

# Informatics and Information Technologies

---

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt216.02.005>

**ВОЛКОВ О.Є.**, канд.техн.наук, старш. дослідник,

директор,

<https://orcid.org/0000-0002-5418-6723>, e-mail: alexvolk@ukr.net

**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

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України,

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

## ТЕСТУВАННЯ МЕТОДУ ТОПОГРАФІЧНОЇ СПОРІДНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ НА ЗОБРАЖЕННЯХ ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ

---

**Вступ.** У зв'язку з розробленням методу топографічної спорідненості зображень виникла необхідність у його тестуванні за критеріями працездатності та ефективності.

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

**Результати.** За результатами тестування за трьома завданнями метод показав свою ефективність на рівні 100 %.

**Висновки.** Метод топографічної спорідненості зображень може з високою ефективністю працювати з великою кількістю складних різноманітних зображень земної поверхні, які не піддаються аналізу іншими відомими методами. Його може бути застосовано для побудови системи автономної навігації БпЛА як окремо, або з разом з іншими методами.

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

© ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## **ВСТУП**

Співробітники Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем НАН та МОН України Господарчук О.Ю. та Джебрайлов Р.Ю. розробили метод топографічної спорідненості зображень. Метою розроблення було створення методу, який мав би працювати на складних зображеннях, які не можуть бути достатньо ефективно зіставлені засобами комп'ютерного зору, іншими відомими методами в системах автономної навігації БПЛА. Відповідно виникла проблема доведення ефективності створеного методу в порівнянні з іншими методами.

## **ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ**

На сьогоднішній день існують декілька методів зіставлення зображень для задач навігації літальних апаратів, які під час їх тестування показують різні рівні ефективності. Наприклад, у системі Digital Scene Matching Area Correlator (DSMAC), яка застосовується в ракетах «Томагавк» (США), доля виявлених хибних збігів кореляційних піків на зображеннях складає до 50 % серед усіх випадкових бінарних збігів [1]. Варто зауважити, що йдеться в основному про зображення, де подані саме населені пункти з будинками, вулицями, громадськими спорудами, аеропортами тощо. З метою зменшення показника хибних збігів, починаючи з ракет покоління Block II, визначення кореляційних піків виконується на парах із трьох послідовних кадрів із вибором найбільшого рівня кореляції. В ракетах покоління Block PA було вже використано дані інерційної системи навігації для зсуву кореляційних поверхонь набору послідовних зображень для виявлення «справжніх» кореляцій, навіть якщо вони відсутні при зіставленні окремих зображень. Вказані модернізації дали змогу зменшити рівень втрат у середньому до 8 %. На інші втрати припадають геометричні втрати. Таким чином, ефективність системи DSMAC складає 92 % при аналізі зображень зі штучними об'єктами. Окремо варто зазначити, що в силу особливостей роботи системи, а саме порівняння заздалегідь підготовлених зображень із зображеннями в реальному часі, можливі втрати ефективності через мінливість на зображеннях (рух тіней, опадання листя на деревах та ін.).

Метод зіставлення зображень на основі пошуку, опису та зіставлення особливих точок зображень також має власні недоліки, і його ефективність різна залежно від використовуваних методів детекторів та дескрипторів, а також від якості фотодатчиків та умов середовища зйомки. Так, на зображеннях природного ландшафту з полем, невеликим озером, скупченням дерев та декількома будинками при змінній яскравості зображення алгоритм SIFT демонструє кількість правильних збігів особливих точок на рівні 98,6 % за час виконання 0,368 с, алгоритм SURF — 97,2 % за час виконання 0,524 с, ORB — 76,2 % за час виконання 0,042 с для однієї пари зображень [2]. На цих же зображеннях, але із доданим шумом «солі та перцю», алгоритм SIFT показує вже кількість правильних збігів особливих точок на рівні 63,2 % за час виконання 0,387 с, алгоритм SURF — 53,4 % за час виконання 0,502 с, ORB — 50,2 % за час виконання 0,050 с для однієї пари зображень. В разі зміни кута зображення на 45 градусів алгоритм SIFT демонструє кількість

