережених в запам'ятовувальному пристрої літального апарату. Система застосовується в крилатих ракетах «Томагавк» разом з інерційною системою, коригуючи показники останньої. Її недоліками є: необхідність зберігання в запам'ятовувальному пристрої точних тривимірних цифрових топографічних карт місцевості всього маршруту слідування літального апарату, низька ефективність на рівнинній місцевості, береговій зоні з пологим берегом, на місцевості, де наявні значні перепади рівня снігового покриву, в районах з одноманітною місцевістю, високе електроспоживання та вага радіовисотоміра тощо.

Оптико-електронна екстремально-кореляційна система корекції (DSMAC) була створена в США у 80-их роках минулого століття як доповнення до системи TERCOM для роботи на складних ділянках маршруту, на яких немає характерно вираженого рельєфу місцевості.

На відміну від попередньої системи ця система передбачає знімання поверхні землі на заздалегідь запрограмованих в систему точках маршруту за допомоги фотокамери, підсиленої конденсаторами, оброблення зображень та порівняння знімків з еталонними [1].

Оброблення зображень передбачає їх просторове усереднення та дискретизацію для зменшення роздільної здатності, цифрову фільтрацію для видалення локальної середньої яскравості, перетворення з багаторозрядного сірого зображення на однорозрядне (бінарне) чорно-біле. Така сама процедура виконується щодо усіх еталонних зображень маршруту. Порівняння двох зображень здійснюється за допомоги підрахунку кількості двійкових пікселів визначених ділянок одного зображення та кількості пікселів у місцях розташування тотожних ділянок на іншому зображенні.

Величина найбільшого збігу кількостей пікселів називається піком кореляції. Мапа еталонних зображень маршруту містить по три послідовних кадри однієї ділянки поверхні. Так само здійснюється знімання трьох послідовних кадрів поверхні під час польоту, які порівнюються з еталонними, і якщо, зважаючи на положення ракети за її відомою швидкістю, висотою та курсом, хоча б два піки кореляції співпадають, то можна говорити про збіг зображень і оновлювати координати інерційної системи.

В модернізованій версії системи три кадри знімаються не послідовно, а із зсувом, та додаються для отримання сумарної кореляційної поверхні. Такий зсув дозволяє виявити постійні піки кореляції з найменшими бічними структурами, що компенсує неточності попереднього методу, та порівняти зображення за місцем розташування ділянки з найбільшим кореляційним значенням. В нічних умовах система DSMAC передбачає використання стробоскопа великої потужності.

Застосування цієї системи дає змогу вирішити деякі з зазначених проблем системи TERCOM, хоча вказана система не позбавлена недоліків: необхідно завантажувати в пам'ятовувальний пристрій актуальні знімки поверхні, і ці знімки мають бути якісними та обробленими; на літальному апараті має встановлюватися потужна фотокамера або декілька фотокамер, потужний стробоскоп; низька ефективність системи в темну пору доби; високе енергоспоживання та вага обладнання; проходження повз хоча б одне контрольне місце на маршруті може повністю дезорієнтувати літальний апарат тощо.

Метод одночасної локалізації та картографування (V-SLAM) засновано на ідеї побудови такої глобальної карти просторових положень видимих на кадрах відеопотоку ознак, яка узгоджується з положеннями камери впродовж усього часу руху [2, 3]. Цей метод добре зарекомендував себе під час навігації в закритих приміщеннях і по замкнених траєкторіях, є точнішим за метод візуальної одометрії за рахунок того, що накладається більше обмежень на невідомі положення камери, однак не є надійнішим через, наприклад, ті помилки під час виявлення точок перетину траєкторій, які можуть значно вплинути на узгодженість усієї карти. Він не має переваг порівняно з методом візуальної одометрії у разі довгої незвичайної траєкторії БпЛА. V-SLAM може працювати і в режимі реального часу [4].

Метод візуальної одометрії (visual odometry) здійснює поступове відновлення траєкторії (від точки до точки), беручи до уваги лише її локальну узгодженість (розташування поточної точки траєкторії відносно попередніх її точок у локальній системі координат за невідомих глобальних координат), для чого будується лише локальна карта просторових положень ознак [5, 6]. Недоліком методу візуальної одометрії є накопичення помилок з часом. Вказаний метод може так само працювати в режимі реального часу [7].

Для методу одночасної локалізації і картографування та методу візуальної одометрії найбільшою проблемою є неможливість оцінювання масштабу сцени у разі використання лише однієї камери без додаткових давачів.

Метод візуально-інерційної одометрії (visual inertial odometry) полягає в тому, що дані з інерційних давачів використовуються як для уточнення відносних переміщень камери, так і для визначення масштабу сцени [8, 9]. Такий метод складніший в реалізації, ніж суто візуальний, але значно точніший та надійніший. Недоліком методу є те, що, незважаючи на його високу точність, із плином часу неминуче накопичуються помилки під час польоту БпЛА довгими траєкторіями.

Метод візуальної навігації ґрунтується на тому, що за втрати використовованого навігаційного сигналу GPS або ГЛОНАСС, БпЛА повертається в точку старту на основі збережених під час польоту візуальних ознак. Алгоритм будує глобальну карту місцевості, відображеної бортовою відеокамерою, шляхом обчислення географічних координат особливих точок, знайдених на кадрах. Після зникнення сигналу, за допомоги цих точок здійснюється навігація БпЛА для його повернення на точку старту. Для побудови глобальної карти місцевості використовуються не всі кадри, а тільки ключові кадри, які перекриваються. В алгоритмі як ключовий використовували кожен  $\mu$ -й кадр. Основна вимога під час вибору  $\mu$  полягає в тому, що розмір в пікселях області, видимої на всіх кадрах, які перекриваються, має бути не меншим за задану частину кадру, наприклад чверті, третини тощо.

Перевагами методу є:

- відсутність складних обчислень, пов'язаних із взаємним узгодженням положень усіх ознак з положеннями камер;
- положення кожної ознаки обчислюється незалежно на підставі відомих положень камер, в яких вона спостерігалася;
- оскільки глобальна карта побудована відносно відомих положень камер, подальша візуальна навігація може здійснюватися відносно цієї карти у відомому масштабі;
- величина похибки оцінки траєкторії, побудованої розробленим алгоритмом, не зростає на відміну від похибки оцінки траєкторії алгоритмами інерційної навігації;
- простота і надійність.

Недоліком запропонованого авторами підходу є необхідність прольоту повного маршруту, який подолав БпЛА до моменту втрати зовнішніх навігаційних сигналів.

Метод топографічної кластеризації візуальних зображень ґрунтується на розпізнаванні топографічних візуальних зображень, зроблених під час польоту БпЛА, їх зіставленні та визначенні параметрів польоту БпЛА за виявленими відмінностями цих зображень [10, 11].

Оскільки «одним з вразливих місць у БпЛА є апаратура супутникової навігації (GPS / GLONASS), яку може бути легко нейтралізовано (подавлено) за допомоги засобів створення радіоперешкод» [12] через невелику силу супутникового сигналу та відносно невеликий діапазон частот і постійно накопичувану похибку інерційної системи навігації, зумовлену її конструкцією, умовами роботи та інструментальними чинниками (впливом систематичного дрейфу гіроскопа та зсувом нуля акселерометра) [13, 14], виникає необхідність пошуку нових принципів і методів навігації. Цю проблему може бути вирішено за допомоги методу топографічної кластеризації візуальних зображень. Застосування такого способу розв'язку проблеми описано в патенті [10]. Запропоновано зіставляти зображення місцевості, зроблені фотокамерою на борту БпЛА, на основі особливих точок зображення, які відшукуються, описуються та зіставляються методами BRIEF, ORB, FAST, з подальшою побудовою трипроменевих зірок на обох зображеннях (Рис. 1).

Трипроменеві зірки є з'єднанням трьох особливих точок на зображеннях у фігури, подібні одна до одної. Подібність фігур визначається за порівнянням співвідношення довжин їхніх променів від центру мас до крайніх точок. При збігу таких фігур за їх взаємним розташуванням вираховується зсув, поворот, зміна масштабу зображення.

Особлива точка зображення  $m$  — це точка зображення, окіл якої  $o(m)$  можна відрізнити від околу будь-якої іншої точки зображення  $o(n)$  в деякому іншому околі особливої точки  $o_2(m)$ . Зазвичай, особливі точки лежать на висококонтрастних ділянках зображення, таких як контури об'єктів. З особливою точкою можна пов'язати дескриптор, що є ідентифікатором, який виділяє точку серед інших особливих точок. Сукупність дескрипторів особливих точок може забезпечити «опис ознак» («feature description») об'єктів на зображенні. Характерною особливістю дескрипторів особливих точок є те, що вони до певної міри інваріантні до зсувів, поворотів, змін масштабу, рівня шуму та освітлення зображення.