правильних збігів особливих точок на рівні 64,2 % за час виконання 0,731 с, алгоритм SURF — 44,5 % за час виконання 0,636 с, ORB — 65,0 % за час виконання 0,084 с для однієї пари зображень, при цьому в разі постійної зміни кута на 45 градусів відсотки залишатимуться практично такими ж, з невеликою зміною в десятих відсотка, тоді як при постійній зміні кута на 90 градусів ефективність усіх алгоритмів зростає до 91–97 %. Також на ефективність вказаних алгоритмів впливає зміна масштабу зображень. Так, в разі зміни масштабу одного зображення на 55 % по відношенню до іншого, алгоритм SIFT показує кількість правильних збігів особливих точок на рівні 75,1 % за час виконання 0,249 с, алгоритм SURF — 72,1 % за час виконання 0,393 с, ORB — 54,6 % за час виконання 0,032 с для однієї пари зображень. Варто зауважити, що кількість особливих точок, знайдених детекторами, для алгоритму SIFT була в межах 7544–7970 од. для немасштабованих зображень та 1765 од. для масштабованого, для алгоритму SURF — в межах 10954–10987 од. для масштабованого та 4254 од. для немасштабованого зображення, ORB — постійно 500 од. для всіх зображень. Таким чином, в середньому алгоритм SIFT є ефективним на рівні 79,5 %, алгоритм SURF на рівні 72,7%, ORB — 67,5 %. Загалом вказаними алгоритмами ефективно не можуть бути проаналізовані зображення з низькою контрастністю областей на них. Недоліками алгоритмів також є знаходження великої кількості особливих точок, фільтрація і співставлення яких між собою вимагає багато часу та системних ресурсів комп'ютера.

Деякі з зазначених алгоритмів або подібних до них є складовою частиною запатентованої системи автономної навігації БпЛА на основі методу топографічної кластеризації візуальних зображень [3], а саме ORB, BRIEF, FAST. Як зазначають автори патенту, з допомогою моделювання було встановлено, що недоліком зазначених алгоритмів детекторів-дескрипторів є те, що частина збігів особливих точок може бути помилковою через наявність на зображеннях великої кількості дрібних об'єктів з низькою деталізацією, що, у свою чергу, характерно саме для зображень, які використовуються для візуальної навігації.

Розроблений метод топографічної спорідненості зображень на основі виявлення особливих зон (blob detection methods) за принципом пошуку локальних максимумів оператора Лапласа [4] покликаний вирішити недоліки систем навігації БпЛА на основі сигналу з глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) — GPS, Galileo, ГЛОНАСС, Beidou та інерційної системи навігації, їх поєднання, а також наведених вище методів, та планується використовувати для автономної системи навігації БпЛА.

Для підтвердження працездатності та ефективності вказаного методу є закономірною необхідність його тестування.

Як *працездатність методу* маємо на увазі чи може певний метод вирішити повністю або частково ті проблеми, які ставить перед ним дослідник.

*Ефективність методу* означає на скільки той чи інший метод може вирішити поставлені перед ним проблеми.

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

## ЗАВДАННЯ ТЕСТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ НА ЗОБРАЖЕННЯХ ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ

Запропонований метод виявлення топографічної спорідненості зображень протестовано шляхом виконання завдань аналізу різних зображень поверхні землі, зроблених з БпЛА, за допомоги бібліотеки підпрограм комп'ютерного зору й оброблення зображень з відкритим кодом OpenCV (сайт бібліотеки — <https://opencv.org/>).

Розглянемо результати використання методу для аналізу двох послідовних кадрів — основного (а) та додаткового (б). Виконано три завдання (відповідно Рис. 2–4), під час яких отримано різні зображення природного ландшафту, з використанням такого алгоритму, побудованого за розробленим методом (Рис. 1).

На першому кроці було здійснено зменшення показників червоного та зеленого колірних каналів RGB на 150 одиниць кожен.