Особливі точки знаходять за таких підходів (методів):

- виявлення країв об'єктів (детектора країв Кені, детектора країв Деріше, диференціального підходу, оператора Собеля, оператора Превіта, оператора «хрест Робертса»);
- виявлення кутів об'єктів (оператора Гаріса, оператора Ши і Томасі; підходу кривизни рівня; підходу міри сили Гессе; детектора кутів SUSEN; детектора на основі AST (FAST));
- виявлення хребта (перетворення Гафа, узагальненого перетворення Гафа);
- тензора структури та узагальненого тензора структури;
- виявлення афінних інваріантних ознак (методів афінної адаптації форми, детектора афінної області Гаріса, детектора афінної області Гессе);
- функцій (SIFT, SURF, GLOH, HOG, ORB, FAST, BRIEF);
- теорії масштабного простору.

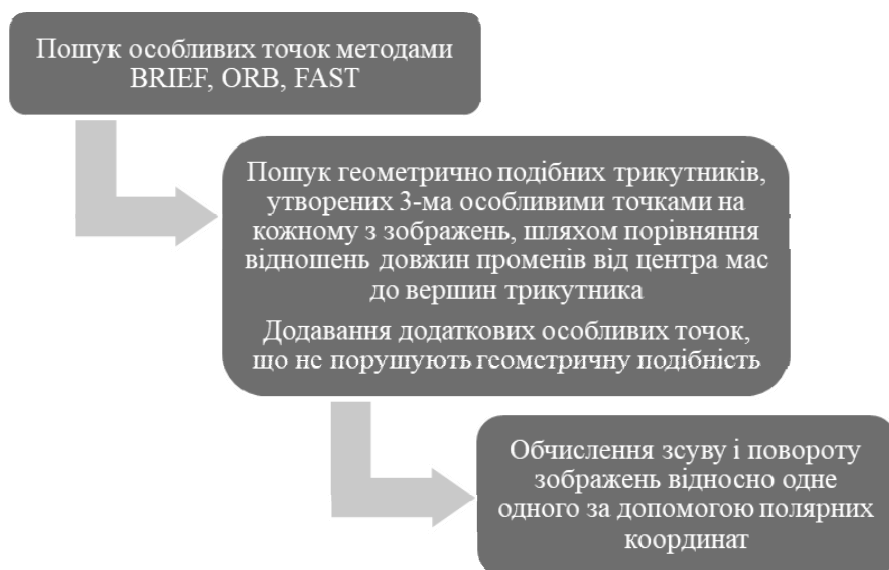


Рис. 1. Структура методу топографічної кластеризації візуальних зображень [10]

Метод топографічної кластеризації візуальних зображень, запропонований авторами патенту, має такі недоліки: іноді неможливо виділити особливі точки через недостатню контрастність областей зображення, наприклад, фотографія поля є одноманітною, і таких точок може бути дуже багато, що ускладнює співставлення дескрипторів і пошук потрібних трипроменевих зірок та збільшує час виконання алгоритму.

**Мета роботи** — розроблення та дослідження методу визначення топографічної спорідненості зображень на основі врахування виявлених особливих зон на зображеннях природнього ландшафту для побудови систем автономної навігації БпЛА.

## ВИЯВЛЕННЯ ОСОБЛИВИХ ЗОН ДОСЛІДЖУВАНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Для виявлення особливих зон використано метод виявлення особливих зон (blob detection method), який використано в різноспрямованих дослідженнях [15], [16]. Метод ґрунтується на пошуку локальних максимумів оператора Лапласа, що дає змогу виявляти особливі зони («плями») на зображенні, тобто ділянки зображення, які відрізняються від пікселів навколо себе за інтенсивністю. Такі зони, у свою чергу, можуть представляти різноманітні об'єкти.

Для їх виявлення задається початковий та кінцевий поріг насиченості пікселів. Усі пікселі, нижче заданого початкового порогу, перетворюються на чорні, а вище — на білі. Далі поріг поступово збільшується до кінцевого порогу з постійним заданим кроком. Ті чорні області зображення, які за зміною порогу залишаються приблизно однакового розміру, і є особливими зонами. Вони відображаються у вигляді кіл відповідного розміру.

Перевагами цього методу порівняно з методом визначення особливих точок [10] є більша швидкість розпізнавання особливих зон, певна нечутливість методу до поворотів та масштабувань зображення, порівняно

однаковий розмір визначених зон (кіл). Окрім переваг, виявилися й деякі недоліки методу: неможливість повноцінної фільтрації таких зон за розміром через певну варіативність цього параметра, складність знаходження подібних фігур (з'єднань центрів мас зон) через невеликі похибки у визначенні границь особливих зон тощо.

## **МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТОПОГРАФІЧНОЇ СПОРІДНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ**

Ми пропонуємо метод топографічної спорідненості зображень, який дає змогу визначати відстань між однаковими точками на двох послідовно зроблених за певний проміжок часу (крок) зображень, а отже, дізнатися відстань, яку пролетів БпЛА, в реальному часі. Перше зроблене зображення назвемо базовим, а наступне — додатковим. Структуру методу надано на Рис. 2.

На **першому етапі** методу топографічної спорідненості візуальних зображень виконується підготовка двох зображень (базового та додаткового), яка полягає в зміні показників колірних каналів зображень, проведенні альфа-, бета-, гамма- корекцій з метою підвищення контрастності зображення. Загалом, ця підготовка може бути різною, залежно від використовуваних методів та специфіки зображень. Було виявлено, що зменшення показників червоного та зеленого колірних каналів на 150 одиниць кожен, або встановлення яскравості (альфа-корекції) на рівні 2,5 ум. одиниць з одночасним наданням показнику контрастності (бета-корекції) значення -150 ум. одиниць дає змогу краще просканувати зображення.

На **другому етапі** здійснюються пошук особливих зон та їхня фільтрація. Особливі зони на зображеннях можуть бути віднайдені за допомоги різних підходів і методів: пошуку локальних максимумів оператора Лапласа (так званого «простого методу»); фільтрів Гауса та Лапласа для виявлення областей з високою варіацією інтенсивності пікселів (методу «Лапласіан Гаусіана»); віднімання двох фільтрів Гауса різного розміру (методу «різниць Гаусіанів»); пошуку екстремумів визначника оператора Гессе масштабованого простору (методу «визначника Гессе»); поєднаного використання оператора Лапласа і визначника оператора Гессе (так званого «гібридного методу Гессе Лапласа»); техніки маскування; афінно-адаптованих версій простого методу, методу «різниць Гаусіанів», методу «визначника Гессе» та гібридного методу Гессе Лапласа; просторово-часових адаптованих версій простого методу та методу «визначника Гессе»; нормалізованого в масштабі простого методу; методу розділення зон за їхнім сірим рівнем Ліндеберга; методу максимально стабільних екстремальних областей (методу MSER); детектора областей на основі кривизни (методу PCBR). Запропонований метод топографічної спорідненості візуальних зображень базується на використанні простого методу.

Фільтрація здійснюється за розміром особливих зон та місцем їх розташування.



**Рис. 2.** Структура методу визначення топографічної спорідненості / подібності візуальних зображень

На **третьому етапі** здійснюється пошук геометрично подібних трикутників та додання до них четвертої точки для утворення геометрично подібних чотирикутників для більшої вірогідності, що взято потрібні фігури. Пошук трикутників пропонуємо виконувати так: беруться три перші визначені особливі зони на базовому та додатковому зображеннях, та визначаються довжини від центру мас утвореного ними трикутника до них самих — як довжини векторів. Координати центрів мас трикутників визначаються за формулами:

$$C_x = \frac{a_x + b_x + c_x}{3};$$

$$C_y = \frac{a_y + b_y + c_y}{3},$$

де  $a_x, a_y, b_x, b_y, c_x, c_y$  — координати трьох особливих зон на зображеннях.

Визначаємо координати вектора  $\bar{a}$ :

$$\bar{a}_x = a_x - C_x;$$

$$\bar{a}_y = a_y - C_y.$$



Довжина ( $L$ ) вектора  $\bar{a}$  розраховується як:

$$L_a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}.$$

Розраховуємо вектори та довжини інших двох векторів.

Далі порівнюються довжини знайдених векторів на додатковому зображенні ( $L_{a2}, L_{b2}, L_{c2}$ ) з відповідними такими самими довжинами векторів на базовому зображенні ( $L_{a1}, L_{b1}, L_{c1}$ ). Спочатку визначаємо частки від ділення довжин зазначених векторів:

$$R_{V_i} = \frac{L_{i2}}{L_{i1}},$$

де  $i = a, b, c$  — вектори на досліджуваних зображеннях.