На другому кроці отримали зображення чорно-білого формату зі зміненими колірними каналами RGB: -150 red (червоний) та -150 green (зелений), подане як бінарне за порогом зі значенням 130 ум. одиниць інтенсивності сірого кольору пікселів. Відповідно ці кадри зміщено, повернуто та змінено за масштабом один відносно іншого.

На третьому кроці було знайдено особливі зони шляхом пошуку локальних максимумів оператора Лапласа.

Для зіставлення особливих зон розроблено механізм фільтрації імовірних подібних особливих зон залежно від їх розташування та розміру. Фільтрація за розташуванням здійснюється на четвертому кроці так: для кожної особливої зони другого зображення беруть ті особливі зони першого (базового) зображення, які лежать в межах певних допусків. Область фільтрації вибрано розміром 300x300 пікселів, оскільки такий розмір визначено оптимальним для захоплення змінених за місцем розташування особливих зон на зображенні, враховуючи задану в експерименті частоту одержання кадрів фотокамерою БпЛА.

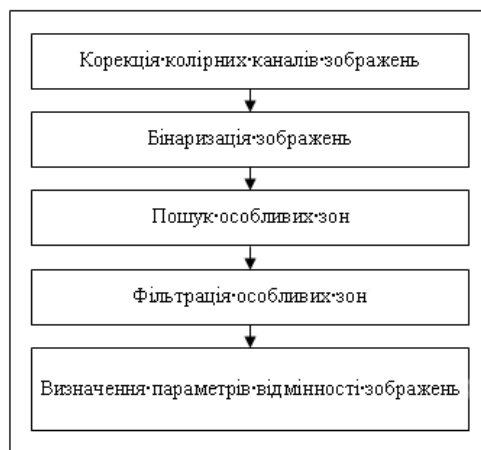


Рис. 1. Алгоритм методу виявлення особливих зон за принципом пошуку локальних максимумів оператора Лапласа

Фільтрація за розміром виконується на основі порівняння кожної відібраної особливої зони двох зображень за їх діаметрами. Для тестових зображень прийнято, що різниця їхніх діаметрів повинна бути не більше за 15 пікселів. Це уможливило зменшення часу перебору подібних фігур.

На *п'ятому кроці* за запропонованим методом топографічної спорідненості візуальних зображень порівняли два зображення (Рис. 2–4: а — базове та б — додаткове на цих рисунках) та визначили параметри їх відмінності. Цифрами 1, 2, 3 позначено центри мас трьох кіл, які з'єднуються у подібні трикутники на кожному з двох досліджуваних зображень, а в разі додавання центру мас четвертого кола (цифра 4) — у подібні чотирикутники. Виділено центри першого (базового) зображення (5) та другого (додаткового) зображення (7). Цифрою 6 позначено кінцеву точку того вектора  $\overline{AA}$  на першому, базовому зображенні, який було перенесено з другого зображення.

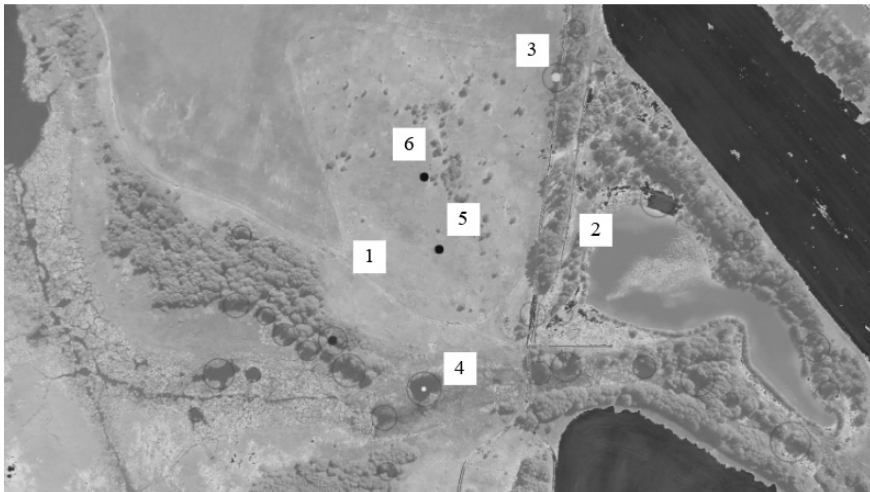
Розглянемо результати використання зазначеного алгоритму під час виконання трьох завдань.