Наступним кроком є обчислення відмінностей одержаних часток від ділення між собою:

$$R_{V_{ab}} = R_{V_b} - R_{V_a}, \quad \Delta R_{V_{ac}} = R_{V_c} - R_{V_b}$$

Якщо одержані  $\Delta R_{V_i}$  не перевищують заданий поріг і приблизно однакові:

$$\text{if } R_{V_{ab}} \approx R_{V_{bc}}$$

Проводимо перпендикуляр  $h$ , який починається з центру мас  $C$  трикутника і спрямований до верхньої межі зображення, до горизонтальної прямої  $p$ , яка проходить через центр мас  $C$  трикутника. Визначаємо кути між перпендикуляром  $h$  векторами за часовою стрілкою на обох зображеннях (рис. 3).

$$\text{then } \Delta a_1 \Delta b_1 \Delta c_1 \sim \Delta a_2 \Delta b_2 \Delta c_2$$

$$R_{V_{ab}} = R_{V_b} - R_{V_a}, \quad \Delta R_{V_{ac}} = R_{V_c} - R_{V_b}$$

$$\text{if } R_{V_{ab}} \approx R_{V_{bc}} \text{ then } \Delta a_1 \Delta b_1 \Delta c_1 \sim \Delta a_2 \Delta b_2 \Delta c_2$$

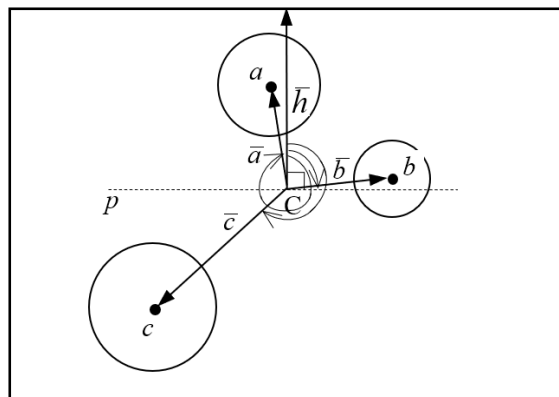


Рис. 3. Визначення кутів між перпендикуляром  $\bar{h}$  та векторами  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$

Формула розрахунку кута між перпендикуляром  $\bar{h}$  та вектором  $\bar{a}$  :

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\bar{h} \cdot \bar{a}}{L_h \cdot L_a}\right),$$

де  $\alpha$  — кут в радіанах.

Множення векторів в чисельнику дробу обчислюється як:

$$\bar{h} \cdot \bar{a} = h_x \cdot a_x + h_y \cdot a_y$$

Так само обчислюємо кути між  $\bar{h}$  та двома іншими векторами за часовою стрілкою.

Оскільки обчислюється лише кут між векторами менший за 180 градусів, то кут для особливих точок, розташованих праворуч від центра мас  $C$ , береться таким, який було отримано обчисленням ( $\alpha$ ), а для особливих точок розташованих ліворуч від центру мас  $C$  трикутника — приблизно 6,28319 радіан (360 градусів) віднімається від обчисленого значення кута, тобто кут дорівнює:

$$\alpha' = 6,28319 - \alpha.$$

Отже, усі кути лежатимуть на проміжку градусів за часовою стрілкою. Це робиться щоб під час порівняння трикутників відкинути дзеркально відображені трикутники, які не можна назвати подібними, а також щоб порівнюючи кути визначити, на скільки повернуто додаткове зображення відносно базового на проміжку від 0 до 360 градусів.

Різниці відповідних за особливими точками кутів, отриманих для досліджуваних трикутників обох зображень, порівнюють і, якщо вони не перетинають заданий поріг та приблизно однакові між собою, то такі трикутники можна вважати подібними:

$$\Delta T_{V_{ab}} = T_{V_b} - T_{V_a}, \quad \Delta T_{V_{bc}} = T_{V_c} - T_{V_b};$$

$$\text{if } T_{V_{ab}} \approx T_{V_{bc}} \text{ then } \Delta a_1 \Delta b_1 \Delta c_1 \sim \Delta a_2 \Delta b_2 \Delta c_2.$$

Для більшої вірогідності того, що порівняння виявило ті самі особливі зони на обох зображеннях, пропонується додати до обох трикутників четверту особливу зону за довжиною та кутом.

На **четвертому етапі** визначається висота, поворот відносно курсу польоту БпЛА та подолана відстань.

За обчисленими співвідношеннями довжин векторів  $R_{V_i}$  визначається зміна масштабу зображення:

- а) якщо  $R_{V_i} > 1$ , то маємо зменшення масштабу;
- б) якщо  $R_{V_i} < 1$  — масштаб збільшується;
- в) якщо  $R_{V_i} = 1$  — масштаб лишається незмінений.

Зміна масштабу зображення у свою чергу свідчить про зміну висоти польоту БпЛА.

За допомоги  $\Delta T_{V_i}$  можна визначити кут зміни орієнтації БПЛА. Для визначення повороту БПЛА відносно курсу розраховують середнє значення трьох показників  $\Delta T_{V_i}$ :

- а) якщо  $\Delta T_{V_i} > 1$ , то маємо поворот праворуч;
- б) якщо  $\Delta T_{V_i} < 1$  — відбувся поворот ліворуч;
- в) якщо  $\Delta T_{V_i} = 1$  — курс без поворотів.

Для визначення відстані, яку пролетів БПЛА, необхідно знайти вектор зсуву  $\overline{A_s}$ . Для цього виконуємо такі дії.

Знаходимо координати центра мас чотирикутників на базовому та додатковому зображеннях за формулами:

$$C'_x = \frac{a_x + b_x + c_x + d_x}{4};$$

$$C'_y = \frac{a_y + b_y + c_y + d_y}{4},$$

де  $a_x, a_y, b_x, b_y, c_x, c_y, d_x, d_y$  — координати чотирьох особливих зон на зображеннях.

Будуємо новий вектор  $\overline{A_2}$  — від центру мас  $C'$  чотирикутника додаткового зображення до центру  $C_{32}$  цього зображення.

Масштабування (зміна довжини) вектора здійснюється за формулами:

$$\overline{A_{m_x}} = \overline{A_{2_x}} \cdot \Delta R_V;$$

$$\overline{A_{m_y}} = \overline{A_{2_y}} \cdot \Delta R_V.$$

Виконуємо поворот вектора  $\overline{A_m}$  за допомоги формул повороту вектора (матриці повороту вектора) (Рис. 4):

$$\overline{A_{m_t_x}} = \overline{A_{m_x}} \cdot \cos(\alpha) - \overline{A_{m_y}} \cdot \sin(\alpha);$$

$$\overline{A_{m_t_y}} = \overline{A_{m_x}} \cdot \sin(\alpha) + \overline{A_{m_y}} \cdot \cos(\alpha)$$

та одержуємо вектор  $\overline{A_{m_t}}$ .

Виконуємо перенесення вектора  $\overline{A_{m_t}}$  на перше, базове зображення та визначаємо координати кінця перенесеного вектора  $\overline{AA}$  за формулами:

$$\overline{AA_x} = \overline{A_{m_t_x}} + C'_{1_x};$$

$$\overline{AA_y} = \overline{A_{m_t_y}} + C'_{1_y}.$$

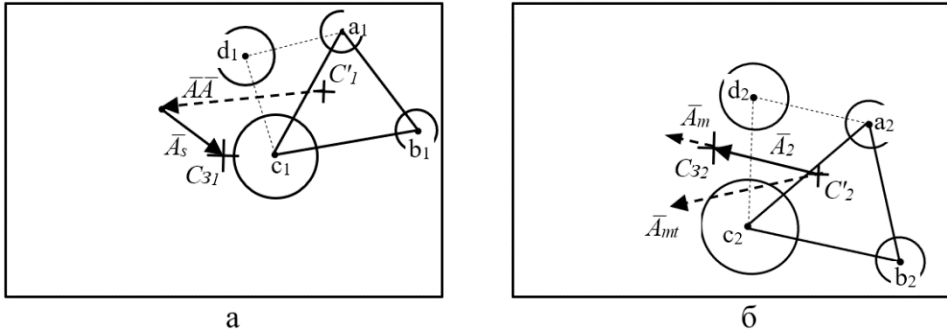


Рис. 4. Визначення вектора зсуву  $\overline{A'_s}$  на базовому зображенні (а) за допомоги перетворень на додатковому зображенні (б)

Далі визначаються координати вектора зсуву зображення  $\overline{A'_s}$  — вектора між центром базового зображення  $C_{31}$  та кінцевою точкою вектора  $\overline{A'A}$  на базовому зображенні:

$$\overline{A'_{s_x}} = C_{31_x} - \overline{A'A_x};$$

$$\overline{A'_{s_y}} = C_{31_y} - \overline{A'A_y}.$$

І врешті визначається довжина вектора зсуву  $\overline{A'_s}$  (Рис. 4):

$$|\overline{A'_s}| = \sqrt{\overline{A'_{s_x}}^2 + \overline{A'_{s_y}}^2}.$$

Запропонований метод топографічної спорідненості зображень забезпечує можливість розрахувати параметри руху БПЛА відносно земної поверхні, а саме: висоту, поворот відносно курсу польоту БПЛА та подолану відстань. Такі параметри враховують під час побудови системи автономної навігації БПЛА, яка може використовуватися окремо від інших систем навігації або разом з ними, доповнюючи їх.