**Завдання 1** полягало у визначенні відстані польоту БПЛА за зображенням природного ландшафту, на відкритій місцевості з озерами, річкою, лісом, полями, пляжем, поодинокими деревами, стежками, відкритими ділянками луку тощо (Рис. 2). Дві частини рисунка (Рис. 2 а, та 2 б) — це два кадри, зроблені один за одним під час польоту БПЛА.

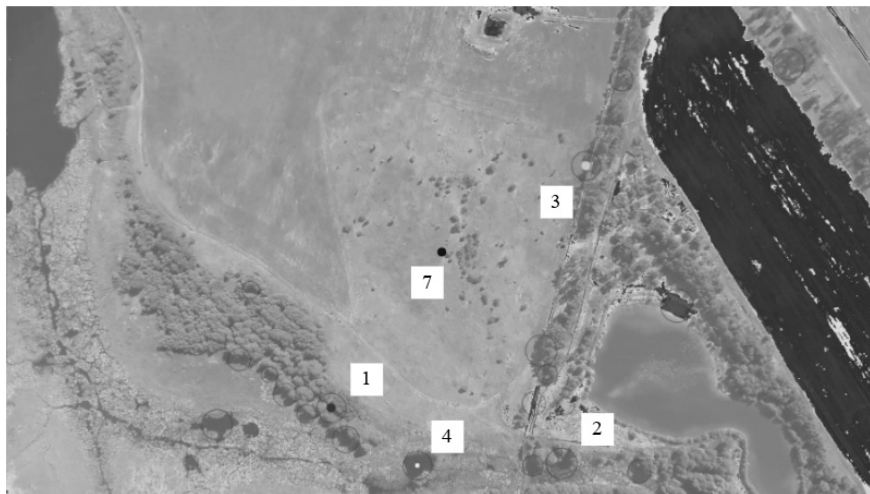
За довжиною вектора  $\overline{A_5}$  (між точками 5 та 6 на Рис. 2) обчислено зсув зображення, тобто відстань, яку подолав БПЛА за час між зйомкою першого та другого зображень.

**Завдання 2** полягало у визначенні відстані польоту БПЛА за зображеннями іншого типу природного ландшафту — села з багатьма будинками; двориками, огородами й садами біля будинків; великою спорудою; шосейною дорогою; частинами полів; лісосмугою; чагарниками тощо (Рис. 3, використано позначки Рис. 3а, 3б). За зображеннями цього типу також показано можливість визначення відстані, яку подолав БПЛА за час між одержанням першого та другого зображення.

Порівнюючи довжини відповідних векторів від центру мас чотирикутників до їхніх вершин ( $L_{a1}, L_{b1}, L_{c1}$  з  $L_{a2}, L_{b2}, L_{c2}$ ) було визначено зміну масштабу зображення ( $R_{Vi}$ ), за допомоги порівняння відповідних кутів між перпендикуляром від центру мас чотирикутників до верхньої межі зображення ( $\overline{h_1}; \overline{h_2}$ ) та векторами ( $\overline{a_1}, \overline{b_1}, \overline{c_1}; \overline{a_2}, \overline{b_2}, \overline{c_2}$ ) було визначено поворот зображення ( $T_{Vi}$ ), обчисливши відстань між центром першого зображення (цифра 5) та знайденою точкою (цифра 6) було визначено зсув зображення.



а



б

Рис. 2. Завдання 1: а — базове та б — додаткове зображення



а



б

Рис. 3. Завдання 2: а) — базове, б) — додаткове зображення

У завданні 3 аналізувалися два зроблені один за одним кадри польоту БПЛА на відкритій місцевості з незайманою ділянкою поверхні землі, вкритою травою, двома невеликими водосховищами на ній, невеликою частиною поля, лісосмугою, дорогою біля лісосмуги, заростями дерев, стежками, двома паралельними лініями електропередачі (Рис 4). Аналіз таких зображень за описаним алгоритмом також дав змогу визначити зміну масштабу зображення, поворот зображення та обчислити зсув зображення.