## ВИСНОВКИ

Актуальною проблемою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) або безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) є функціонування їхньої навігаційної системи. Одна із сучасних концепцій системи автономної навігації БПЛА використовує метод топографічної кластеризації візуальних зображень, оснований на пошуку особливих точок за допомоги функцій BRIEF, ORB, FAST. Але іноді неможливо виділити особливі точки за цим методом через недостатню контрастність областей аналізованих зображень, наприклад, в разі одноманітних фотографій природнього ландшафту. В іншому випадку таких точок може бути знайдено дуже багато, що ускладнює зіставлення дескрипторів і пошук подібних трипроменевих зірок на зображеннях, та збільшує час виконання алгоритму.

Запропонований метод топографічної спорідненості зображень базується на основі методу виявлення особливих зон (blob detection methods) за принципом пошуку локальних максимумів оператора Лапласа. Параметри руху БПЛА відносно земної поверхні, обчислені за запропонованим методом, можуть враховуватися під час побудови системи автономної навігації БПЛА, яка може використовуватися окремо від інших систем навігації або разом з ними, доповнюючи їх.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Irani G., Christ J. Image processing for Tomahawk scene matching. *Johns Hopkins APL Technical Digest*. 1994. No. 3. P. 250–264.
2. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2006. No. 2. P. 99–110.
3. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2006. No. 3. P. 108–117.
4. SVO: Semi-Direct Visual Odometry for Monocular and Multi-Camera Systems / C. Forster et al. *IEEE Transactions on Robotics*. 2017. Vol. 33, no. 2. P. 249–265.
5. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual odometry [tutorial]. Part I: The first 30 years and fundamentals. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2011. No. 4. P. 80–92.
6. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual odometry: part II: matching, robustness, optimization, and applications. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2012. No. 2. P. 78–90.
7. Efficient on-board Stereo SLAM through constrained-covisibility strategies / G. Castro et al. *Robotics and Autonomous Systems*. 2019. No. 116. P. 192–205.
8. Qin T., Li P., Shen S. VINS-Mono: a robust and versatile monocular visual-inertial state estimator. *IEEE Transactions on Robotics*. 2017. No. 4. P. 1004–1020.
9. VIMO: simultaneous visual inertial model-based odometry and force estimation / B. Nisar et al. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019. No. 3. P. 2785–2792.
10. Система автономної навігації безпілотного літального апарата на основі топографічної кластеризації візуальних зображень : пат. UA 121833 С2 Україна : 2020.01. № а 2019 05904 ; заявл. 29.05.2019 ; опубл. 27.07.2020, Бюл. № 14. 18 с.
11. Інтелектуальна інформаційна технологія автономної навігації безпілотного літального апарату / О. Волков та ін. *Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування* : матеріали 2-ї Міжнар. наук.-техн. конф., м. Харків, 6 груд. 2018 р. 2018. С. 18–19.
12. Методичні рекомендації «Боротьба з безпілотними літальними апаратами» (за досвідом проведення ООС (раніше АТО). Київ : Центр опер. стандартів і методики підготов. Зброй. Сил України спільно з Голов. упр. підготов. Зброй. Сил України, 2019. 44 с.
13. Герасимов С., Коломійцев О., Пустоваров В. Особливості визначення точності вимірювань інерціальних приладів визначення координат. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 6(52). С. 3–8.
14. Зарубін А., Астанін В. Аналіз сумарних інструментальних похибок інерціальних навігаційних систем. *Системи озброєння і військова техніка*. 2006. № 1. С. 68–71.
15. Han K. T. M., Uyyanonvara B. A Survey of Blob Detection Algorithms for Biomedical Image. *2016 7th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES)*. P. 57–60.
16. Zavadil J., Tuma J., Santos V. Traffic signs detection using blob analysis and pattern recognition. *Proceedings of the 13th International Carpathian Control Conference (ICCC), High Tatras, 28–31 May 2012*. 2012. P. 776–779.