а



б

Рис. 4. Порівняння зображень а) та б) за завданням 3

Отже, аналіз зображень за трьома завданнями показав придатність запропонованого методу топографічної спорідненості зображень для аналізу різноманітних зображень земної поверхні, отриманих під час польотів БпЛА.

## ВИСНОВКИ

Алгоритмічна реалізація методу топографічної спорідненості зображень показала, що він може працювати з великою кількістю складних різноманітних зображень земної поверхні, отриманих під час польотів БпЛА. За результатами тестування за трьома завданнями метод показав свою абсолютну ефективність. Отже, розроблений метод топографічної спорідненості зображень на основі виявлення особливих зон (blob detection methods) за принципом пошуку локальних максимумів оператора Лапласа може компенсувати



недоліки систем навігації БпЛА на основі сигналу з глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) — GPS, Galileo, ГЛОНАСС, Beidou та інерційної системи навігації, їх поєднання тощо, а також інших відомих методів зіставлення зображень та цілком може бути застосовним для автономної системи навігації БпЛА.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Irani G., Christ J. Image processing for Tomahawk scene matching. *Johns Hopkins APL Technical Digest*. 1994, No, 3, pp. 250–264.
2. Ronghao Li, Pengqi Gao, Xiangyuan Cai, Xiaotong Chen, Jiangnan Wei, Yinqian Cheng, Hongying Zhao. A Real-Time Incremental Video Mosaic Framework for UAV. *Remote Sens*. 2023, No, 15, pp. 250–264.
3. Система автономної навігації безпілотного літального апарата на основі топографічної кластеризації візуальних зображень : пат. UA 121833 C2 Україна : 2020.01. № а 2019 05904 ; заявл. 29.05.2019 ; опубл. 27.07.2020, Бюл. № 14. 18 с.
4. Виявлення особливих зон як основа методу топографічної спорідненості зображень / Р. Ю. Джебрайлов та ін. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2024. № 1. С. 20–34.

Отримано: 23.03.2024

#### REFERENCES

1. Irani G., Christ J. Image processing for Tomahawk scene matching. *Johns Hopkins APL Technical Digest*. 1994, No, 3, pp. 250–264.
2. Ronghao Li, Pengqi Gao, Xiangyuan Cai, Xiaotong Chen, Jiangnan Wei, Yinqian Cheng, Hongying Zhao. A Real-Time Incremental Video Mosaic Framework for UAV. *Remote Sens*. 2023, No, 15, pp. 250–264.
3. 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. [In Ukrainian]
4. Dzhebrailov R.Yu., Gospodarchuk O.Yu. Detection of Special Zones as a Basis for the Method of Topographic Affinity of Images *Cybernetics and Computer Engineering*, 2024, № 1, pp. 20–34. <https://doi.org/10.15407/kvt215.01.020> [In Ukrainian]

Received : 23.03.2024

Volkov O.Ye., PhD (Engineering), Senior Researcher,  
Director,  
<https://orcid.org/0000-0002-5418-6723>, e-mail: alexvolk@ukr.net  
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  
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

#### TESTING THE METHOD OF TOPOGRAPHIC AFFINITY OF IMAGES ON IMAGES OF THE EARTH'S SURFACE

**Introduction.** *In connection with the development of the method of topographic affinity of images, it became necessary to conduct its testing according to the criteria of workability and efficiency.*

**The purpose of the paper** is testing of the method of determining the topographic affinity of images based on taking into account the detected special zones on the images of the natural landscape for the autonomous navigation of UAVs.

**Results.** *According to the results of testing for three tasks, the method showed its effectiveness at the level of 100%.*

**Conclusions.** *The method of topographic affinity of images can work with a large number of complex and diverse images of the Earth's surface, which cannot be analyzed by other known methods, and with high efficiency. It can be used to build a system of autonomous navigation of UAVs separately or together with other methods.*

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle, unmanned aircraft complex, autonomous navigation, special points, special areas, method of analysis of special areas of images.*