Отримано: 19.12.2023

## REFERENCES

1. Irani G., Christ J. Image processing for Tomahawk scene matching. *Johns Hopkins APL Technical Digest*. 1994, No. 3, pp. 250–264.
2. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2006, No. 2, pp. 99–110.
3. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2006, No. 3, pp. 108–117.
4. SVO: Semi-Direct Visual Odometry for Monocular and Multi-Camera Systems / C. Forster et al. *IEEE Transactions on Robotics*. 2017, Vol. 33, no. 2, pp. 249–265.
5. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual odometry [tutorial]. Part I: The first 30 years and fundamentals. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2011, No. 4, pp. 80–92.
6. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual odometry: part II: matching, robustness, optimization, and applications. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2012, No. 2, pp. 78–90.
7. Efficient on-board Stereo SLAM through constrained-covisibility strategies / G. Castro et al. *Robotics and Autonomous Systems*. 2019, No. 116, pp. 192–205.
8. Qin T., Li P., Shen S. VINS-Mono: a robust and versatile monocular visual-inertial state estimator. *IEEE Transactions on Robotics*. 2017, No. 4, pp. 1004–1020.
9. VIMO: simultaneous visual inertial model-based odometry and force estimation / B. Nisar et al. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019, No. 3, pp. 2785–2792.
10. Autonomous navigation system for unmanned aerial vehicle based on topographic clustering of visual images : pat. UA 121833 C2 Ukraine: 2020.01. № а 2019 05904 ; application for application filed 29.05.2019 ; published 27.07.2020, Bulletin No. 14. 18 p.
11. Intelligent information technology of autonomous navigation of an unmanned aerial vehicle / O. Volkov et al. *Actual problems of automation and instrumentation: materials of the 2nd International scientific and technical conference*, Kharkiv, December 6. 2018. 2018, pp. 18–19. [In Ukrainian]
12. Methodological recommendations "Combating unmanned aerial vehicles" (based on the experience of the Joint Forces Operation (formerly ATO). Kyiv: Center for Operational Standards and Methods of Preparation. Arms. Forces of Ukraine in cooperation with the Main Directorate of Training. Armed Forces of Ukraine. Armed Forces of Ukraine, 2019. 44 p. [In Ukrainian]
13. Gerasimov S., Kolomyitsev O., Pustovarov V. Features of determining the measurement accuracy of inertial coordinate determination devices. *Control, navigation and communication systems*. 2018, № 6(52), pp. 3–8. [In Ukrainian]
14. Zarubin A., Astin V. Analysis of total instrumental errors of inertial navigation systems. *Systems of weapons and military equipment*. 2006, № 1, pp. 68–71. [In Ukrainian]
15. Han K. T. M., Uyyanonvara B. A Survey of Blob Detection Algorithms for Biomedical Image. *2016 7th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES)*, pp. 57–60.
16. Zavdil J., Tuma J., Santos V. Traffic signs detection using blob analysis and pattern recognition. *Proceedings of the 13th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, High Tatras, 28–31 May 2012. 2012, pp. 776–779.

Received 19.12.2023

Dzhebrailov R. Yu., PhD Student,  
Junior Researcher of the Research Laboratory of Unmanned Complexes and Systems,  
<https://orcid.org/0000-0002-4473-9670>, e-mail: [rombik1197@gmail.com](mailto:rombik1197@gmail.com)

Gospodarchuk O. Yu.,  
Senior Researcher of the Intelligent Control Department  
<https://orcid.org/0000-0001-6619-2277>, e-mail: [olexago@gmail.com](mailto:olexago@gmail.com)

International Research and Training Center  
for Information Technologies and Systems  
of the National Academy of Science of Ukraine  
and the Ministry of Education and Science of Ukraine.  
40, Acad. Glushkov av., 03187, Kyiv, Ukraine

## DETECTION OF SPECIAL ZONES AS A BASIS FOR THE METHOD OF TOPOGRAPHIC AFFINITY OF IMAGES

**Introduction.** *The satellite and inertial navigation systems of an unmanned aerial vehicle (UAV) or unmanned aircraft system (UAS) have their drawbacks. Attempts to eliminate these shortcomings are to develop an autonomous navigation system. The officially patented model of an autonomous navigation system, as it turned out, also has its drawbacks. Accordingly, there is a need to improve such an autonomous navigation system.*

**The purpose of the paper** is to develop and study a method for determining the topographic affinity of images based on the detected special zones in images of the natural landscape for autonomous UAV navigation.

**Results.** *A method of topographic affinity of visual images based on the detection of special zones by searching for local maxima of the Laplace operator in the image has been developed. The method of topographic affinity of images allows involving a smaller number of special points for comparison, which reduces the amount of required memory resources and increases performance.*

**Conclusions.** *The proposed method of topographic affinity of images based on the detection of special zones (blob detection methods) based on the principle of searching for local maxima of the Laplace operator can be used to build an autonomous navigation system for UAVs. The algorithmic implementation of the method has shown that it can work with a large number of complex and diverse images of the earth's surface obtained during UAV flights, is effective by increasing the processing speed of the studied images, and can be implemented to create full-fledged UAV autonomous navigation systems.*

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle, unmanned aerial vehicle complex, autonomous navigation, special points, special zones, method of special image zones analysis.*